

Einzel nicht im Buchhandel.

Ueberreicht vom Verfasser.

Sonderabdruck

aus

Chemie der Erde

Zeitschrift der chemischen Mineralogie, Petrographie, Geologie
und Bodenkunde

Herausgegeben von

Dr. Dr. G. Linck,

und

Dr. E. Blanck,

o. ö. Professor der Mineralogie u. Geologie
an der Universität Jena

o. ö. Prof. der Agrikulturchemie u. Bodenkunde
an der Universität Göttingen

Vierter Band

Verlag von Gustav Fischer in Jena

1929

Über eine Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der in der freien Natur.

Von Erich Kaiser in München.

(Mit 2 Abbildungen im Text).

I. Edaphisch bedingte Verwitterung in der freien Natur im Gegensatz zu der klimatisch bedingten	291
II. Rauchgasverwitterung der Bausteine im allgemeinen	300
III. Die Wasserbewegung in den Quadern eines Bauwerkes	302
IV. Die Verwitterung der Bausteine ist edaphisch bedingt	305
V. Die chemische Verwitterung der Bausteine im allgemeinen	307
VI. Das Eindringen der chemischen Verwitterung in die Bausteinquader	312
VII. Über einige an der chemischen Verwitterung unserer Monumentalbauten beteiligte Verwitterungsvorgänge	318
1. Chloride als zerstörende Verwitterungssalze	319
2. Sulfate als zerstörende Verwitterungssalze	322
a) Trachyt vom Drachenfels (Siebengebirge)	322
b) Riebeckittrachyt von der Hohenburg bei Berkum	323
c) Andesit aus dem Siebengebirge	324
d) Verschiedene Verwitterungsvorgänge nebeneinander besonders bei Eruptivgesteinen	324
3. Über Beobachtungen im abgekürzten Verwitterungsversuch	325
4. Bedeutung der Gasabsorption	327
5. Photochemische Einflüsse bei der Verwitterung	331
6. Einflüsse organischer Vorgänge auf die chemische Verwitterung	333
VIII. Zusammenfassung und Folgerungen	334
Literatur	340

Die letzten Jahre brachten eine ganze Reihe von Einzelveröffentlichungen über die chemische Verwitterung von Bausteinen an diesem und jenem Orte, dieses oder jenes Gestein behandelnd. Die Schädigung der alten Bauten macht eben vor der finanziellen Bedrängnis unserer Zeit nicht halt, sondern geht unaufhörlich, wenn auch oft nur recht langsam, aber stets weiter fort. Das Maß der Schädigung ist nun so groß, daß die Verwitterungserscheinungen überall besonders hervor-

treten und zu einer weitergehenden Aufklärung über die Ursachen direkt herausfordern.

Aber alle die neuen Veröffentlichungen betreffen immer wieder nur ein einzelnes Gesteinsvorkommen. Die meisten Bearbeiter verweisen auf meine Darstellung von 1907¹⁾, meist ohne eine spätere Zusammenfassung von 1915 zu berücksichtigen, in der schon manche der im folgenden besprochenen allgemeinen Erscheinungen abgehandelt oder erwähnt sind. Mancher Kritiker meiner ersten Darstellung wäre um Nebenbemerkungen herumgekommen, wenn er diese Zusammenfassung der Frage gekannt hätte, die — wie ich zugestehe — an etwas entlegener Stelle erfolgte. Die meisten Veröffentlichungen in Zeitschriften der Mineralogie und Geologie oder in den diesen Fächern nahestehenden Zeitschriften übertrugen meine 1907 veröffentlichten Untersuchungen am Kölner Dom auf die neu untersuchten Bauwerke an anderen Orten oder auf andere Bausteine. Aber es fehlte — selbstverständlich — nicht an Gegenäußerungen, in denen bewiesen wurde, daß schweflige Säure an jenem anderen Orte nicht die Verwitterung hervorgerufen habe. Manche gingen sogar soweit, daß sie eine besondere Bedeutung der schwefligen Säure ablehnten, sogar behaupteten, daß von mir herangezogene Beispiele anders zu werten seien. Die letzteren Äußerungen sind seltener.

Aber gerade wegen der einander gegenüberstehenden Äußerungen ist es dringend notwendig, einige allgemeine Gesichtspunkte hervorzuheben, damit die weiteren Untersuchungen nicht alle so einseitig verlaufen wie in der letzten Zeit. Ich greife dabei zurück auf viele bisher unveröffentlichte Untersuchungen, die ich seit jener Veröffentlichung vom Jahre 1907 über die Frage der Verwitterung unserer natürlichen Bausteine habe anstellen können. Alle meine Beobachtungen können in einem kurzen Aufsatz nicht wiedergegeben werden.

Eine Kritik der gegen meine damalige Auffassung gerichteten Äußerungen glaube ich großenteils ruhig unterlassen zu können, da sich manche Differenzpunkte aus dem folgenden ohne weiteres aufklären.

I. Edaphisch bedingte Verwitterung in der freien Natur im Gegensatz zu der klimatisch bedingten.

Wenn wir die Verwitterung der aus Natursteinen errichteten Bauten beurteilen wollen, dann müssen wir von den Erfahrungen ausgehen, welche die Geologie aus den Beobachtungen über die natürliche Verwitterung gewonnen hat. Wir werden dabei das spezielle

¹⁾ Die Literatur ist am Schlusse zusammengefaßt. Sie soll und kann nicht vollständig sein und soll nur diese oder jene Veröffentlichung als Beispiel angeben.

Gesteinsvorkommen in erster Linie betrachten und festzustellen suchen, wie es am Orte seiner Gewinnung verwittert oder verwittern könnte. Wir müssen daher, wenn wir ein völlig klares Bild über die mögliche Verwitterung gewinnen wollen, darüber hinausgreifen und uns die Verwitterung gleicher, ähnlicher und abweichend zusammengesetzter Gesteine sowohl am Gewinnungs- wie Verwendungsorte ansehen.

Während die Bodenlehre bei der Betrachtung der Verwitterung früher die Bedeutung des Untergrundes ganz besonders hervorgehoben hatte, spricht sie heute mit Recht dem Klima den größeren Einfluß für die Entstehung der verschiedenen Bodentypen zu. Aber doch sind in der Bodenlehre Anzeichen für eine wieder stärkere Beachtung des Untergrundes zu erkennen. Denn wir sehen eben in der Natur schon mannigfache Verwitterungserscheinungen, welche direkt vom Gesteine abhängen, von seinem tektonischen Verbände, seiner Porosität oder seiner Klüftung, auch andere Erscheinungen, welche durch die Lage des betreffenden Ortes gegenüber der Hauptwindrichtung, Hauptniederschlagsrichtung usw. bedingt sind. Dann tritt nicht selten eine Verwitterung ein, welche von der klimatisch bedingten der Umgebung mehr oder weniger stark abweicht. Ich will hier nur daran erinnern, daß man in der Bodenlehre von Ortsböden, von dem Gestein als aklimatisch wirkendem Agens spricht, daß die geographischen Darstellungen von Fremdformen oder Fremdlingformen sprechen usw.

Eine uns in dem hier vorzutragenden Zusammenhang besonders interessierende Erscheinung ist die Abhängigkeit der Verwitterung von der Körnung und damit von der Wasserbewegung in dem einzelnen, der Verwitterung ausgesetzten Gesteine. Die bei nur rein klimatischem Einfluß mehr oder weniger gleichsinnig verlaufende Verwitterung kann durch die besondere Wasserbewegung im einzelnen Gesteine wesentlich verändert werden. Grobkörnige, das Wasser leicht durchlassende Gesteine verhalten sich, da sie eben das Wasser leicht durchsickern und abfließen lassen, in einzelnen Felsen anders, als feinkörnige oder dichte Gesteine, in welchen das Wasser lange Zeit festgehalten wird. Starke Unterschiede der Wasserbewegung in den einzelnen Felsen führen zu Abweichungen von den allgemeinen, durch das Klima der betreffenden Gegend bedingten Verwitterungserscheinungen. Beispiele hierfür lassen sich aus den verschiedensten Klimazonen der Erde beibringen. Eine von der für das Klima des Beobachtungsortes normalen Wasserbewegung im Untergrunde abweichende Zirkulation kann selbstverständlich auch durch besondere Klüftung, besondere tektonische Erscheinungen und besondere Lagerungsformen hervorgerufen werden.

Die von der Umgebung abweichenden Verwitterungserscheinungen hat man oft in besonderer Weise zu deuten gesucht. Die scheinbar abnorme, sogenannte Wabenverwitterung an vielen Sandsteinfelsen in dem humiden Klima Mitteleuropas braucht z. B. nicht durch ganz komplizierte Vorgänge erklärt zu werden, sondern läßt sich am leichtesten auf die besondere Wasserführung in den betreffenden Untergrundgesteinen zurückführen¹⁾.

Wir müssen bei allen Erklärungen der Verwitterungsformen und -vorgänge in allererster Linie den Weg, die Eigenschaften, die Veränderungen, dann das Absteigen, Festhaften und das sogar im humiden Klima nicht so seltene Wiederaufsteigen des Kapillar-, Sicker- und Senkwassers im Auge behalten. Der Verbleib der in Lösung gegangenen Verwitterungssalze und die Zusammensetzung der Verwitterungsrückstände sind ganz wesentlich durch die Bewegung des Senkwassers beeinflusst. Das ist alles selbstverständlich, muß aber des folgenden wegen angeführt werden.

Ich machte vor kurzem darauf aufmerksam, daß wir in den verschiedenen Klimazonen der Erde Verwitterungsformen und Sedimentationserscheinungen wahrnehmen, welche dem Klima des betreffenden Standortes und dessen normaler Sedimentation fremdartig gegenüberstehen. Ich bezeichnete die auf das Gestein und dessen Lagerung am einzelnen Orte zurückzuführenden Erscheinungen (nicht nur die Verwitterung) als edaphisch bedingt, indem ich einen in der Pflanzengeographie eingeführten Ausdruck auf geologische Vorgänge und Erscheinungen übertrug. Edaphische Pflanzenformationen sind bedingt durch den Untergrund, durch das Gestein, auf welchem die betreffenden Pflanzengossenschaften wachsen, von dessen Zusammensetzung oder Gefüge sie eben abhängig sind. Edaphisch bedingte geologische Vorgänge und Erscheinungen sind diejenigen, welche durch das Untergrund-

¹⁾ Die Bedeutung der Gesteinsbeschaffenheit und der Wasserzirkulation im Gesteine für die Erklärung der Wabenverwitterung ist bereits von verschiedenen Seiten hervorgehoben worden. Ich erinnere nur an die Arbeiten von D. Häberle (vgl. bes. die Zusammenfassung in Geol. Rundschau 1915, 6., 264—285, mit vielen Literaturangaben), O. Beyer (Zs. d. Deutschen geol. Ges. 1911, 63, 429—467), P. Keßler (Geol. Rundschau 1913, 4., 413—423), E. Blanck (Tharandter Forstl. Jahrbuch 1922, 73., 38—60, 93—134) usw. In vielen derartigen Arbeiten wird aber noch von „arider Verwitterung“, von „Wüstenformen“ u. dgl. gesprochen. Das ist aber nicht folgerichtig. Worte wie „arid“ und „Wüste“ lassen uns sofort an das Klima denken. Jene Verwitterungserscheinungen im humiden Klima sind aber so von dem Gesteinsuntergrunde abhängig, daß die klimatische Einwirkung völlig zurücktritt. Das Klima darf in den Bezeichnungen nicht zum Ausdruck kommen.

gestein selbst, sein Gefüge oder seinen Lagerungsverband so beeinflußt sind, daß sie von den für das betreffende Gebiet allgemein gültigen abweichen¹⁾. Von dieser zunächst ganz allgemein gehaltenen Begriffsbestimmung aus können wir aus den verschiedensten Klimazonen der Erde vielfache Beispiele für edaphisch bedingte geologische Vorgänge und Erscheinungen aufzählen. Die edaphisch bedingten Vorgänge können uns sogar in dem einen Klima Erscheinungen vortäuschen, welche normalerweise nur in einem anderen Klima auftreten.

Die hier angeschnittene Frage ist nicht so nebensächlich, so selbstverständlich sie auch vielen zu sein scheint. Die morphologische Betrachtung der Formen an der Erdoberfläche hat uns von geographischer Seite Begriffsbestimmungen von Vorzeitformen und -erscheinungen, also der Vergangenheit, dann aber auch von Vorläufern eines herannahenden anderen Klimas gebracht. Manches davon ist vielleicht richtig. Aber viele, namentlich von der Geographie kommende Fachgenossen arbeiten viel zu gerne — manchmal geradezu leichtsinnig — mit dem Begriff der Vorzeitformen. Sowie der Geograph mit der Zeit arbeitet, dann muß er geologische Methoden anwenden und auch alle die Möglichkeiten erwägen, welche ihm Vorzeitformen oder Vorläufer vortäuschen können. Etwas Fremdartiges in sonst allgemein klimatisch bedingter Umgebung, ist noch lange nicht immer eine Vorzeitform aus vergangenem Klima oder ein Vorläufer eines herannahenden anderen Klimas. Sehr häufig, wenn nicht zumeist, sind diese Fremdformen und sonstige fremdartige Erscheinungen eben nur edaphisch bedingt und sind aus den Eigenschaften und der Lagerung des Untergrundgesteines zu erklären. Die chemische Verwitterung in ihrer Bedingtheit aus den mineralogischen, chemischen und strukturellen Verhältnissen des Untergrundes spielt dann bei der Herausarbeitung der Oberflächenformen eine erste Rolle. Morphologische Betrachtung der Erdoberfläche muß diese chemischen Vorgänge im Untergrunde geradezu in erster Linie beachten!

Das gilt ganz besonders für große Teile des Trockengebietes, im besonderen für die Wüste. Gerade die Oberflächenformen der Wüsten können ohne Kenntnis des Chemismus nicht nur der jungen Auflagerungen, sondern auch des tieferen Untergrundes nicht verstanden werden. Ich habe bei meinen eingehenden Untersuchungen in einer Wüste und in deren Randgebieten und dann bei Streifzügen durch andere Trockengebiete der Erde

¹⁾ E. Blanck kommt in der in Fußnote 1 auf S. 293 angegebenen Arbeit meiner Auffassung schon sehr nahe.

(Namib, Kalahari und andere Teile Südafrikas, Zentrales Spanien, Spanisch Marokko, Transkaukasien, Russisch Zentralasien) immer wieder feststellen können, wie gerade in den Trockengebieten die durch das Gestein, also edaphisch bedingten Vorgänge eine sehr große Rolle spielen. Daß diese edaphisch bedingten Erscheinungen gerade in den Trockengebieten so besonders hervortreten, liegt an der außerordentlichen Langsamkeit der gesamten dort sich abspielenden Vorgänge, worauf ich bereits hingewiesen habe¹⁾. Ich betonte auch, daß es innerhalb des Trockengebietes Südafrikas zwei verschiedene Zonen gebe, in welchen die edaphisch bedingten Erscheinungen so ganz besonders hervortreten, nämlich dort, wo die Auflagerungszone arider Gebiete in die reine Abtragungszone übergeht, im Westen gegen den trockensten Teil der Namib, im Osten gegen das normal aride Gebiet des westlichen Transvaal und ihm klimatisch gleichgestellte Zonen Südafrikas.

Ich glaube, daß man ähnliche Verhältnisse auch in anderen Trockengebieten wird feststellen können. Aber man muß dabei sehr vorsichtig sein. Ich lernte im letzten Jahre das Ferghana Becken Turkestans kennen. Dort haben wir auch eine starke Auflagerung, aber nicht die des ariden Gebietes selbst, sondern die von den niederschlagsreichen Randgebirgen ausgehende (vgl. S. 297). Die besprochene Grenze der nur durch das aride Klima selbst bedingten Aufschüttung ist nicht im Ferghanabecken oder an dessen Rande zu suchen. Die starke junge Sedimentation wird dort bedingt durch den übergreifenden Einfluß einer Klimazone in eine andere hinein²⁾. Wenn ich auch auf der Eisenbahnfahrt durch das südöstliche Rußland nach Turkestan nur Stichproben machen konnte, so glaubte ich doch an dem flach aus der ariden Aufschüttung hervorragenden Mugodshar-Gebirge (südlichster Ausläufer des Ural) sehen zu können, daß dort der edaphische Einfluß groß war, daß wir dort eine Parallele zu den südafrikanischen Verhältnissen haben.

Gerade diese Grenze von Aufschüttung und Abtragung in den Trockengebieten bedarf der ganz besonderen Beachtung. Wer die von mir in früheren Aufsätzen besprochene Anhäufung von edaphisch bedingten Vorgängen, Formen und anderen geologischen Erscheinungen nicht verfolgen kann, der kann auch eine sichere Trennung zwischen Vorzeitformen (-erscheinungen usw.), heutigen Arbeitsformen und Vorläufern nicht durchführen.

Eine eingehende kritische Überprüfung der so vielseitigen An-

¹⁾ Sitz.-Ber. B. Akad. d. Wissenschaften, Math.-Naturw. Abt., München 1928, S. 64.

²⁾ E. Kaiser, Trans. geol. Soc. of South Africa, Johannesburg 1927, 30., 126. Vgl. S. 297, 299 dieser Mitteilung.

gaben über Vorzeitformen wäre dringend notwendig. Dabei müssen der Untergrund und dessen chemische Umwandlung ganz besonders beachtet werden. Dann werden viele als Vorzeitformen, Fremdlinge oder Vorläufer bezeichnete Bildungen sich aus den besonderen Eigenschaften des Untergrundgesteines ableiten lassen. Deutung derartiger Erscheinungen nur vom rein äußeren morphologischen Bilde aus führt nicht zum Ziel. Daß aber auch schon von geographischer Seite die große Bedeutung der Erscheinungen, die hier als edaphisch bedingt bezeichnet sind, für die Trockengebiete besonders hervorgehoben ist, zeigt E. de Martonne¹⁾. Er weist darauf hin, daß die relativen Unterschiede, welche durch die Gesteinsart und deren Lagerung bedingt seien, in den Trockengebieten viel mehr hervorzutreten scheinen, als in den humiden Gebieten der Erde.

In diesem Zusammenhange muß ich auch besonders betonen, daß nur zu häufig der Wert der chemischen Untersuchung von gelegentlichen Aufsammlungen der Forschungsreisenden überschätzt wird, welche sich nicht selbst ein Urteil über die Wasserbewegung im Untergrunde und dem daraus hervorgehenden Chemismus der Umwandlungen an der Oberfläche und im Untergrunde haben bilden können. Nur zu oft wird eben gerade das gesammelt und nachher zur Analyse gegeben, was eben in dem bereisten Gebiete als ungewöhnlich besonders auffällt. Aber die für die chemische und physikalische Verwitterung des betreffenden Gebietes direkt kennzeichnenden Erscheinungen sind nur zum geringsten Teile oder gar nicht aufgesammelt und deshalb zumeist nicht analysiert worden. Das behindert heute noch in ganz enormem Maße die Erkenntnis der chemischen Vorgänge z. B. in der Wüste, was ich besonders merkte, wie ich die über diese vorliegenden Angaben zusammenfassend darstellen wollte. Der „Wüstenlack“ galt lange, gerade wegen seines auffallenden Auftretens in der Wüste als ein besonderes Charakteristikum derselben, ist es aber nicht, was auch G. Linck kürzlich besonders hervorgehoben hat, indem er zeigte, daß Schutzrinden sich unter ganz verschiedenen klimatischen Bedingungen bilden können²⁾. Ich komme darauf an späterer Stelle dieser Mitteilung noch zurück.

Die edaphisch bedingten Verwitterungsvorgänge mögen sicherlich

¹⁾ E. de Martonne, *Traité de Géographie Physique*, Tome II: Le Relief du Sol, Paris 1926, S. 951.

²⁾ *Chemie der Erde* 1928, 4., 67—69. Daß der „Wüstenlack“ einmal klimatisch, das andere Mal edaphisch bedingt und daß er keine typische Erscheinung für den trockensten Teil des ariden Gebietes, wenigstens nicht für die Namibwüste Südwestafrikas, sei, darauf habe ich bereits früher hingewiesen (Sitz.-Ber. Bayer. Akad. d. Wiss., Math.-naturw. Abt., München 1928, S. 50ff. sowie in: *Diamantenwüste*, 1926, II, 301—302).

bei der bodenkundlichen Betrachtung, bei welcher zunächst die allgemeinen, vorherrschenden Erscheinungen festzulegen sind, eine zunächst nebensächliche Rolle spielen. Der Geologe aber, welcher die Verwitterungserscheinungen als eine wesentliche Grundlage sedimentpetrogenetischer Darstellung zu untersuchen hat, muß sich unbedingt auch über die Unterschiede der Verwitterung an den Ausstrichen der nebeneinander lagernden Gesteine eingehend unterrichten. Auch für diejenigen, welche sich nur mit den Verwitterungserscheinungen in unserem humiden Klima beschäftigen, ist die edaphisch bedingte Verwitterung von besonderer Bedeutung. Neben den Sandsteinfelsen Mitteleuropas bieten z. B. die Karbonatgesteine des deutschen Mesozoikums, im Hochgebirge und im Karste der Mittelmeerländer reichliche Veranlassung, an die durch den Untergrund beeinflusste oder bedingte Verwitterung zu denken. Auch viele andere Beispiele ließen sich noch aufführen. Es ist jedoch hier nicht der Ort, auf alle diese Erscheinungen einzugehen.

Ich sprach vorher nicht nur von Verwitterungs- und morphologischen Erscheinungen, sondern wies bereits darauf hin, daß auch die Sedimentation in diesem Zusammenhange zu beachten sei. Selbstverständlich war dabei zunächst nur an die terrestre Sedimentation gedacht, wenngleich wir die Ergebnisse der hier nur zu streifenden Frage bereits auch auf die marine Sedimentation übertragen können. Die terrestre Sedimentbildung in einem bestimmten Klimareiche ist bedingt nicht allein durch die Verwitterungsvorgänge in diesem selbst, sondern unter Umständen auch durch diejenigen, welche sich in einem anderen, benachbarten Klimareiche abspielen. Ich habe bereits klimatisch übergreifende Vorgänge („overlapping influences“) und davon abhängige übergreifende Erscheinungen an anderer Stelle besprochen¹⁾. Wenn ich auch hier nicht eingehend diese für die terrigene Sedimentation äußerst wichtige Frage besprechen kann, so seien doch einige Beispiele herangezogen.

Zunächst ist die Entstehung eines Teiles der Oasen edaphisch bedingt durch die Wasserbewegung in einem besonderen Gesteine und damit abhängig von dem Gefüge und der Lagerung des Untergrundgesteines. Ein anderer Teil der Oasen ist abhängig von Vorgängen, welche aus dem humiden oder nivalen Klimareiche in das aride hinübergreifen. Das sah ich vor kurzem ganz besonders schön in dem Ferghanabecken Turkestans²⁾. Nach dem herrschenden Klima sollte

¹⁾ Transact. Geol. Soc. South Africa, Johannesburg 1927, 30., 126.

²⁾ Die Untersuchungen in Turkestan nach dieser Richtung hin habe ich infolge einer Unterstützung seitens der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft durchführen können, wofür ich auch an dieser Stelle meinen besonderen Dank ausspreche.

hier keine Ackerkultur möglich sein. Aber trotzdem wirft dies Gebiet, mit ausgesprochenem Trockenklima fast extremster Art, reiche Erträge selbst an Baumwolle, Reis und Obst ab. Die intensive landwirtschaftliche Kultivierung jenes Landes ist nur eine Folge davon, daß aus der niederschlagsreichen Klimazone der umrahmenden Hochgebirge viele Flüsse einströmen und für die Kultivierung des normal bis extrem ariden Gebietes nutzbar gemacht werden können. Die Fruchtbarkeit des Ferghanabeckens ist aber andererseits dadurch bedingt, daß durch den Abfluß aus den niederschlagsreichen Randgebirgen große flache Schuttkegel in das Ferghanabecken vorgeschoben sind. Die in diesen Schuttkegeln auftretenden Sedimente zeigen eine innige Mischung der Verwitterungsprodukte humiden und ariden Klimas. Die Aufschüttungen in diesen großen, flach geböschten, weit in das Ferghanabecken vordringende Schuttkegeln enthalten deshalb neben rein sandigen Komponenten geringer chemischer, starker physikalischer Verwitterung, eben der ariden Verwitterung in den niedrigen Randketten, auch die intensiv chemisch verwitterten Abschwemmungsprodukte aus dem niederschlagsreichen Hochgebirge.

Damit hängt dann auch zusammen, daß wir in den nicht bewässerten, die normale, klimatisch bedingte Oberflächenformen zeigenden, rein wüstenhaften Teilen des zentralen Ferghanabeckens die verschiedenartigen Formen von Fels-, Stein-, Geröll-, Sand- und Lehmwüste dicht nebeneinander sehen. Die Mischung von Verwitterungsprodukten ariden und humiden Klimas in den bewässerten Teilen des Ferghanabeckens begünstigt die Fruchtbarkeit ganz ungemein. Es ist das eine Folge der Mischung rein physikalisch zerfallener Gesteinsbestandteile, der Bildung von noch verwitterbaren, nährstoffreichen, nur zermahlene Gesteinskomponenten, mit denen eines weitgehenden chemischen Zerfalls, der Bildung von kolloiden Resttonen. Neben den Verwitterungssalze absorbierenden kolloiden Resttonen sind reichlich langsam erst Pflanzennährstoffe abgebende, unverwitterte Mineralien in diesen Schuttkegelabsätzen vorhanden.

Das ist eine besondere Erscheinung des Hinübergreifens der Verwitterungs- und damit auch der Sedimentationerscheinungen, die sich auch morphologisch ausdrückt, aus einem Klimareiche in ein anderes. Ähnliches ist auch aus älteren Formationen zu verzeichnen. Wie heute durch Vorgänge in niederschlagsreichen Zonen Oasen in eine andere niederschlagsärmere Klimazone vorgeschoben werden, so war das auch in der geologischen Vorzeit der Fall. Sie bedingen dann das Auftreten von Tier- und Pflanzenresten des humiden Klimas in einem Gebiete, welches doch an und für sich als arid angesprochen werden müßte¹⁾. In die paläogeographische Darstellung kommen zu leicht

¹⁾ Vgl. hierzu auch Centralblatt für Mineralogie usw., 1929, B. S. 11.

Fehler, wenn man aus den durch die übergreifenden Einflüsse bedingten Fossilresten nun das Klima des ganzen Gesteinskomplexes erschließen will!

Die Deckenschotter und Sande, welche vor dem abschmelzenden Eis abgelagert sind, werden beeinflußt durch Vorgänge im nivalen Klimareiche. Man kann die periglazialen Bildungen auch in ähnlichem Sinne als übergreifende Erscheinungen auffassen.

Wenn ich hier die Sedimentation in ihrer Beeinflussung von einem Klimareiche in das andere so besonders hervorgehoben habe, so geschah dies deshalb, weil sich hierin die übergreifenden Vorgänge („overlapping influences“) so deutlich zu erkennen geben. Es lassen sich zu den angeführten Beispielen noch weitere zufügen, welche zeigen würden, wie sich die geologisch wichtigen Vorgänge des einen Klimareiches auch noch in dem anderen benachbarten Klimareiche durch von der normalen Sedimentation abweichende Erscheinungen und Vorgänge wie durch besondere morphologische Formen bemerkbar machen.

Diese übergreifenden Vorgänge, sicherlich klimatischer Art, kommen auch für die Verwitterungserscheinungen in Frage. Nicht nur in der Nähe der Grenze des einen Klimareiches gegenüber dem anderen, sondern oft weit in das benachbarte Klimareich hinein machen sich die übergreifenden Vorgänge bemerkbar. Besonders die Zone eines Wechselklimas, in welcher sich jährlich eine Verschiebung der Klimazonen abspielt, muß zunächst bald die Verwitterung der einen, bald der anderen Klimazone vorherrschend zeigen. Gerade hier ist dann der Einfluß des Gesteinsuntergrundes vorherrschend. Die edaphischen Einflüsse herrschen in dieser Zone wechselnder klimatischer Beeinflussung besonders vor¹⁾. Aber darüber hinaus greifen sicherlich Verwitterungserscheinungen der einen Klimazone in die andere über. Die sogenannte periglaziale Verwitterung mag schon hierhin gehören. Wenn wir dann örtlich, an besondere Gesteine gebunden, in dem ariden Klimareiche eine tiefgründige Verwitterung beobachten, dann kann man darüber streiten, ob dies eine Erscheinung übergreifender klimatischer Einwirkung oder ob sie edaphisch bedingt sei. Wir können heute noch nicht alle diese übergreifenden Vorgänge in bezug auf Verwitterungserscheinungen übersehen. Wir können diesen Nachweis aber schon deduktiv voraussehen. Ich möchte sogar annehmen, daß vieles, was von geographisch-morphologischer Seite als „Vorläufer“ aufgefaßt wird, viel besser von diesem Gesichtspunkte aus erklärbar ist.

¹⁾ Ich werde dies demnächst an Beispielen aus Südafrika besonders erläutern.

II. Rauchgasverwitterung der Bausteine im allgemeinen.

Die Verwitterung der aus Natursteinen errichteten Bauten ist auf die in der normalen Atmosphäre enthaltenen oder die in sie durch besondere natürliche oder menschliche Einwirkung zugeführten Gase und Salze zurückgeführt worden. Im Anschluß an meine schon erwähnte erste Arbeit haben nun viele Bearbeiter der Frage mit mir immer wieder darauf hingewiesen, daß die durch den Menschen namentlich der Großstadtatmosphäre zugeführte schweflige Säure die intensive Verwitterung des betreffenden Bauwerkes hervorgerufen habe. Die meisten Untersucher fahnden leider immer nur nach den neugebildeten Sulfaten in den verwitterten Teilen des untersuchten Bauwerkes. Leider nur zuweilen wird auf die Bedeutung der Kohlensäure hingewiesen¹⁾. Die Bedeutung der Chloride und Nitrate wird kaum hervorgehoben, trotzdem für erstere schon ältere Literaturangaben und für letztere manche Angaben von der Technik her vorliegen.

Andere Untersucher wollen alle Schädigungen aus dem Gestein selbst herleiten. Wenn Sulfide in irgendeiner Form im Gesteine primär auch nur in feinsten Verteilung oder als seltener Bestandteil nachgewiesen sind, dann wird die Verwitterung der betreffenden Bausteine nur aus diesen Sulfiden hergeleitet. Aber ob die Sulfide über einen in der Gesteinsquader örtlich eng begrenzten Wirkungskreis hinaus eine so intensive Zerstörung herbeiführen können, das wird nicht untersucht. Daß im Gesteine bereits primär vorhandene Sulfide (Eisenkies in erster Linie) bei der Verwendung desselben am Bauwerke dessen Verwitterung beeinflussen, sei nicht bestritten. Aber es muß bestritten werden, daß in allen Fällen, wo die Verwitterung der Bausteine aus den Gesteinen abgeleitet wird (Beispiel: Dresdener Zwinger, Arbeit Fischer 1927), nun die Verwitterung nur bedingt sei durch die Zusammensetzung des Gesteines. Die Menge der Sulfide im primären Gesteine dürfte zumeist nicht ausreichen, um die Intensität der äußeren Verwitterung zu erklären. Denn die Verwitterung ergreift zumeist doch nur äußere Randpartien. Gesteine, welche so viele primäre Sulfide in einem Rindenteile enthalten, daß dadurch eine tiefgreifende äußere Verwitterung eintreten könnte, sollte man doch wohl von vornherein nicht benutzt haben. Solche eisenkiesreichen Gesteine dürften auch bei der normalen Verwitterung in der Natur starke Zermürbung zeigen, daß man in ihnen keinen größeren Bruchbetrieb angesetzt haben wird. Das Vorhandensein von Eisenkies in den frischen Bruchgesteinen ist kein Beweis dafür, daß in

¹⁾ Z. B. bei E. Blanck und A. Rieser, Über Verwitterungserscheinungen am Bremer Rathause (Chemie der Erde, 4., 1928, 137—144). (Vgl. auch S. 308 meiner Ausführungen.)

dem verwitterten Bauwerke nachgewiesene Sulfate nicht aus der Atmosphäre stammen. Denn es sind zu viele Bausteine, die primär sulfidfrei sind, der Rauchgasverwitterung in Groß-, Mittel- und selbst schon in den Kleinstädten unter Zuführung des Schwefels aus der Luft unterlegen, daß es sehr verwunderlich sein würde, wenn am Dresdener Zwinger keine Zufuhr aus der Großstadtluft stattgefunden hätte. Die Grünsandsteine der Regensburger Umgebung zeigen in ihrer Verwitterung als Bausteine an den Domen zu Passau und Regensburg eigenartige Brauneisenringe, daß hier sehr wohl eine Sulfidverwitterung vorliegen kann. Ich muß aber nach meinen Untersuchungen an diesen verwitterten Bausteinen sehr bezweifeln, daß hier die neugebildeten Sulfate nur aus dieser Sulfidverwitterung herrühren.

Hie und da fehlt es auch bei den Beurteilern meiner ersten Mitteilungen über die Bedeutung der schwefligen Säure auch nicht an einer scharfen Kritik. Sie meinen, daß die schweflige Säure der Luft keine große Bedeutung haben könne. Sie meinen, daß die Befürchtungen übertrieben seien, oder daß eben nur die Auswahl der Gesteine daran Schuld sei. Sie schieben im letzteren Falle die Verantwortung auf diejenigen, welche das Material ausgewählt hätten. Man liest auch davon, daß es der notwendigen petrographisch-geologischen Beratung speziell am Kölner Dom ermangelt hätte, und daß die Dombauverwaltung wegen Verwendung unrichtigen Gesteinsmaterials anzuklagen sei. Nach meiner Kenntnis aus den mir vorgelegten Aktenauszügen kann ich nur bestätigen, was der verstorbene Dombaumeister in Köln, Geheimer Oberbaurat Hertel, dem ich vielerlei Anregungen für die Beobachtung von Verwitterungserscheinungen an Bausteinen verdanke, gesagt und gedruckt hatte, daß in allen verschiedenen Bauperioden des vergangenen Jahrhunderts immer wieder petrographisch-geologisch geschulte Fachvertreter zu Rate gezogen sind von Nöggerath über von Dechen und von Lasaulx bis in die neuere Zeit hin. Neuere Untersuchungen am Dome zu Passau weisen darauf hin, daß selbst die Baumeister der Barockzeit bereits Betrachtungen über die Haltbarkeit von Sandsteinen und Kalken angestellt haben. —

Gesteine, die um 1860, 1870 oder noch späterhin als völlig einwandfrei für die Großstadt galten und von hervorragenden Fachvertretern empfohlen wurden, sind es heute auch schon für manche Mittel- und Kleinstädte längst nicht mehr. Woran liegt das? In dem Falle des Kölner Domes wird auf den nahen Hauptbahnhof, von anderen auf die den Dom umgebenden Hotels mit ihren großen Zentralheizungen hingewiesen, deren Kohlenverbrauch zu einer starken Anreicherung der Luft an schwefliger Säure führe. Wir kommen der Wahrheit

wohl viel näher, wenn wir darauf hinweisen, daß der Kohlenverbrauch in den letzten Dezennien in Groß-, Mittel- und Kleinstädten ganz intensiv gestiegen ist, und daß man an vielen Orten in jüngerer Zeit von der Holz- zur Kohlenfeuerung überging. „Wir können eben nicht mehr so frieren, wie unsere Großväter“, sagte ich oft. Nicht nur die Industrie, sondern auch die Verfeinerung unserer Wohnungskultur führt zu den in der letzten Zeit immer mehr hervortretenden Schädigungen an unseren Monumentalbauten. Diese Schädigung wird weiter fortschreiten, je mehr wir überall Zentralheizungen haben wollen. So wird die Einwirkung der Rauchgase voranschreiten und andere, später zu besprechende Einwirkungen überdecken, welche nicht von den Rauchgasen abhängig sind. Diese Voraussage ist namentlich in der heutigen Zeit drückend, in welcher wir zumeist nicht einmal die einfacheren Schäden ausbessern können.

Aber bleiben wir bei den heutigen Verwitterungsschäden. Die einen stimmen der Bedeutung der Rauchgasverwitterung zu. Andere meinen, daß die Bedeutung der Gesteinseigenschaften die größere sei. Beide Kritiker haben recht und auch unrecht! Man darf die Beobachtungen in Köln nicht ohne weiteres auf andere Städte übertragen. Man darf aber auch die Einflüsse aus dem Gestein selbst nicht vernachlässigen, sie aber auch nicht überschätzen. Den meisten, welche gegen meine Auffassung sich ausgesprochen haben, kann ich nur sagen, daß sie ihre Schlußfolgerungen übertrieben haben. Auf einige Äußerungen nach dieser Richtung hin komme ich noch zurück.

Wie in der Natur ist die Verwitterung der Naturbausteine an unseren Monumentalbauten zunächst abhängig von den in der Atmosphäre natürlich enthaltenen Gasen. Die von der normalen Luft abhängige Verwitterung wird eingehend von der Bodenlehre untersucht. Diese handelt aber auch schon von den Vorgängen, welche durch die klimatische Exposition und durch das Gestein des Untergrundes bedingt sind, von denen, welches ich vorher als „edaphisch bedingt“ bezeichnete. Die Betrachtung der Bausteinverwitterung verlangt aber in noch erhöhtem Maße, die örtlichen Verhältnisse gegenüber Hauptniederschlags- und Hauptwindrichtung, die Einwirkung der durch den Menschen veränderten atmosphärischen Verhältnisse, namentlich in den Großstädten, aber auch ganz vornehmlich das Gestein selbst zu betrachten.

Die Verwitterung der Bausteine ist oft von Ort zu Ort verschieden!

III. Die Wasserbewegung in den Quadern eines Bauwerkes.

Wir können an unseren Bausteinen die durch das Gestein, seine Lagerung, d. h. den Verband im Bauwerke, also die durch den Unter-

grund bedingte Verwitterung meist viel besser studieren, als in der freien Natur unserer Gegenden. Die Wasserbewegung in einem größeren Bauwerke ist zunächst durch die Lagerung der einzelnen Quadern, deren Größe, den Verband mehrerer miteinander und dann durch deren Gesteinsmaterial, namentlich seine Körnung bedingt. Alles in eine Quader eindringende Niederschlagswasser, nicht nur des Regens, tritt in derselben Quader wieder an die Außenfläche zurück¹⁾.

Nur in besonderen Fällen tritt ein Teil des in eine Quader eindringenden Niederschlages in die benachbarte Quader über. Wenn ein Bau so errichtet ist, daß alles in die oberen Teile eindringende Wasser innerhalb des Bauwerkes absinkt, dann ist das Bauwerk in den unteren Teilen, innen und außen, so feucht, daß es unbenutzbar ist. Wir haben also in den aus Natursteinen errichteten Bauwerken den Fall, den wir für die Trockengebiete der Erde als kennzeichnend feststellen: Der in die einzelne Quader eindringende Niederschlag dringt in diese ein, kommt wieder an die Außenfläche und verdunstet an dieser²⁾. Haben wir eine Quader vor uns, welche nach allen Seiten frei steht, z. B. in einer Fiale, in einer Säule, in einem Strebebogen usw., so kann natürlich das eindringende Wasser quer durch die ganze Quader hindurchwandern. Es lassen sich sogar dafür Beispiele beibringen, daß die Verdunstung des auf der dem Regen besonders ausgesetzten Seite eindringenden Wassers auf der entgegengesetzten Seite erfolgt, und daß dort die intensivste chemische Verwitterung einsetzt. Das wäre Wanderung des Niederschlages quer durch eine einzelne Quader hindurch. Derartige Fälle sind im allgemeinen aber nur an allseitig freistehenden Quadern zu beobachten.

Halten wir fest, daß im allgemeinen im normal errichteten Bau ein Übertritt des in eine Quader eindringenden Wassers in die benachbarte und die darunterliegende nicht eintritt.

¹⁾ Absichtlich wird hier von den Fällen abgesehen, in welchen man künstlich das Wassereindringen zu verhindern sucht. Für die rein geologische Betrachtung kommen die Ergebnisse der Anwendung verschiedener Imprägnierungsmittel, von Anstrichen, von Wachsüberzügen u. dgl. zunächst noch nicht in Frage. Es ist möglich, daß derartige Überzüge mit den Krustenbildungen der Trockengebiete verglichen werden können, unter denen allerdings intensivster Zerfall des Gesteins fortschreiten kann. Damit soll aber kein endgültiges Urteil über die verschiedenen Steinerhaltungsmittel ausgesprochen werden. Für denjenigen, welcher diese Hilfsmittel noch nicht näher kennt, sei aber gesagt, daß nach dem heutigen Stande der Untersuchungen noch größte Vorsicht geboten ist. Vielleicht läßt sich demnächst mehr darüber berichten.

²⁾ Wir sehen hier selbstverständlich von den Fällen ab, in denen durch falsche Errichtung des Bauwerkes an einer Stelle eine ganz intensive Durchfeuchtung, z. B. durch Stagnieren des Wassers auf falsch abgedeckten Platten, eintritt, oder in denen durch falsche Verfüzung der Übertritt aus den höheren Quadern in die tieferen eintritt.

Die Menge des in die einzelne Quader eindringenden Wassers ist selbst bei einem starken Schlagregen äußerst gering. J. Hirschwald¹⁾ hat aus einem Bauwerke Proben entnommen und gezeigt, daß selbst poröse Gesteine nach längeren Herbstniederschlägen nur geringe Mengen Wasser aufgenommen haben. Die gleichen getrockneten Sandsteine nahmen beim Eintauchen in Wasser die 28 bis 34fache Wassermenge auf. Bei dichteren Gesteinen (z. B. einem Granit) war die vom Regen dem Gestein zugeführte Wassermenge etwa $\frac{1}{80}$ der Menge, die durch Eintauchen in Wasser dem Gestein zugeführt werden konnte. Wenn der Regen nur wenig Wasser in die einzelnen Gesteine übertreten läßt, so beruht dies darauf, daß bei den zumeist doch feinkörnigen, seltener grobkörnigen und nur in Ausnahmefällen grobporigen Gesteinen der erste Regen die oberste Gesteinschicht mit Wasser durchfeuchtet. Das rasche Eindringen des Wassers wird bei den meisten Gesteinen durch die Kapillarwirkung behindert. Der Regen hört meist auf, ehe das eingedrungene Wasser eine tiefere Schicht erreicht. Das eingedrungene Wasser wandert aber nach dem Aufhören des Regens noch weiter in dem Gesteine, zunächst noch einwärts, dann auswärts.

Viel wichtiger für das Eindringen von Feuchtigkeit in die tieferen Zonen der einzelnen Gesteinsquader ist die häufige Wiederholung des Niederschlages. Wenn die Feuchtigkeitsverhältnisse der Luft ein Wiederaufsteigen des eingedrungenen Niederschlages und dessen Verdunstung an der Oberfläche behindern, dann erst sind die Bedingungen für eine intensive Durchfeuchtung des betreffenden Bauwerkes gegeben. In dieser Richtung wirken die ja in unserem Klima nicht so seltenen, rasch aufeinanderfolgenden Niederschläge. Noch mehr aber wirken die für unsere Großstädte so charakteristischen Nebeltage. An diesen wird, durch die Temperaturen bedingt, fast alltäglich eine gewisse Menge von Feuchtigkeit auf den Bauwerken kondensiert, die dann zumeist im Verlaufe desselben Tages wieder verdunstet. Die im Einzelfalle nur äußerst geringe Wassermenge dringt eine gewisse Strecke ein. Aber auch oft, ehe sie völlig wieder an die Oberfläche gestiegen ist, tritt eine nächste Befeuchtung durch den Nebel ein. Die eindringende Wassermenge wird verstärkt²⁾.

¹⁾ J. Hirschwald, Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit, Berlin 1908, 208—217. (Die Wasseraufnahme der Bausteine unter der Einwirkung der meteorischen Niederschläge.)

²⁾ Durch die experimentellen Untersuchungen von Hirschwald haben wir zweifellos mancherlei Angaben über das Eindringen von Feuchtigkeit in die Bausteine erlangt. Damit ist aber noch kein Material für die Beantwortung der Frage gegeben, wie tief nun die Verwitterungsvorgänge in den Baustein eindringen. Das kann nur auf dem Wege geschehen, daß man das Auftreten von Verwitterungssalzen quer durch die Quadern hindurch verfolgt. Eine erste

Dazu kommt dann noch, daß gerade der über die Großstädte fast ständig ausgebreitete Nebel ein Entweichen der von der Kohlenverbrennung herrührenden Rauchgase verhindert.

Die Bewegung der eindringenden Niederschläge und der in ihnen gelösten Gase und Salze ist von Ort zu Ort wie von Gestein zu Gestein verschieden. Sandsteine müssen sich anders verhalten als Kalke. Auch die Eruptivgesteine, die wir ja nicht selten an Bauten verwendet finden, zeigen eine verschiedenartige Verwitterung, je nach Struktur wie mineralischer Zusammensetzung.

Es sei aber endlich auch schon an dieser Stelle betont, was später näher auszuführen ist, daß für etliche Gesteine so besonders für Karbonatgesteine, die Absorption der in der Atmosphäre unter Umständen nur in geringen Mengen vorhandenen Gase eine ganz besondere Rolle spielt. Damit kommt es zur Bildung verhältnismäßig sehr konzentrierter Lösungen und zu einem energischen Angriff auf das Gestein. Das gilt für Vorgänge in der Natur wie für die Bauten in unseren Städten. Ich glaube, daß die selektive Absorptionsfähigkeit der Gesteine für einzelne Gase sich bei weitergehenden Untersuchungen zusammen mit der Durchfeuchtung durch Nebel als die Hauptursachen der Rauchgasverwitterung herausstellen wird. Eine Verfolgung der damit angedeuteten Fragen der Bausteinverwitterung wird zweifellos auch für die Erklärung von Verwitterungserscheinungen in der Natur wesentliche Fortschritte bedingen.

IV. Die Verwitterung der Bausteine ist edaphisch bedingt.

Ich verglich früher die eigenartigen Verwitterungserscheinungen an den mitteleuropäischen Bauwerken, z. B. am Kölner Dom, mit den Verwitterungserscheinungen im ariden Klima, welcher Vergleich auch von anderen Forschern wiederholt wurde. Ich bezeichnete damals — wie ich heute zugeben muß, irrtümlich — jene Verwitterungserscheinungen als „Oasen ariden Klimas innerhalb eines Gebietes humiden Klimas“. Ich sprach später von „Inseln ariden Klimas im humiden“ oder von „Inseln fremdartiger Vorgänge in einem bestimmten Klima“ und betrachte sie jetzt — wohl richtiger — als zumeist rein edaphisch, eben durch die Wasserbewegung in der einzelnen Gesteinsquader, bedingte Erscheinungen. Das Klima ist am Bauwerke der Großstadt nicht gegenüber der dicht benachbarten freien Natur verändert. Bestandteile der unveränderten Luft leiten schon

Untersuchung nach dieser Richtung habe ich auf S. 314ff. behandelt. Es wäre sehr wünschenswert, daß noch an mehr Beispielen — für andere Bauten und andere Gesteine — ähnliche Untersuchungen angestellt und auch noch nach anderen Richtungen durchgeführt würden. Daraus sind sicherlich auch weitere Schlußfolgerungen inbezug auf die Verwitterung in der Natur zu ziehen.

an dem Bausteine Vorgänge ein, welche wir in der oft nahe benachbarten freien Natur nicht wahrnehmen (z. B. CO₂-Wirkung). Aber weiter können durch natürliche Vorgänge (Meeresküsten, Nähe der Vulkane) oder durch den Menschen (Hüttenwerke, Großstädte) der Luft Bestandteile beigemischt sein, welche eine Abweichung der Verwitterungserscheinungen von den in der freien Natur bedingen. Dann können, wie ich bereits im ersten Abschnitte dieser Zusammenfassung ausführte (S. 293/4), Verwitterungserscheinungen eines anderen Klimas nur vorgetäuscht werden.

Edaphische Vorgänge der Wasserbewegung in dem Bauwerke, aber auch in freistehenden Felsen, auch an breiten Ausstrichen von mächtigeren Sandsteinbänken usw. sind es, welche sowohl in der freien Natur wie an unseren Monumentalbauten zu einer Änderung der normalen Verwitterung führen. „Inseln ariden Klimas im humiden“ kann es selbstverständlich nicht geben¹⁾. Aber die Erscheinungen der Verwitterung unter Einfluß ariden Klimas können sich auch im humiden Klima zeigen. Es ist vor allem die von der Umgebung abweichende Wasserbewegung, welche eine solche Änderung der Verwitterungserscheinungen hervorruft. Umgekehrt aber gibt es auch im ariden Klima Verwitterungserscheinungen, welche denen humiden Klimas gleich oder ähnlich sind. Wenn wir einmal später die verschiedenen Klimazonen eines Klimareiches besser miteinander vergleichen können, dann werden wir noch viele weitere Konvergenzerscheinungen der Verwitterung in den verschiedenen Klimazonen und Klimareichen feststellen. Ich möchte folgendes besonders betonen: Bei dem heutigen Stande unserer Kenntnisse ist es noch nicht zu übersehen, ob wir bei den immerwieder hervortretenden Konvergenzerscheinungen unter verschiedenen Klimaten und bei den sicher sehr häufig edaphisch bedingten Verwitterungserscheinungen die für die einzelne Klimazone normale, charakteristische Verwitterung wirklich richtig kennen. Mancherlei Widersprüche sind sogar in den bodenkundlichen Darstellungen über die Bedeutung der einzelnen Klimazonen vorhanden. Noch mehr tritt das in den geologischen Darstellungen hervor, in welchen eine Trennung der klimatisch von den edaphisch bedingten Vorgängen und Verwitterungserscheinungen dringend erforderlich ist. Ein tieferes Eindringen in die hier angedeuteten Fragen wird auch zweifellos dazu führen, diese oder jene, bisher als fossil bezeichnete Verwitterungserscheinung von den heutigen klimatischen Verhältnissen abzuleiten.

Jedenfalls aber wollen wir von diesen Gesichtspunkten aus nicht mehr von „Inseln ariden Klimas im humiden“ usw. sprechen, sondern

¹⁾ Vgl. hierzu Anm. 1 auf S. 293.

die fremdartigen Erscheinungen vorsichtiger zu deuten suchen, in unserem besonderen Falle die durch die Wasserbewegung und Verdunstung in der einzelnen Quader beeinflusste Verwitterung als edaphisch bedingt erklären.

Wir können auch nach einer Anregung von Herrn Privatdozent Dr. M. Storz den Sachverhalt so ausdrücken: Die Bauwerke bilden im Landschaftsbilde ein morphologisches Extrem und sind daher einer anderen Durchfeuchtung, Durchlüftung und Austrocknung ausgesetzt als die Gesteine der freien Natur in der Umgebung. Freistehende Felsen können für die Wasserbewegung und Verwitterung ähnliche Extreme bilden und damit eine ähnliche Verwitterung wie die Bauwerke zeigen. Aber alle Übergänge sind in der Natur von diesen morphologischen Extremen, mit ihrer edaphisch bedingten Verwitterung, bis zu den Gesteinsausstrichen vorhanden, an welchen die klimatisch bedingte Wasserbewegung, Verwitterung und Formgestaltung ein Eingehen auf die besonderen Einzelheiten des Untergrundgesteins nicht mehr anzeigen. Im ersteren Falle, am extremsten bei unseren Bauten, drücken die edaphisch bedingten Vorgänge die klimatisch bedingten völlig zurück. Im letzteren Falle sind die klimatisch bedingten Vorgänge so vorwaltend, daß von den edaphisch bedingten Vorgängen nichts mehr zu erkennen ist.

V. Die chemische Verwitterung der Bausteine im allgemeinen.

Die chemische Verwitterung der Bausteine ist einmal bedingt durch die normale, vom Klima des Gebietes abhängige Verwitterung. Die stärkere Konzentration der Kohlensäure in dem Niederschlagswasser gegenüber der Luft spielt dabei eine besondere Rolle. Es bilden sich dabei in den Bausteinen ähnliche Verwitterungsprodukte wie in der Umgebung der Städte. Die von der freien Natur abweichende Wasserbewegung in den Bausteinen führt zu einer Anhäufung vieler Verwitterungssalze an der Oberfläche der Bausteine und dicht darunter, während in der freien Natur humiden Klimas die gebildeten löslichen Verwitterungssalze größtenteils fortgeführt werden. Eine meist dünne Verkrustung oder Rindenbildung durch Karbonate (Bikarbonate) auf den Bausteinen ist die Hauptfolge der normalen Verwitterung. Diese Rindenbildung auf der Oberfläche macht sich namentlich am glatten Mauerwerk mancher Bauwerke streifenartig, dem Abflusse des Regenwassers auf der Außenfläche des Bauwerkes entsprechend, bemerkbar. Abfließendes, verdunstendes Wasser, das in den oberen Teilen des Bauwerkes gelöst hatte, setzt die gelösten Salze in den tieferen Teilen als Kalksinter wieder ab. Beispiele geben die neueren Bauten aus Muschelkalk, aber auch aus

anderen Kalksteinen. Dieser Kalksinterabsatz zeigt sich nicht nur in den Großstädten, sondern auch an Orten, wo von einer besonderen Rauchgaswirkung nicht die Rede sein kann, so daß diese Erscheinung wohl fast ganz auf die normale Verwitterung zurückzuführen ist. Die dicksten Rinden dieser Art habe ich in Venedig an den aus istrischen Kreidekalken errichteten Bauten gesehen.

Im Gestein primär enthaltene lösliche Salze und durch das Wasser angreifbare Substanzen können das Bild der normalen Verwitterung verändern. Die Verfärbung der Naturbausteine am Bauwerke ist so zum Teil einer Wanderung des Eisens und Mangans zuzuschreiben. Im Gestein vorhandene primäre Sulfide können unter dem Einfluß der Feuchtigkeit und Luft zur Bildung von Sulfaten führen. Die Entscheidung darüber, wie weit die Zerstörung der Bausteine durch Sulfatausscheidung auf diese Verwitterung der primären Bestandteile oder auf die Rauchgaseinwirkung zurückzuführen sei, ist schwer zu fällen. Bei der Intensität der letzteren in vielen Großstädten ist es wahrscheinlicher, daß nicht die normale, sondern die Rauchgaseinwirkung die größere Bedeutung hat (vgl. auch S. 300/301).

Damit kommen wir dann zu den Fällen, bei welchen die Verwitterung der Bausteine bedingt oder mehr oder weniger stark beeinflusst ist durch die in die Atmosphäre gelangenden Rauchgase. Die wichtigsten sind CO_2 und SO_2 . Die Kohlensäure verstärkt die vorher erwähnten Vorgänge der normalen Verwitterung. Die Karbonatkrusten, auch leichter löslichere Bikarbonate unter einer verhärteten Außenrinde oder Schale sind die Folge. Auf das Auftreten von Karbonaten machte ich bereits 1907 und 1915 aufmerksam. E. Blanck und A. Rieser wiesen kürzlich in der angegebenen Arbeit erneut mit folgenden Worten darauf hin: „. . . sondern daß auch eine Karbonatbildung entweder als Folge gewöhnlicher atmosphärischer Verhältnisse oder als Ausfluß der durch die Verbrennungsgase der Großstädte stark mit Kohlensäure angereicherten Luft stattgefunden hat“. Schmöle (1926) hat auf die Bedeutung von Bikarbonatneubildungen hingewiesen.

Auf die Bedeutung der schwefligen Säure für die Erhaltung bzw. Schädigung vieler Bausteine ist nunmehr vielfach hingewiesen worden. Ehe ich aber die schädigende Wirkung derselben bespreche, möge auf eine bis zu einem gewissen Grade schützende Wirkung von SO_2 hingewiesen werden. Quadern von dichten Kalksteinen sind nach wenigen Wochen schon von einer schwachen Rinde überzogen, die sich allmählich verstärkt und einen nicht zu stark porösen Kalk völlig schließt. Sie ist am besten entwickelt an älteren Bauwerken, sofern sie der Schlagregen nicht wieder entfernt hat. Diese Rinde in Groß-

städten enthält reichlich Calciumsulfit CaSO_3^1), hervorgerufen durch die Absorption der aus Rauchgasen herrührenden SO_2 an der Oberfläche der Kalke. Daneben bildet sich auch Calciumsulfat (wohl meist als Gips), das leichter löslich ist, fortgewaschen wird oder in das Gestein eindiffundiert. Die feineren Poren werden gedichtet. Die Wandungen größerer Poren werden von der gleichen Rinde überzogen. Diese Rindenbildung zieht auch über alle Hervorragungen hinweg. Fühlt man darüber hin, so meint man, daß das Gestein mit einer Politur überzogen worden wäre. Am deutlichsten ist sie an den vor dem Schlagregen geschützten Stellen der Bauwerke. Der Regen wäscht sie immer wieder ab, aber sie bildet sich bald nach dem Aufhören des Niederschlags von neuem. Diese Rinden bilden sich ganz besonders, erfahrungsgemäß, auf sehr wetterbeständigen Kalken²). Rinden — Calciumsulfit führend oder anderer Beschaffenheit — bilden sich an den gleichen Kalken auch im Laboratorium und in einer an Rauchgas armen Atmosphäre. Daß sich auch Sandsteine am Bauwerke mit einer Haut überziehen, ist sicher, auch wenn wir von dem zunächst mechanisch anhaftenden und später mehr und mehr ansinternden Großstadtruß absehen. Gelang in etlichen Fällen der Nachweis von Calciumsulfit, so dürften in den vielen anderen Fällen noch mancherlei anders zusammengesetzte Substanzen rindenbildend auftreten. Eine weitere Untersuchung dieser Rinden, die auch wieder mit dem Wüstenlack verglichen werden müssen, wäre sehr zu begrüßen. Man müßte dann aber beachten, daß man eine

¹) Ich machte auf die Erscheinung 1910 aufmerksam (Lit. am Schlusse der Mitteilung). Untersuchungen darüber, ob nur das Anhydrid oder welche Hydratstufe vorliegt, sind noch nicht durchgeführt und auch bei der äußerst geringen Dicke dieser Rinde nur sehr schwer anzustellen.

²) Von Beispielen, an welchen man diese Calciumsulfitrinde besonders schön sieht, erwähne ich das Siegestor in München. Es ist aus gleichmäßig dichtem Kalkstein (Diceraskalk, Auerbruch bei Kelheim a. d. Donau) 1843—1850 erbaut. Die Durchfahrten zeigen eine sehr starke Glättung der Oberfläche. Die äußeren, dem Schlagregen ausgesetzten Teile zeigen die gleiche Glättung nicht. Aber immerhin fühlt man, daß selbst über die noch gut erhaltenen Scharrierschläge hinweg eine Haut gezogen ist, die einem äußeren Vorgange zuzuschreiben ist. Die neueste Verkehrsentwicklung hat die mir vor 20 Jahren zuerst am Siegestor beobachtete Erscheinung etwas getrübt. Man muß annehmen, daß auch an den äußeren Teilen stets wieder eine Rindenbildung (durch Calciumsulfit) erfolgt, daß die Rinde von den Niederschlägen wieder entfernt wird, daß sie sich aber nach dem Abtrocknen immer wieder neu bildet, wobei Absorptionsvorgänge eine besondere Rolle spielen. (Vgl. S. 327ff.) Verwitterungsversuche im Laboratorium wiesen immer wieder auf die intensive Absorption der SO_2 durch Karbonatgesteine hin. — Aber auch andere Kalke zeigen eine gleiche Glättung. Selbst grobporöse Muschelkalke werden in kurzer Zeit mit einer Haut überzogen, welche sie zweifellos bis zu einem gewissen Grade schützt gegen das neu aufschlagende Niederschlagswasser.

ähnliche Glättung und Rindenbildung auch in der Natur an nackten Felsoberflächen, selbst an rauhen, porösen Gesteinsoberflächen beobachten, oft besser fühlen als sehen kann¹⁾).

Jedenfalls dichtet die Calciumsulfitrinde die überzogenen Kalksteine so gegen Wasser ab, daß sie zuerst gar nicht, sondern erst nach längerem Regen durchfeuchtet werden. Diese Schutzrinde kann ein Eindringen des Niederschlags und der in ihm gelösten Salze und Gase in das Innere des Gesteins bis zu einem gewissen Grade verhindern. Polygene Gesteine, wie z. B. schon Sandsteine mit Karbonatbindemittel, entbehren des gleichmäßigen Schutzes.

Die schädigenden Beeinflussungen durch die Rauchgase, besonders durch die schweflige Säure, zeigen sich in den so oft beschriebenen Erscheinungen des Abschilfern, Abblättern, Abschuppen, von Schalenbildung, Löcherbildung (selbst steingitterartiger und wabenförmiger Gestaltung), Leistenbildung, dann einer Zermürbung unter einer äußeren, hart erscheinenden Rinde oder Schale, oder eines Zerfalls der Fiale, des Stabes, der Säule, des Baldachins, der Figuren, der Gesimse, selbst des Maßwerkes und ganzer Strebebögen. Es ist nicht nötig, an dieser Stelle auf jene Erscheinungen näher einzugehen. Sie ist von verschiedenen Bearbeitern an verschiedenen Stellen genau beschrieben worden.

Die Intensität des Vorganges bis zur Zerstörung ganzer Bauteile ist darauf zurückzuführen, daß im Laufe kurzer Zeiten eine Durchfeuchtung der anderen folgt, daß die einmal gebildeten Verwitterungssalze immer wieder von neuem gelöst, vermehrt und wieder ausgeschieden werden. In vielen Fällen ist bald nach einem Schlagregen der Bau wieder getrocknet. Aber die Salze waren zwischendurch gelöst worden und gewandert. Die Kapillar- und Diffusionsvorgänge in dem Werksteine sind raschem Wechsel unterworfen. Gerade durch das ständige Hin- und Herwandern der Verwitterungssalze wird die Stabilität eines Mineralaggregates, wie sie uns ein jedes Baugestein darbietet, immer wieder inhomogen beeinflusst. Es sei dies hier nur angedeutet. Der Vorgang zeigt sich in dem Endprodukt, in dem Auftreten von Ausblühungen an der Oberfläche oder unter einer äußeren Rinde.

¹⁾ Ich „fühle“ derartige Rindenbildungen in der Natur an Kreidekalken in der Charente Frankreichs und in Istrien, an Jurakalken bei Kelheim an der Donau, bei Eichstädt, an Felsen der Werksteinbänke fränkischen Muschelkalkes, auch verschiedentlich bei alpinen Dolomiten und an anderen Orten. Deutlicher sichtbar werden diese Rinden in den Trockengebieten an Karbonatgesteinen, wo aber vielleicht noch andere Vorgänge hinzukommen. Jedenfalls dürften in der Natur auch andere schwerlösliche Salze die Rinde bedingen, als bei den Bauten.

Es muß nun ganz besonders betont werden, daß die Ausblühungen stark wechselnde Zusammensetzung haben. Sie hängen ab von der Zusammensetzung des Gesteins, dann von den speziellen klimatischen Verhältnissen des Standortes, von der chemischen Zusammensetzung der durch den Einfluß des Menschen veränderten Atmosphäre, der Art, Menge und Aufeinanderfolge der Niederschläge, von der Zahl der Frosttage und zuweilen auch von der aus dem Boden in das Gestein aufsteigenden Feuchtigkeit. Sicher übt auch die Zusammensetzung des Mörtels einen Einfluß aus, von welcher Frage wir im folgenden absehen wollen¹⁾. Stehen die Bauwerke mit Metallteilen in Berührung (Denkmäler!), so können auch die aus dem Metall herührenden Verbindungen zerstörend einwirken. Kupferdächer führen zu einer intensiven Malachitanfärbung der darunter befindlichen Bausteine (Passauer Dom) und können zu einer Schädigung der Bauten Veranlassung geben. *Micro? durch höchstens körnliche Flecken!*

An Ausblühungen kommen in Frage: Calciumkarbonat, Calcium-, Magnesium- und Alkalibikarbonate, Magnesium-, Calcium-, Natrium- und Kaliumsulfat, Kalium- und Natriumnitrat²⁾, unter Umständen Calciumphosphat, Eisenhydroxyd, Manganoxyde, gelegentlich Alaun³⁾, verschiedene Kupfer-, Eisen-, Blei- und Zinksalze (diese besonders unter Denkmälern). Auch Chloride können zuweilen eine Rolle spielen, besonders Natriumchlorid, örtlich auch Calciumchlorid (s. S. 314 ff.). Diese Aufzählung dürfte noch nicht vollständig sein⁴⁾. Jedenfalls aber zeigt sie, daß man bei den Versuchen zur Aufklärung nach ganz verschiedenen Richtungen prüfen muß.

¹⁾ Von einigen Beurteilern der Bausteinverwitterung wird die Gefahr der Benutzung unrichtig zusammengesetzten Mörtels stark übertrieben. Wenn auch diese Frage von geologischer Seite nicht zu entscheiden ist, so muß sie doch beachtet werden. Nur in seltenen Fällen sieht man an den durch Rauchgasverwitterung stark geschädigten Bauten einen Einfluß des Mörtels auf den benachbarten Werkstein. Im Zusammenhange hiermit sei auch darauf hingewiesen, daß die zur Verbindung einzelner Werkstücke benutzten Metalldübel, besonders Eisen, eine ganz erhebliche Einwirkung haben (vgl. Hörmann 1928 und die von ihm erwähnte englische Literatur).

²⁾ Nach Tenne und Calderon (die Mineralfundstätten der Iberischen Halbinsel, Berlin 1902, S. 150) sollen eine Kapelle in Zaragossa und Teile des Klosters El Escorial so durch Salpeterausblühungen angegriffen sein, daß diese treffend als „caries de las piedras“ bezeichnete Umwandlung die Werksteine zu Staub zerfallen läßt. — Was bei uns als Salpeterausblühungen an Bauwerken bezeichnet wird, ist zumeist eine der anderen oben angegebenen Neubildungen.

³⁾ Bei der Verwitterung im Freien besonders im Elbsandsteingebirge nachgewiesen.

⁴⁾ Merkwürdigerweise liegen meines Wissens keinerlei Angaben über neugebildete Kieselsäure vor. Deren Häute sind wahrscheinlich so dünn, daß sie sich ganz der Beobachtung entziehen.

Selten nur ist eines der angegebenen Salze allein in den verwitterten Teilen ausgeschieden. Am häufigsten treten Calcium- und Magnesiumsulfat, örtlich daneben noch Natriumchlorid auf.

Die Zermürbung der Gesteinsmasse wird selbstverständlich ganz verschieden sein nach der Textur des Gesteines und danach, wie die Schichtungsfugen der Sedimente, die Kluft- und Streckungsrichtungen bei Eruptiven zu der äußeren Oberfläche der Bausteine liegen. Trotzdem es nur zu bekannt ist, daß Sedimente, deren Schichtung parallel zur Oberfläche aufgestellt wird („Auf den Kopf stellen“; „Juden“), raschesten Zerfall zeigen, wird dieser Fehler aus Bequemlichkeitsgründen oder in angeblicher Sparmaßnahme nur allzu häufig immer wieder von neuem gemacht. Solche Fälle brauchen hier nicht besprochen zu werden.

VI. Das Eindringen der chemischen Verwitterung in die Bausteinquader.

Aus den allgemeinen Angaben über das Eintreten von Wasser in die Quader und dessen Wiederverdunstung an der Außenfläche folgert schon für die vorher besprochenen Fälle der Schalenbildung und der darunter einsetzenden Zermürbung, daß ein Teil der löslichen Salze aus tieferen Teilen des Gesteines stammt. Die Zermürbung ist von Gestein zu Gestein, aber auch bei einem Gestein von Quader zu Quader verschieden stark und dringt auch verschieden tief ein. Selbst an einer Quader sehen wir die einzelnen Teile ganz verschieden angegriffen. Eine einzelne Quader im glatt aufsteigenden Mauerwerk ist bald im unteren Teile, bald oben oder an der Seite am stärksten angegriffen, während die anderen Teile noch ganz frisch erscheinen können. Noch wechsellvoller sind die Verhältnisse an freistehenden Quadern und dann bei solchen mit reicher Ornamentik. Oft sind die geschützten Teile am stärksten angegriffen, während die ungeschützten gar keine Verwitterung zeigen. Zuweilen ist die dem Schlagregen abgewandte Seite stärker verwittert, so daß, wie S. 303 schon erwähnt, der eindringende Niederschlag durch den ganzen Stein hindurchgewandert sein muß.

In manchen Fällen können wir aus Strukturunterschieden oder aus der durch den Niederschlag bedingten Wasserbewegung innerhalb der Quader die Gründe für die verschiedenartige Verwitterung in den einzelnen Teilen der Quader herauslesen. Wenn wir Bröckellöcher bzw. Steingitterbildung an eine Schichtfuge eines Sedimentes gebunden finden, so ist eine Erklärung leicht. Wir können diese gitterartig aneinander gereihten Verwitterungslöcher auch an den Bauwerken an die Lagentextur der Kreuzschichtung angeknüpft beobachten. Das

sind dann ganz ähnliche Verhältnisse, wie wir sie bei der Verwitterung ähnlicher Gesteine in der Natur finden. Wenn wir dann Sandsteinquadern mit einer äußeren harten Kruste überzogen finden, aber auch eine ähnliche Verkrustung an den Seiten der Quadern gegen die nicht-verfugte Ritze gegenüber der Nachbarquader feststellen, so ist uns auch das leicht verständlich. In diesem Falle bedingt eine oft nur leichte Verletzung der äußeren Kruste ein Herausrieseln des inneren zermürbten Gesteines, ganz wie bei den Bröckellöchern der Wüste¹⁾. Kastenartige Verwitterungsformen bilden sich. Innerhalb des gebildeten Hohlraumes sind Streifen, Kanten und Leisten an der zurückweichenden inneren Wand durch die primären Textureigenschaften des Gesteines bedingt. Daß nun dem Gestein eingeschlossene Fremdkörper, Gerölle, Konkretionen usw. das Formbild der verwitterten Oberfläche beeinflussen, braucht kaum angeführt zu werden. Auch Eruptivgesteine zeigen Regelmäßigkeiten in der äußeren Formgestaltung bei der Verwitterung im Bauwerke. Ich brauche nur an die weit verbreitete Angabe zu erinnern, daß der Trachyt vom Drachenfels im Siebengebirge am Kölner Dom dort sehr häufig intensivste Zermürbung und tief eingreifende Verwitterung zeigt, wo die Sanidintafeln parallel zur Außenfläche des Werksteines liegen, daß aber dort die Verwitterung nur langsam fortschreitet, und die Trachytquadern eine relativ sehr frische Oberfläche zeigen, wo die auf weite Strecke parallel gerichteten Sanidintafeln²⁾ senkrecht auf der Oberfläche der Werksteine stehen³⁾. Es sei aber auch betont, daß es Ausnahmen von dieser Regel gibt, ohne daß wir einen Grund dafür kennen. Aber in den meisten Fällen ist uns die Ursache für die Unterschiede der Verwitterung an der einzelnen Quader noch unbekannt. Wir sehen an den Bauwerken die gleichen Unregelmäßigkeiten, das scheinbar Gesetzlose, Willkürliche, wie wir sie in der Natur beobachten.

¹⁾ Vgl. E. Kaiser, Diamantenwüste, Berlin 1926, Bd. II, 310—311.

²⁾ Vgl. Nöggerath, Karstens Archiv 1844, 18., S. 456—465. — H. Laspeyres, Siebengebirge, Bonn 1901, S. 280. — H. u. E. Cloos, Zeitschr. f. Vulkanologie, Berlin 1928, Bd. XI S. 33—40.

³⁾ Schon von Nöggerath (Karstens Archiv 1844, 18., 463) erwähnt, zitiert bei A. von Lasaulx, Die Bausteine des Kölner Domes, Bonn 1882, S. 26 u. 80. — Es sei bei dieser Gelegenheit darauf hingewiesen, daß v. Lasaulx sich irrt, wenn er angibt, daß zu seiner Zeit „an der Außenseite des Domes kaum ein Werkstück aus dem Drachenfels Gestein sichtbar“ gewesen sei. Selbst jetzt noch, also bald 50 Jahre später, kann man die Verwitterung des Drachenfels Trachyt weithin gut studieren. Das wird noch auf längere Zeit der Fall sein, da auch bei den jetzigen Restaurationsarbeiten lange nicht alle Werksteine aus Drachenfels-Trachyt ausgewechselt zu werden brauchen. Die Angabe von v. Lasaulx ist leider weithin in die Literatur übergegangen, wird sehr oft angeführt und führte schon zu mannigfachen Mißverständnissen. Stellenweise hat sich sogar der Drachenfelstrachyt als verhältnismäßig gutes Baumaterial erwiesen.

Die gleichen Fragen treten uns in beiden Fällen entgegen, ohne daß wir alle beantworten können.

Um nun aber das Eindringen der chemischen Verwitterung und die Tiefe, bis zu der sie zu beobachten ist, festzustellen, müßten mehrfache Untersuchungen über die Verbreitung von Verwitterungssalzen in aus einem Bau entnommenen Werksteinen angestellt werden, worauf ich bereits auf S. 304, Anm. 2 hinwies. Eine erste Untersuchung nach dieser Richtung wurde von mir angeregt, über die ich hier berichten darf. Es ist mir nichts darüber bekannt, ob anderwärts ähnliche Untersuchungen bereits durchgeführt wurden. Die Untersuchungen von äußerer Schale, darunter befindlicher an löslichen Verwitterungssalzen angereicherter Zone und frischerem Kerne, wie sie verschiedentlich von mir und anderen durchgeführt wurden, umfassen noch nicht die ganze Frage.

Die Dombauhütte in Regensburg entnahm 1927 eine Eckquader von Grünsandstein vom Dome zu Regensburg. Die Untersuchung führte Herr Dr. Max Storz 1927 durch, wozu Herr Dr. Haber 1929 Ergänzungen ausführte. Die Ausmaße des Werksteines sind in Abb. 1 wiedergegeben. Die Außenseite zeigte eine Abschuppung bis zu einer Tiefe von 15 mm. Aus dem Werkstein wurde eine Platte *a b c d e f g h*, diagonal hindurchgehend, genommen, die wieder in drei Leisten zerlegt wurde. Die mittlere Leiste II (vgl. Abb. 1) bot die Gewähr, daß man den von den Außenflächen des Werksteines am weitesten entfernten Teil untersuchen konnte. Die

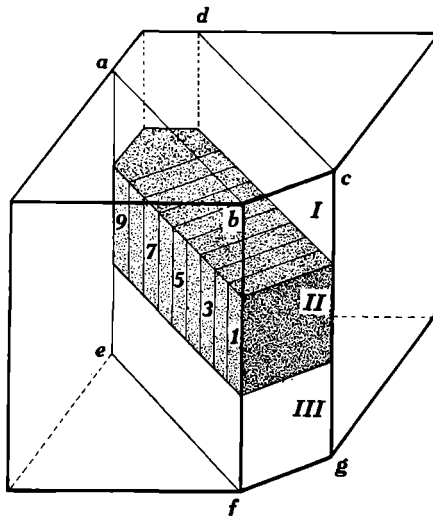


Abb. 1. Teilung einer Eckquader von Grünsandstein vom Regensburger Dom zur chemischen Analyse.

Leiste II wurde mit der Quetschmaschine in 9 Teile von je 5 cm Dicke zerlegt. Die Proben 1, 2, 3, 5, 7 und 9 wurden analysiert, so daß sowohl der der Luft zugekehrte wie der der Beeinflussung entlegenste, innerste Teil in den Analysen erfaßt wurden. Die Kurvendarstellung der Abb. 2 zeigt, wie notwendig es war, in der äußeren Zone Analysen dicht nebeneinander entnommener Proben auszuführen.

Die Bestimmungen des Wassergehaltes bei 120° im Jahre 1927 schwankten bei den Proben 1, 3, 5, 7 und 9 nur zwischen 0,73—0,80 %.

zeigten also Unabhängigkeit von der Entnahmetiefe. Auch der Glühverlust mit rund 25 % war konstant. Beides dürfte darauf zurückzuführen sein, daß die Quader ziemlich lange zwischen der Entnahme und der Untersuchung gleichmäßig austrocknen konnte. Die Analysen vom März 1929 zeigten die weitergehende Austrocknung. Ein Wandern der Verwitterungssalze hatte aber nicht eintreten können, da die Proben 1—9 ja schon 1927 voneinander getrennt und zerkleinert worden waren. Die Analyse der Probe 2 wurde erst im März 1929 ausgeführt, während die übrigen Proben schon im Mai 1927 untersucht und dann noch im März 1929 nachkontrolliert wurden. Die dichtere Lage der Analysen in den äußeren Teilen war notwendig, um die graphische Darstellung der Abb. 2, in welcher ein Überblick über die Verteilung der wichtigeren löslichen Bestandteile des untersuchten Bausteines gegeben werden soll, genauer in dem Gebiete zu belegen, in welchem die löslichen Bestandteile schon nach den früheren Untersuchungen eine so ganz besondere Rolle spielen.

Alle Werte der Analysentabelle 1 entsprechen den neueren Untersuchungen mit Ausnahme der für den Glühverlust bei 5, 7, 9. Bei den Wassergehaltsbestimmungen (120°) ist nur bei 2 das Ergebnis der Untersuchung von 1929 gegeben. Sie fällt aus den Werten von 1927 heraus und zeigt die in 2 Jahren eingetretene stärkere Austrocknung der Probe an. Berücksichtigen wir dies, so können wir schon aus den übrigen Bestimmungen über den Wassergehalt Unabhängigkeit von der Entnahmetiefe schließen. Auch der Glühverlust ist nahezu konstant.

Die erhaltenen bzw. aus den Ziffern errechneten Werte sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt und zum Teil zu Abb. 2 verwandt. Wenn die Tabellen hier so ausführlich wiedergegeben werden, so soll damit nicht eine so besondere Genauigkeit behauptet werden. Auf die absoluten Werte kommt es auch nicht so sehr an, sondern vielmehr auf das relative Verhalten der löslichen Substanzen in den verschieden weit ab von der Oberfläche gelegenen Zonen dieser verwitterten Bausteinquader.

Die Gesamtheit der löslichen Verwitterungssalze nimmt zunächst rasch, dann langsam ab. (Leider fehlt uns eine Analyse des frischen Gesteines und der nun in ihm enthaltenen löslichen Substanzen. Aber es dürfte auch schwer sein, das Gestein festzustellen, welches der untersuchten Quader horizontmäßig genau entspricht.) Der Kurve der gesamten löslichen Substanzen folgt einigermaßen die Kurve für das in ihnen bestimmte CaO. Dann aber ist besonders wichtig, wie die Kurve für SO₃ ganz anderen Verlauf zeigt, als die für CaO, daß sie aber auch nicht mit der für MgO gleichsinnig verläuft. Entgegengesetzt zu der Verteilung der SO₃ in unseren Bausteinquader ist das

Analysentabelle 1.

	1	2	3	5	7	9
Gesamte gelöste Substanz	0,8245	0,2990	0,2310	0,1155	0,1125	0,1045
Glühverlust	0,2236	0,1350	0,1165	0,0630	0,0620	0,0595
Glührückstand	0,6015	0,1640	0,1145	0,0525	0,0505	0,0450
CaO	0,1452	0,0552	0,0413	0,0210	0,0220	0,0217
MgO	0,0215	0,0085	0,0069	0,0039	0,0050	0,0059
SO ₃	0,3459	0,0823	0,0500	0,0190	0,0167	0,0124
Cl.	0,0030	0,0034	0,0036	0,0060	0,0086	0,0092
CO ₂	Sp.	Sp.	—	—	—	—
SiO ₂	0,0030	0,0005	0,0005	—	—	—
Al ₂ O ₃	0,0815	0,0110	0,0070	0,0015	0,0005	—
Alkalien	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
Gesamtsubstanz:						
Glühverlust . . .	26,25	26,76	26,92	24,97	24,58	24,25
Gesamtsubstanz:						
Wasser bis 120° . .	0,78	0,52	0,80	0,75	0,73	0,80

Analysentabelle 2 (einzelne Bestandteile, ausgedrückt in Prozent der gesamten gelösten Substanz).

	1	2	3	5	7	9
Glühverlust	27,06	45,18	50,33	54,70	55,11	55,02
Glührückstand	72,94	54,82	49,67	45,30	44,89	44,98
CaO	17,25	18,45	18,78	18,18	19,53	20,77
MgO	2,43	2,83	2,55	3,35	4,48	5,60
SO ₃	42,19	27,54	21,64	16,88	14,80	11,82
Cl.	0,36	1,13	1,56	5,20	7,64	8,80
Al ₂ O ₃	9,88	3,29	3,03	1,30	0,44	—
SiO ₂	0,36	0,15	0,16	—	—	—

Auftreten von Cl. Wir müssen schließen, daß sich bei dem Wandern der löslichen Verwitterungssalze in dem Gesteine Calciumsulfat nahe der Oberfläche konzentriert hat, während Magnesiumsulfat, aber noch mehr die Chloride in das Innere des Gesteines hineingewandert sind. Die verschiedensten Überlegungen führen immer wieder zu dem Ergebnisse, daß bei dieser Verwitterung des Grünsandsteines als hauptsächliche Verwitterungssalze Calciumsulfat, untergeordnet Magnesiumsulfat und Calciumchlorid auftreten, von denen das letztere nach dem Innern zunimmt.

Der Nachweis von Al₂O₃ und SiO₂ in den löslichen Verwitterungssalzen ist eigenartig. Beide müssen in Beziehung stehen zur Glaukonitumwandlung. Aber wo stecken die Alkalien? Dazu ist die Verteilung von SiO₂ und Al₂O₃ in dem verwitterten Bausteine ungleichmäßig.

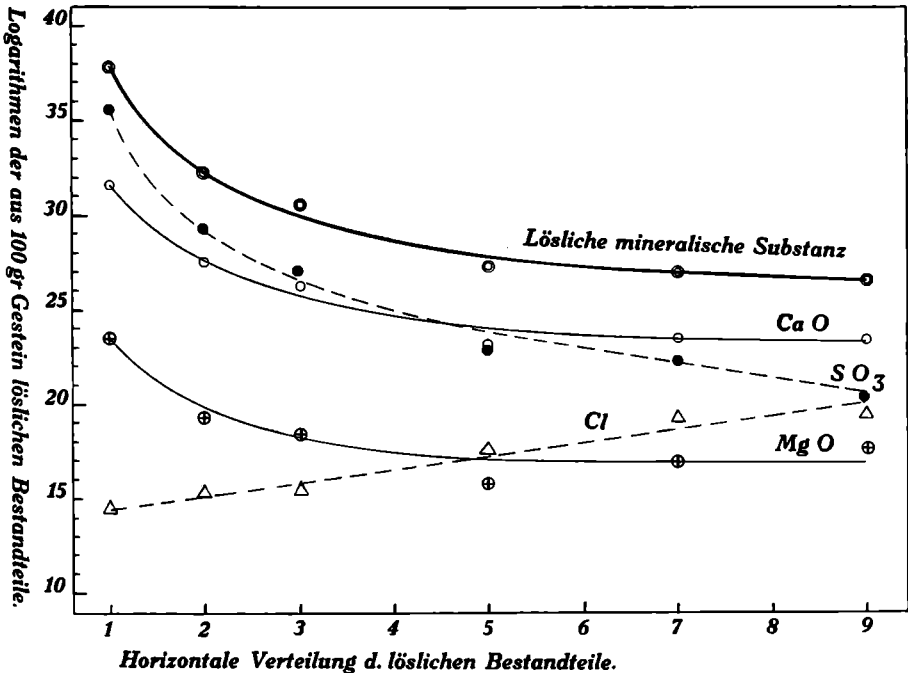


Abb. 2. Graphische Darstellung der Verteilung löslicher Verwitterungssalze in einer Grünsandsteinquader vom Regensburger Dom. Links Oberfläche. Die Proben 1, 2, . . . entsprechen den einzelnen Stücken der in 9 Teile von je 5 cm Dicke zerlegten Leiste II (vgl. Abb. 1).

Auch hier zeigt sich ein Ausblick auf weitere notwendige Untersuchungen!

Wenn wir auch nicht aus dieser einen Untersuchung zu sehr extrapolieren dürfen, so muß man doch vermuten, daß zunächst für die Bausteinverwitterung geschlossen werden kann, daß die leichter löslichen Salze hauptsächlich in größere Tiefe der Bauquader wandern und dort ausgeschieden werden, während die schwerer löslichen Salze ganz in der Nähe der Oberfläche bleiben. Das dürfte selbstverständlich nicht als Wirkung einer einmaligen Durchfeuchtung anzusehen sein, sondern ist die Folge der so häufigen geringen Durchfeuchtungen, bei denen eine Wanderung der leichtlöslichen Salze eintritt, die schwerer löslichen Salze aber nicht immer wieder aufgelöst werden.

Diese eine Untersuchung darf zunächst nicht verallgemeinert werden. Sie eröffnet aber doch schon Ausblicke darauf, daß ähnliche Untersuchungen notwendig sind. Schon diese Untersuchung läßt erkennen, daß wir die verschiedenen Verwitterungssalze nicht nur im Bauwerke, sondern auch in der Natur weitergehend als bisher verfolgen müssen.

Ich erinnere weiter daran, daß in den ariden Gebieten Kalkkrusten weit verbreitet sind, daß dort, örtlich begrenzt, Calciumsulfat als Gips oft ausgeschieden ist, daß aber Magnesiumsulfat und Natriumchlorid als Ausblühung an der Gesteinsoberfläche nur selten und als rasch vergängliche Bildungen beobachtet werden. Dagegen sehen wir in den ariden Gebieten Magnesiumsulfat und Natriumchlorid als Ausblühung dort sehr häufig, wo die periodisch oder episodisch zusammengelaufene Verwitterungslösung in Endseen verdampft. Die Umgebung dieser Endseen zeigt überall die Kalkausscheidung als Oberflächenkalke an der Oberfläche, die leichter löslichen Stoffe sind aber weiter gewandert. Dort ist die Erscheinung klimatisch bedingt. Der zweifellos ganz ähnliche Vorgang in den Bausteinen ist aber edaphisch, durch die besondere Wasserbewegung in den Bausteinen bedingt.

Ich benutzte die jetzt vorliegende eine Untersuchung über das Eindringen der Verwitterung in eine Bausteinquader dazu, um zu zeigen, daß wir diese Beobachtungen direkt mit denen im ariden Gebiete vergleichen können, daß auch hier wieder eine Konvergenzerscheinung vorliegt. Weiterhin zeigte sich die Notwendigkeit, diese eine Untersuchung auch auf andere Bausteine auszudehnen, damit nicht die Erfahrungen dieser Untersuchung zu weitgehend ausgebeutet werden. Aber schon jetzt gibt sich eine Folgerung für die Vorgänge in den ariden Gebieten, wo ebenfalls die leichter löslichen Salze viel leichter dem kapillaren Aufstieg nach der Oberfläche entzogen, die schwerer löslichen Salze aber an der Oberfläche ausgeschieden werden.

Die vorgelegten Analysenziffern zeigten andererseits die zunächst eigenartig erscheinende Bedeutung von Chloriden in bezug auf das Eindringen der Verwitterung in eine Bausteinquader. Auch an anderen Stellen sind Chloride oft neben Sulfaten, festgestellt worden. Um aber über die Bedeutung der Chloride für die Bausteinverwitterung und damit auch indirekt für die Verwitterung durch leichtlösliche Verwitterungssalze in der Natur Auskunft zu erlangen, wäre eine Durchführung ähnlicher Untersuchungen dringend notwendig.

VII. Über einige an der chemischen Verwitterung unserer Monumentalbauten beteiligte Verwitterungsvorgänge.

Die von mir an vielen Bauten durchgeführten Untersuchungen über die Neubildungen bei der Verwitterung an unseren Monumentalbauten zeigten, daß sehr viel mehr Salze aus der Verwitterung hervorgehen und den Zerfall der Bauten beeinflussen, als die bisherigen Literaturangaben erkennen lassen. Ein ganz besonderer Einfluß muß sicher in den Großstädten der aus den Rauchgasen stammenden schwefligen Säure und der sich daraus entwickelnden Schwefelsäure zugeschrieben werden. Aber auch bei der Verwitterung der Bausteine

macht sich die Ortslage bemerkbar. Darunter verstehe ich an dieser Stelle die besondere Beeinflussung durch anderes Klima, aber auch durch die im Vorhergehenden bereits berührte Beeinflussung durch Wetterlage, Industrie usw. Im folgenden sollen aber einige besondere Fälle hervorgehoben werden, in welchen der Zerfall der Bauwerke nicht oder nicht allein durch die von der Rauchgasverwitterung abzuleitenden Sulfate bedingt ist.

1. Chloride als zerstörende Verwitterungssalze.

Das vorher schon ziffernmäßig dargelegte Beispiel der Verwitterung am Dom in Regensburg zeigte uns, daß Chloride in verwitterten Teilen unserer Bauten festgestellt werden können, ohne daß sie etwa auf chloridhaltige Gesteine zurückzuführen sind. Es fällt uns schwer, für den Fall der Verwitterung des Grünsandsteins am Regensburger Dom die Herkunft der Chloride richtig zu deuten. Wir wollen vorher einen anderen Fall betrachten.

Am Hafen der Stadt Lindau i. Bodensee steht der alte, wahrscheinlich im 12. Jahrhundert errichtete Leuchtturm¹⁾. Er ist erbaut aus Molassesandstein von St. Margarethen-Rorschach auf der schweizerischen Seite des Sees. Auch andere alte Bauten in Lindau, wie z. B. die protestantische Kirche inmitten von Lindau, zeigen reichliche Verwendung des gleichen Gesteines. Die aus Werksteinen errichteten Teile des alten Leuchtturmes zerfielen nun so, daß sie ausgewechselt werden mußten.

Eine Untersuchung der verwitterten Werksteine am alten Leuchtturme ergab nun die überraschende Tatsache, daß die darin enthaltenen wasserlöslichen Verwitterungssalze im wesentlichen Chloride waren, während wasserlösliche Sulfate nur in Spuren sich nachweisen ließen. Im Inneren der Stadt war aber eine gleich starke Beeinflussung der Verwitterung durch Chloride, besonders an der protestantischen Kirche, nicht nachweisbar. Diese eigenartige Erscheinung ist nur dadurch zu erklären, daß wir die Chloranreicherung auf das in sicher geringer Menge nur im Bodenseewasser vorhandene Chlor zurückführen. Der ständige Anprall der zeitweise starken Brandung am Bodenseeufer von Lindau (weshalb hätte man sonst den Hafen bauen müssen!) führte zu einer Konzentration der nur in geringer Menge gelösten Verwitterungssalze des Bodenseewassers in dem immer wieder durchfeuchteten Bauwerke am Seeufer. Nebel mögen zu Sturmzeiten eine besondere Rolle gespielt haben. Aber die Chlor-

¹⁾ Für den, welcher den Hafen von Lindau kennt, sei hinzugefügt, daß es sich um den am Innenrande des jetzigen Hafens gelegenen Turm, gegenüber der Hafeneinfahrt handelt, der schon lange nicht mehr als Leuchtturm benutzt wird.

wirkung drang nicht in die Stadt ein Die Gesteine, welche am Seeufer intensive Verwitterung und Chloride als lösliche Salze zeigen, sind im Innern der Stadt viel besser erhalten Das ist ein Hauptgrund für die angegebene Deutung Leider kann ich besondere analytische Daten über die Menge neugebildeten Chloride nicht vorlegen. Die aus dem Seewasser sich ausscheidenden Karbonate und Sulfate rufen nur eine dünne, aber nicht oder nur schwer wasserlösliche Verkrustung der äußersten Schale des Bausteins hervor, während die leichter löslichen Chloride immer wieder bei jeder Durchfeuchtung von neuem gelöst werden, in das Innere des Bausteins wandern und bei neuem Abtrocknen wieder ausgeschieden werden. Dadurch tritt hier eine Zermürbung des Gesteins ein, ganz ähnlich der bei der Ausscheidung von Magnesiumsulfat in anderen Fällen (vgl. S. 322).

Dafür, daß auch sonst noch Chloride bei der Verwitterung von Bausteinen eine besondere Rolle spielen, führe ich auch hier die Untersuchung von M. Gary an, wonach es sich bei der Verwitterung eines Grabdenkmals des Grafen Enno II. von Ostfriesland in der Kirche von Emden um das Auskristallisieren von Chlornatrium und Gips in einem sandigen Kalkstein handelt¹⁾. Das Chlornatrium soll von den häufigeren Sturmfluten herrühren.

Das vorher angezogene Beispiel von Regensburg kann aber nicht auf eine der beiden vorher angegebenen Ursachen zurückgeführt werden: Durchfeuchtung von einem Seebecken her bzw. vom Meere her. Daß wir, je näher nach der Küste hin der verwitterte Bau liegt, um so mehr Chlor in den löslichen Verwitterungssalzen nachweisen können, ist auch nicht verwunderlich. Nimmt doch der äolisch vom Meere aus auf das Festland überführte Kochsalzgehalt landeinwärts bald ab; aber immerhin wird noch nach der Angabe vieler, namentlich amerikanischer Forscher, ein zyklisches Kochsalz weit landeinwärts gebracht²⁾. Führt man doch auch bereits einen Teil des Kochsalzgehaltes des Grundwassers auf dieses zyklische Kochsalz zurück und zeichnete auf Grund zahlreicher Analysen von Grundwasser Karten der Verbreitung des Kochsalzes, welche Karten eine Abhängigkeit des Kochsalzgehaltes des Grundwassers von der Entfernung von der Küste nachweisen³⁾. Das Salz kann, abgesehen von einem meist sehr schmalen Küstenstreifen, nur äolisch zugeführt sein.

¹⁾ M. Gary, Verwitterung eines Grabdenkmals im Kircheninnern. Mitt. a. d. techn. Versuchsanstalten zu Berlin, 20. Jahrg. 1902, 229—241.

²⁾ Vgl. z. B.: F. W. Clarke, The data of geochemistry, 3 ed., Bull. U. S. Geol. Surv. 616, Washington 1916, 51ff. — Fr. Behrend und G. Berg, Chemische Geologie, Stuttgart 1927, 283ff.

³⁾ Z. B. für die Staaten New York und New England: Jackson, Water Supply Paper U. S. Geol. Survey, Nr. 144, Washington 1905.

Ich kenne nur wenige Untersuchungen über die Verwitterungsvorgänge an Bausteinen, bei welchen auf das Vorhandensein von Chlor unter den löslichen Verwitterungssalzen geprüft worden ist. Nachdem die erwähnten Untersuchungen an dem Leuchtturm von Lindau auf die etwaige Bedeutung von Chloriden für den Verwitterungsvorgang hingewiesen hatten, habe ich immer wieder auf Chloride gefahndet bzw. untersuchen lassen. Der Erfolg war, daß an den verschiedensten Orten Chloride in schwankenden Mengen in den äußeren verwitterten Schalen nachgewiesen wurden, wie in dem Beispiele von Regensburg, an verschiedenen Kalksteinen, Sandsteinen und Eruptivgesteinen am Kölner Dom, an Sandsteinen von den Baumbergen bei Münster i. W. und von Udelfangen a. d. Mosel am Dom zu Xanten usw. Ziffermäßige Belege für die Beteiligung der Chloride kann ich leider noch nicht anführen.

Aber es dürfte schwer fallen, dieses Auftreten von teilweise beträchtlichen Chlormengen in den Verwitterungssalzen der Bausteine verschiedener, zum Teil weit landeinwärts gelegener Städte (Regensburg) nun allein auf den Anteil von Chlor in dem zyklischen Salze zurückzuführen. Wir wissen, daß das aus den Haushaltungen des Menschen stammende Kochsalz die chemische Zusammensetzung des Grundwassers ganz erheblich beeinflussen kann¹⁾. Mir ist nicht bekannt, ob nicht auch ein beträchtlicher Teil des Kochsalzgehaltes der Hauswirtschaften mit den Abgasen der Atmosphäre zugeführt, aber durch den Regen in oder bei der Großstadt wieder zu Boden geschlagen wird. Ich vermute aber in diesem Nebenkreislaufe des zyklischen Salzes eine Quelle für das Auftreten von Chlor in den löslichen Verwitterungssalzen unserer Bauwerke. Es wäre sehr dankenswert, wenn von irgendeiner Seite die Bedeutung des Chlors in der Verwitterungsschale der Bauwerke nachgeprüft würde, wobei allerdings Untersuchungen an Bauwerken verschiedenster Orte miteinander verglichen werden müßten. Folgerungen für die Verwitterung in der freien Natur sind sicher in reichem Ausmaße zu ziehen.

Hie und da mag auch der Ursprung des Chloridgehaltes der Bausteine auch in einem erst nach dem Versetzen im Bauwerke stattfindenden Entsalzen der noch Chloride aus der Zeit der Sedimentation führenden Gesteine zu suchen sein. Die meisten als Bausteine verwandten Natursteine dürften aber vor der Verwendung entsalzt worden sein.

Jedenfalls aber zeigen schon diese Ausführungen, daß wir für das Auftreten von Chloriden in den Verwitterungsprodukten der Bausteine ganz verschiedenen Ursprung beachten müssen.

¹⁾ Vgl. z. B. G. Fliegel, Zeitschr. f. prakt. Geologie, 1920, Bd. 28, S. 5—12.

2. Sulfate als zerstörende Verwitterungssalze.

Während es sich in dem Falle des Kochsalzes um die Zuführung des Salzes aus der Umgebung handelt, und eine chemische Reaktion des zugeführten Salzes auf das Gestein nur durch Löslichkeitsbeeinflussung eintritt, haben wir bei der Sulfatverwitterung Zuführung von SO_2 bzw. SO_3 aus den Rauchgasen. Die SO_2 wirkt, soweit wir bis jetzt wissen, nun direkt auf die Oberfläche kalkiger Gesteine unter Bildung von Calciumsulfid (vgl. S. 308/10). Die Wirkung der Schwefelsäure greift aber tief in das Gestein ein unter Bildung der verschiedenartigsten Verwitterungssalze, deren Base aus den angreifbaren Gesteinskomponenten herrührt. Bekannt ist die Bedeutung von Calcium- und Magnesiumsulfat, von denen namentlich das letztere als leicht beweglich in der Bausteinquader hin- und herwandert und zur Zermürbung und zum Zerfall ganz wesentlich beiträgt.

Es muß aber auch sehr berücksichtigt werden, daß gleichzeitig auch eine Verwitterung unter dem Einfluß der Kohlensäure eintritt, wobei sich Karbonate in der äußeren Schale bilden und geradezu eine Verhärtung dieser herbeiführen, unter welcher festeren Schale die Zermürbung unter dem Einflusse der wandernden, leichter löslichen Sulfate einsetzt. Auch die hydrolytische Wirkung des Wassers ist zu beachten. Sie wird namentlich bei Silikatgesteinen Bedeutung erlangen können (vgl. die Angaben über die Verwitterung des Trachyts vom Drachenfels auf S. 322/3 und des Riebeckittrachyts von der Hohenburg bei Berkum auf S. 323/4).

Wir wollen nun einige Beispiele betrachten, in welchen andere leicht lösliche Sulfate an der Zerstörung teilnehmen, dabei aber auch den Fortgang des Verwitterungsvorganges bei verschiedenen Gesteinen verfolgen.

a) Der Trachyt vom Drachenfels (Siebengebirge) ist, wie bekannt, namentlich in der älteren Bauperiode in weitgehendem Umfange am Kölner Dom verwandt worden. Ich habe bereits auf S. 313 darauf hingewiesen, daß man — trotz der in der Literatur weitverbreiteten gegenteiligen Angabe — seine Verwitterung am Kölner Dom auch jetzt noch sehr gut untersuchen kann¹⁾. Die porphyrischen Sanidin- und Hornblendeausscheidungen sind zumeist noch recht gut erhalten. Die feinkörnige, feldspatreiche Grundmasse zeigt reichliche Bildung von tonigen Bestandteilen, meist wohl Kaolin. Die chemische Verwitterung des Drachenfelstrachyts geht in der Weise vor sich, daß

¹⁾ Neuerdings sah ich auch noch eine sehr gute Erhaltung des Trachytes vom Drachenfels am Dome zu Xanten am Niederrhein, dazu aus einer älteren Bauperiode, während von einer Renovierung vor 60 Jahren herrührende Sandsteine eine intensive Sulfat-Chlorid-Verwitterung zeigen.

die Grundmasse zwischen den porphyrischen Sanidinausscheidungen herum angegriffen wird, daß sich dabei quellbare Aluminiumhydro-silikate bilden, welche die größeren Sanidine dann häufig aus dem Gesteinsverbande heraussprengen, wenn diese parallel zur äußeren Oberfläche liegen. Sanidintafeln, welche senkrecht zur äußeren Oberfläche stehen, sind zumeist, oft auch noch bei stärkerem Angriffe auf die Gesteinsgrundmasse, gut erhalten. Es handelt sich bei der Verwitterung des Drachenfelstrachytes in erster Linie nicht um eine Kaolinisierung der größeren Sanidintafeln, sondern um eine viel rascher fortschreitende Kaolinisierung der Grundmasse. Wenn nun auch in dem mehligem Verwitterungsprodukte nur spärlich Karbonate nachweisbar sind und auf die normale an CO_2 angereicherte Großstadtverwitterung hinweisen, so zeigt sich in ihm doch ein ganz besonders starker Betrag an Natriumsulfat mit wenig Gips. In den wasserlöslichen Verwitterungssalzen ließen sich wenig CaO , Spuren von MgO , sehr wenig K_2O , sehr viel Na_2O , kein CO_2 , aber wohl HCl und sehr viel H_2SO_4 nachweisen¹⁾.

Es handelt sich bei dieser Umwandlung nicht um eine Kaolinisierung der großen porphyrischen Sanidine, sondern um eine viel rascher voranschreitende Kaolinisierung der Grundmasse. Darin zeigt sich ein Angriff der Rauchgasverwitterung auf die in der Grundmasse enthaltenen Plagioklase, allerdings wohl in Zusammenhang mit der hydrolytischen Spaltung der Silikate und der Kohlensäureverwitterung. Es wäre sehr wünschenswert, daß einmal diese Verwitterung der Drachenfelstrachyte noch eingehender als bisher untersucht würde. Aus dieser Untersuchung könnten sicher auch mannigfache Folgerungen in bezug auf die normale Verwitterung gezogen werden.

b) Wie der Drachenfelstrachyt, so ist auch der in der petrographischen Literatur gut bekannte Riebeckittrachyt von der Hohenburg bei Berkum, südwestlich von Godesberg, längere Zeit am Kölner Dom verwandt worden. Es ist dies ein schon den Römern bekanntes und im Mittelalter außerordentlich häufig verwandtes Gestein, das wir an sehr vielen Bauten wiederfinden. Aber das Gestein zeigt in den größeren Städten und so besonders auch am Kölner Dom eine starke Verwitterung²⁾ unter schuppiger Abblätterung von der Oberfläche. Der Vorgang ist ganz ähnlich der Abblätterung bei der Sulfatverwitterung von Sandsteinen (Stubensandstein aus Württemberg³⁾),

¹⁾ Die geringe Menge an K_2O in den Ausblühungen eines Trachytes vom Drachenfels weist schon darauf hin, wie gering der Angriff auf die Sanidine ist. Die plagioklasreichere Grundmasse wird viel stärker angegriffen.

²⁾ Auch A. v. Lasaulx spricht sich 1882 ungünstig über die Haltbarkeit des Gesteines von der Hohenburg bei Berkum aus.

³⁾ Vgl. E. Kaiser, 1907; Oberkirchner Sandstein, vgl. Blanck und Rieser, 1928; Grünsandstein von Soest, vgl. Zöllner, 1927 usw.

nur tritt die sonst fast immer angegebene äußere verhärtete Zone nicht so hervor. Unter einer, meist nur 1 mm dicken Rinde zeigt sich eine weiße Kruste, sodann eine zermürbte, in dünnen Lamellen abschilfernde Zone und sodann erst das frische Gestein. Die qualitative Analyse der weißen Ausblüfung, die selbstverständlich nicht vollständig rein gewonnen werden konnte, ergab neben wenig Kalk nur Spuren von Magnesia, sehr wenig Kali, sehr viel Natron, keine Kohlensäure, aber sehr viel Schwefelsäure. Auch ohne Durchführung einer quantitativen Analyse ist der Befund dahin zu deuten, daß diese Ausblüfung im wesentlichen aus Natriumsulfat mit wenig Gips besteht. Dünnschliffe des verwitterten Gesteins zeigen die Natronhornblende (Riebeckit) stark verwittert, während die Umwandlung des Feldspats weniger stark vorangeschritten ist. Auch hier hat die Sulfatverwitterung eine Zermürbung des Gesteins bedingt.

c) Eine ganz besonders starke Zermürbung zeigt auch der Andesit, der am Kölner Dom aus älteren Brüchen sowohl an der Wolkenburg wie am Stenzelberg verwandt worden ist. Eingehendere chemische Untersuchungen über die Verwitterung desselben liegen nicht vor¹⁾. Es ist aber anzunehmen, daß die Bestimmung der neugebildeten löslichen Verwitterungssalze nichts wesentlich Neues für den Verwitterungsvorgang der Bausteine im ganzen erbringen wird, und daß sich auch beim Andesit Sulfate (vielleicht neben Karbonaten und Bikarbonaten) als wichtigste im Gestein wandernde Salze werden nachweisen lassen. A. von Lasaulx betont bereits 1882 die leichte Verwitterbarkeit des Gesteins von der Wolkenburg und führt sie — irrtümlich — auf die im Gestein primär vorhandenen feinen Adern und Schnüre von Calciumkarbonat zurück. Dagegen hält von Lasaulx das Gestein vom Stenzelberg für wetterbeständiger. Der heutige Zustand der aus diesem Gestein errichteten Bauteile zeigt aber, daß dies Urteil nicht richtig war. Es muß bei späterer Gelegenheit einmal auf diese intensive Verwitterung des Andesits vom Stenzelberg zurückgekommen werden.

d) Es möge aber ausdrücklich nochmals betont werden, daß zumeist verschiedenartige Verwitterungsvorgänge nebeneinander herlaufen. Gerade die Eruptivgesteine geben zu einer derartigen Bemerkung Anlaß. Wenn wir nicht immer in jedem einzelnen Falle auf die Karbonat- und die verschiedenen Sulfatneubildungen hinweisen, so liegt das daran, daß wir in erster Linie immer die leichtlöslichen

¹⁾ Eine Untersuchung der Verwitterungsrinde des Andesites vom Stenzelberge zeigte in H_2O 0,34, in H_2O_2 0,57% lösliche Substanz. In beiden Lösungen war Magnesiumsulfat vorwiegend. In der H_2O -Lösung waren Fe und Al nicht nachweisbar, während sie sich in der H_2O_2 -Lösung in größeren Mengen nachweisen ließen!

Salze hervorheben mußten. Denn gerade diese werden in den Quadern des Bauwerkes immer wieder von neuem aufgelöst, daraufhin beim Abtrocknen wieder auskristallisiert und tragen damit zu der Zermürbung des Bausteines unter der äußeren, durch Karbonate, Sulfate, Sulfite und vielleicht auch noch andere Salze gehärteten Schale ganz besonders bei. Wir können heute bei der Sulfatverwitterung der Eruptivgesteine an den Bauwerken noch nicht das abtrennen, was auf hydrolytische Einwirkung des eindringenden Wassers und was auf die normale Luftkohlendioxid- oder deren Verstärkung durch die Großstadtatmosphäre zurückzuführen ist. Jedenfalls aber können wir feststellen, daß verschiedene Eruptiva durch die Einwirkung der schwefeligen Säure der Großstadtluft ganz intensiv verwittert werden.

Selbst Granite zeigen in der Großstadtatmosphäre Schalenverwitterung, ganz ähnlich der für Sandsteine von verschiedenen Orten beschrieben.

3. Über Beobachtungen im abgekürzten Verwitterungsversuch.

Schon vorher (S. 308ff., 322) haben wir den Fall betrachtet, daß durch die Einwirkung der Großstadtluft sich die Bauten, welche aus Kalken errichtet worden sind, mit einer äußeren Haut überziehen, welche sogar poröse Kalksteine gegen die äußere Einwirkung wenigstens bis zu einem gewissen Grade schützt. Es war nun möglich, bei abgekürzten Verwitterungsversuchen diesen Vorgang etwas näher zu beleuchten. Aus den vielen verschiedenen Versuchen dieser Art, welche sich an einen Vorschlag von H. Seipp anlehnen und bei deren Durchführung mich während meiner Gießener Zeit besonders die Herren Dr. Danne mann (im Kriege gefallen), Dr. Küster, Dr. Lotz und Dr. Flörke unterstützt haben, möchte ich einige wichtige Folgerungen hier hervorheben. Die in vielen Zahlenreihen niedergelegten Ergebnisse der verschiedensten Verwitterungsversuche werde ich aber erst dann vorlegen, wenn die jetzt endlich wieder erneut aufgenommenen Versuche weiter fortgeschritten sind, so daß dann ein größerer Überblick gegeben werden kann. Es sei aber zum Verständnis der vorzuführenden Ergebnisse der Beobachtungen bei den Verwitterungsversuchen die Untersuchungseinrichtung wenigstens kurz skizziert.

Die eine Versuchsanordnung ermöglichte die Behandlung je einer Probeplatte (meist 3:7:1 cm Größe) in einem Glaszylinder, in welchem die Platte freischwebend aufgehängt war. Die Gefäße waren hintereinander geschaltet und durch Glasrohre mit kurzem Gummischlauch verbunden. Der Abschluß der einzelnen Gefäße erfolgte dadurch, daß die Zylinder einige Zentimeter hoch mit Wasser gefüllt waren und das

Zuleitungsrohr bis in das Wasser führte. Damit war eine an Wasserdampf gesättigte Atmosphäre in jedem Gefäß und ein Abschluß der Gasräume gegeneinander gewährleistet. Ein Gasstrom wurde in bestimmten Zeitabständen durchgeleitet, der aus Luft, Kohlensäure und schwefliger Säure in wechselnden Verhältnissen bestand. Kohlensäure und schweflige Säure wurden entwickelt durch Einlaufenlassen einer Lösung von Natriumkarbonat und Natriumsulfit in konzentrierte H_2SO_4 . Der Luftstrom aus einem Gasometer wurde durch die Schwefelsäure geleitet, in welche entsprechend dem gewünschten Verhältnis nun die möglichst konzentrierte Lösung der beiden Salze eintropfte.

Eine andere Versuchsanordnung ermöglichte die Behandlung von Probplatten oder Probwürfeln, welche in offenen Glasstutzen freischwebend aufgehängt waren, in einem gemeinsamen größeren gut abgedichteten Glaskasten oder in großen Glasflaschen. Auch hier wurde in das Gefäß in bestimmten Zeitabständen ein Gasstrom eingeleitet, der je nachdem gleiche oder ungleiche Teile von SO_2 und CO_2 enthielt. Die Versuchskörper verwitterten hier nicht in voneinander abgeschlossenen Gasräumen, sondern in einem gemeinsamen Gasraume, so daß die Unterschiede verschiedener Absorptionsfähigkeit der Probekörper gegenüber dem zugeleiteten Gasgemisch sich bemerkbar machen konnten. Aber der eine Apparat war viel leichter zu dichten als die vielen einzelnen. Auch andere Vorteile waren für die Durchführung dieser einfacheren Anordnung maßgebend, deren Ergebnisse immer wieder nachkontrolliert wurden durch Verwitterung in Einzelgefäßen. Dauer der Versuche 14—21 Tage.

Die vor und nach dem Versuch — nach Trocknen bis zur Gewichtskonstanz — gewogenen Körper wurden in H_2O oder $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2$ ausgelaut. Die ausgelauten löslichen Salze wurden quantitativ bestimmt.

Die Beurteilung der Gesteine für den Ersatz ist in vielen Fällen (nicht nur am Kölner Dom) von den Ergebnissen dieser Verwitterungsversuche wesentlich beeinflußt gewesen. Selbstverständlich wurden aber auch die natürliche Verwitterung am Gewinnungsorte, die Strukturverhältnisse und die Zusammensetzung auf Grund von mikroskopischen und chemisch-analytischen Untersuchungen, besonders auch die Porosität und alle anderen wichtigen Eigenschaften für die Beurteilung mit herangezogen.

Die Untersuchung erfolgte in einer Atmosphäre, welche gegenüber selbst der an Rauchgasen reichsten Großstadtluft zunächst sehr stark an schwefliger Säure angereichert war.

Wenn Bedenken gegen diese Untersuchungen wohl ausgesprochen werden können, so lassen sich jetzt, nachdem zum Teil über 20 Jahre seit den ersten Vorschlägen für die Ersatzarbeiten verflossen sind, durch die Beobachtungen an den damals mit dem vorgeschlagenen

Material erneuten Bauteilen (nicht nur am Kölner Dom) kontrollieren. Doch soll über alle die praktisch wichtigen Folgerungen, wie gesagt, erst dann berichtet werden, wenn nochmals größere Versuchsreihen durchgeführt sind. Ein Vergleich der hier angedeuteten abgekürzten Verwitterungsversuche mit der Verwitterung an Probekörpern, welche an drei Orten mit verschiedenem Klima Anfang 1914 aufgestellt waren und deren Verwitterungslösung durchlaufend aufgefangen und untersucht werden sollte, ist durch die Kriegsverhältnisse undurchführbar geworden. Nach dem Kriege fehlte es an den notwendigen Mitteln, um die Apparatur wieder neu aufzustellen. Einiges soll aber demnächst, so weit das Material noch zu retten war, in der in Aussicht genommenen Arbeit wiedergegeben werden.

Hier soll aber zunächst auf zwei allgemeinere Beobachtungen hingewiesen werden, welche sich bei diesen abgekürzten Verwitterungsversuchen bemerkbar machten.

4. Bedeutung der Gasabsorption.

Alle Karbonatgesteine zeigten bei den Verwitterungsversuchen eine sehr große Absorptionsfähigkeit gegenüber der zugeleiteten schwefligen Säure wie gegen andere Gase. Wenn ein Gemisch von gleichen Teilen SO_2 und CO_2 zugeleitet wurde, so war letztere sehr viel früher am Ende der Versuchsflaschen bemerkbar als erstere. Das wurde sowohl an dichten wie porösen Karbonatgesteinen (Kalken, dolomitischen Kalken und Dolomiten) wie bei Sandsteinen mit karbonatischem Bindemittel nachgewiesen. Es wundert uns auch nicht, daß verschiedene Gase in ganz verschiedenem Maße absorbiert werden.

Wir leiteten durch eine größere Versuchsreihe zur Prüfung der Dichtigkeit der Einzelgläser ein mehrfaches Quantum des Gasinhalts der Versuchsgefäße an Leuchtgas. Es bedurfte eines sehr großen Quantums Leuchtgas, um dieses am Ende der Versuchsreihe nachzuweisen. Auch an etwaigen Undichtigkeiten der Versuchsgläser war kein Gasgeruch bemerkbar. Wie wir dann unseren Verwitterungsversuch mit einem Gasgemisch von Luft, SO_2 und CO_2 mit täglichem Einleiten eines Gasquantums, wiederum des mehrfachen Volumens der Gefäße, begannen, war noch mehrere Tage lang der Leuchtgasgeruch am Ende der Versuchsreihe bemerkbar, dagegen der SO_2 -Geruch sehr gering. Andererseits wurden bei Versuchen, in denen je sechs Kalke in einem einheitlichen Gasraum dem Verwitterungsversuch mit 80% Luft, 20% CO_2 und 1% SO_2 unterstellt wurden, die zugeleiteten Gase auf ihren SO_2 -Gehalt untersucht. Sofort und 2—3 Stunden nach dem Durchleiten des SO_2 -haltigen Gasstroms wurden weitere Gasproben entnommen und analysiert. Wenn der zugeleitete Gasstrom 1% SO_2

enthielt, so war der SO_2 -Gehalt der Versuchsgefäße sofort nach dem Durchleiten höchstens 0,2%, meist weit geringer. Schon einige Stunden nach dem Durchleiten war kein SO_2 mehr in den Versuchsgefäßen nachzuweisen. Die schnelle Absorption der SO_2 erlaubte es nicht, den Gehalt der Gefäße, bei 1% SO_2 im zugeleiteten Gasstrom, auf über 0,2% zu steigern.

Die starke Absorption eines Gases und der Nachweis eines Austausches verschiedener Gase gegeneinander bei unseren Verwitterungsversuchen hat zweifellos auch bei den Bauten besondere Bedeutung. Der Fortgang der Verwitterung wird zweifellos durch Absorption und Austausch der Gase beeinflusst. Auch in der Natur werden Absorption und Austausch eine Rolle spielen! Ja, nach den bisher vorliegenden Ergebnissen von Verwitterungsversuchen muß ich schließen, daß aus einem Gasgemisch, welches nur eine geringe Menge eines absorptionsfähigen Gases enthält, dieses in großen Mengen absorbiert und chemischen Prozessen am Gestein zugeführt werden kann. Die Absorption von SO_2 findet bei Karbonatgesteinen schon in trockenem Zustand, aber noch mehr bei befeuchteten Gesteinen statt. Damit kommen dann verhältnismäßig konzentrierte Gase bzw. Lösungen zur Einwirkung auf das Gestein. Das spielt sicher auch bei der Verwitterung in der Natur eine Rolle. Es geht über den Rahmen der hier beabsichtigten Mitteilungen hinaus, die Frage der Absorption der verschiedenen Gase für die chemische Verwitterung in der Natur weiterzuprüfen. Jedenfalls würde es aber sehr erwünscht sein, wenn Vorgänge dieser Gasabsorption an verschiedenen Gesteinen überprüft und daraus vielleicht das eigenartige Verhalten vieler sich gut haltender Felsen erklärt würde. Ich denke dabei wiederum an die Schutzrinden, die wir im „Wüstenlack“ so besonders intensiv, aber nicht immer gerade in der Wüste, sondern auch anderwärts finden (vgl. S. 296). Aber darüber hinaus haben wir Rinden ohne Färbung, oft auch ohne Lackglanz, oft an ganz unscheinbaren Gesteinen und selbst an völlig ausgetrockneten Stücken in den Sammlungen. Ich spreche oft von der „Museumshaut“ der Handstücke unserer Sammlungen. Nicht immer ist sie durch die Abtrocknung einer an die Oberfläche zurückgetretenen Lösung entstanden. In vielen Fällen handelt es sich um die Absorption von Gasen an der Oberfläche. Das sollte weiter nachgeprüft werden!

Es zeigte sich weiter, daß die Absorption der SO_2 zuerst ganz an der Oberfläche stattfindet und daß auch bei unseren Verwitterungsversuchen Bildung von Calciumsulfit und Calciumsulfat nebeneinander hergeht. Auf S. 308ff. wurde das Auftreten einer Schutzrinde an den aus Kalk errichteten Bauten der Großstädte besprochen. Ein entsprechender stark glänzender wie poliert aussehender Überzug stellte

sich in verschiedenen Fällen unserer abgekürzten Verwitterungsversuche (bei Verwitterung im SO_2 -haltigen, dagegen nicht im nur CO_2 -führenden Gasstrom) als eine Calciumsulfitrinde heraus. Diese glänzende Oberfläche blieb beim Auslaugen mit reinem Wasser unverändert, wogegen sie sofort verschwand, wenn man dem reinen Wasser ein wenig Wasserstoffsperoxyd zusetzte. Die ganze, in den Probekörpern enthaltene Gipsmenge konnte nicht ausgelaugt werden, ehe nicht die Calciumsulfithaut entfernt war. Die Calciumsulfithaut übt also in den Laboratoriumsversuchen auch eine wasserabweisende Wirkung aus und schützt die darunter befindlichen leichter löslichen Salze gegen Auflösung und vor dem schädlichen Wandern im Gestein. Dabei ist diese neugebildete Calciumsulfithaut nach den Analysenziffern äußerst dünn.

Konnten wir auch an den aus Bauten entnommenen Werksteinen das Auftreten von Calciumsulfid an der Oberfläche durch Auslaugen mit H_2O und H_2O_2 sehr wahrscheinlich machen, so zeigen uns diese Laboratoriumsversuche zunächst einmal die große Absorptionsfähigkeit der Kalke gegenüber einer an SO_2 allerdings angereicherten Luft. Wir können weiter uns leicht davon überzeugen, daß die Calciumsulfithaut das Gestein stark dichtet, die Poren schließt und die Aufsaugfähigkeit des Gesteins für auffallendes Wasser sehr herabsetzt. Zur Feststellung dieser Dichtung benutze ich eine sehr einfache, leicht durchzuführende und relative Werte rasch gebende „Tropfenmethode“, die ich 1910 beschrieb und zu der H. Seipp Zusätze und theoretische Erläuterungen gab. Man läßt aus einer Bürette Tropfen immer der gleichen Größe aus etwa 1,5 cm Entfernung auf die zu untersuchende Platte fallen und beobachtet das Verschwinden des Tropfens, selbstverständlich bei möglichst gleichmäßiger Wassersättigung des Versuchsraumes. Absolute Werte werden ja auch nicht benötigt. Das Aufsaugvermögen steht dann im umgekehrten Verhältnis zu der Zeit, die bis zum Verschwinden des Tropfens verfließt. Das Aufsaugvermögen ist bei den frischen Gesteinen sehr stark abhängig von der Art der Bearbeitung. Es schwankt selbstverständlich bei Unregelmäßigkeiten der Porosität. Die verwitterten Platten zeigen uns ein sehr herabgemindertes Aufsaugvermögen. Schon Platten, die nur dem CO_2 -Strom ausgesetzt waren, sind gedichtet. Auch dort ist eine Schutzschicht gebildet, die aus schwer löslichen Karbonaten besteht. Im SO_2 - CO_2 -Gasstrom kommen Karbonate, Sulfite und Sulfate in Frage. Je dichter ein Gestein schon primär ist, um so dichter und wasserabweisender ist die neugebildete Schutzschicht. Schon primär völlig dichte Gesteine lassen eine Neubildung durch die „Tropfenmethode“ nur schwer erkennen. Solch dichte Gesteine haben aber

namentlich gegen die Frostgefahr äußerste Bedenken, so daß sie bei Renovationsarbeiten schon an und für sich ausscheiden. Aber bei feinporösen Gesteinen ist der Grad der Sulfitdichtung äußerst wichtig. Poröse Kalke absorbieren nach den Laboratoriumsversuchen rasch eine so große Menge von SO_2 , daß alle Poren bald gedichtet sind und Feuchtigkeit, wahrscheinlich auch Gase nicht mehr in das Innere dringen. Bildet sich eine solche Schutzschicht nicht, so kann die Wirkung der an das Gestein herantretenden Gase tiefer in das Innere dringen.

Aus mehreren Mineralien aufgebaute Gesteine bedingen zweifellos eine Unterbrechung der Schutzschicht. Karbonatsandsteine zeigen nicht die gleiche Schutzdichtung wie reine Karbonatgesteine. Damit erklärt sich auch zum Teil schon der schlechte Erhaltungszustand solcher zusammengesetzter Gesteine.

Wir betrachteten diese Erscheinungen nach den reinen Laboratoriumsversuchen, deren Ziffernergebnisse ich hier nicht alle anführen kann. Sie lassen sich ja auch verhältnismäßig leicht nachkontrollieren. Wir können aus diesen Betrachtungen aber auch Folgerungen für die natürliche Verwitterung ableiten. Wie auf S. 310 bereits angeführt, beobachtet man eine äußere glättende Rindenbildung auf vielen Karbonatgesteinen in der freien Natur. An Sulfite möchte ich nicht denken. Aber sicher wäre es sehr wünschenswert, wenn die oft lackartigen Rinden an den Karbonatfelsen einmal auf ihre Zusammensetzung nachgeprüft würden. Sehen wir von den leicht abtrennbaren Fällen ab, in welchen eine junge Kalkübersinterung diese Glättung bedingt, so werden auch dort zweifellos ähnliche Gasabsorptionen wie bei unseren Laboratoriumsversuchen eine Rolle spielen. Die selektive Absorptionsfähigkeit der Gesteine gegenüber verschiedenen Gasen und Gasgemischen sollte dabei nachgeprüft werden. Vielleicht stellt sich dabei heraus, daß doch Gase, die nur in äußerst geringer Menge der Luft des betreffenden Ortes beigemischt sind, auch bei der natürlichen Verwitterung eine sehr große Rolle spielen. Andererseits muß zweifellos, wie bei den Laboratoriumsversuchen, so auch in der Natur, die Schutzrindenbildung von der Zusammensetzung und dem Gefüge des umgewandelten Gesteins abhängen. Örtlich mögen ganz besondere edaphische oder (bzw. und) klimatische Faktoren die Schutzrindenbildung besonders beeinflussen. Das mag für Einzelgebiete der Verbreitung sogenannten Wüstenlackes in dem auf S. 328 erörterten Sinne gelten. Neben den bisher verfolgten Wegen der direkten Ausscheidung aus den wässerigen Lösungen sollte der Bedeutung der Gase für die Rindenbildung Beachtung geschenkt werden. Ich kann die Arbeitsmöglichkeiten nach dieser Richtung nur andeuten.

5. Photochemische Einflüsse bei der Verwitterung.

Eine andere Frage, welche bei den Laboratoriumsversuchen zur Prüfung der Wetterbeständigkeit einzelner Bausteine immer wieder auftauchte, waren photochemische Einflüsse auf den Verwitterungsvorgang. Viele Verwitterungsversuche hatten immer wieder gezeigt, daß sich selbst bei dem gedämpften Lichte eines Kellerraumes, in welchem die Versuche der gleichmäßigen Temperatur wegen vorgenommen wurden, die dem Lichte zu- und abgewandte Seite des Versuchskörpers verschieden verhielten. So zeigte sich schon bald nach Beginn der Versuche auf der belichteten Seite eine tiefere Braunfärbung und damit eine Beeinflussung der Umwandlung der meist schwach eisenhaltigen Versuchskörper. Weitere Beobachtungen an der gleichen Versuchsreihe ergaben dann, daß die auf der stärker belichteten Seite braunfleckig gewordenen Versuchsplatten von einem weißen Überzug überdeckt wurden, welcher weiteren Eingriff der Gase auf die eisenhaltigen Partien der Versuchskörper verhinderte. Wieder andere Versuchskörper zeigten mechanische Einwirkungen nicht auf der belichteten und unbelichteten Fläche gemeinsam oder nicht in der gleichen Intensität. Bei Versuchen mit Würfeln zeigte sich oft die oberste am stärksten belichtete Fläche besonders zerrissen. Andererseits wurde festgestellt, daß die belichtete Fläche von Kalken einen stärkeren Calciumsulfidgehalt zeigte als die unbelichtete Fläche.

Um nun festzustellen, ob wirklich bei der Verwitterung von Kalken in einem SO_2 enthaltenen Gasstrom eine Lichtwirkung eintritt, wurden ein feinporiger Muschelkalkstein von Hartheim in Unterfranken und ein dichter Dolomit so untersucht, daß je eine Platte der beiden Gesteine belichtet, je eine andere Platte derselben Gesteine unter Lichtabschluß dem Gasstrom ausgesetzt wurden. Jeweils das im Licht verwitternde Stück hatte geringeres Gewicht und damit kleinere den Gasen ausgesetzte Oberfläche als das im Dunkeln verwitternde Stück. Aber trotz kleinerer Oberfläche zeigten die im Lichte verwitternden Stücke stärkeren Angriff. Die Verwitterung ist unter dem Einfluß des Lichtes bei dem Plattenversuch im Luft- SO_2 - CO_2 -Strom stärker als im Dunkeln. Ich gebe nur das Endergebnis des Versuchs: Der im Lichte verwitterte Dolomit zeigte noch eine Schalenverwitterung, wobei die Schale noch Karbonat enthält. Die dem Lichte zugewandte Seite zeigte die Abspregung deutlicher. Die Verwitterung der Dolomite ist wegen der mechanischen Abspregung zahlenmäßig schwer zu erfassen; es zeigte sich aber auch bei dem belichteten Dolomit die größere Menge von neugebildeten, in H_2O (bzw. $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2$) lösbaren Verwitterungssalzen. Bei dem Muschelkalkstein von Hartheim ergaben sich:

	belichtet	unbelichtet
Gehalt an CaSO_4	2,50	1,74
Gehalt an CaSO_3	0,41	0,21

bezogen in Prozent auf das Gesamtgewicht von Platte plus Auslaugestück nach Auslaugen der Versuchskörper. Die am stärksten angegriffenen Platten zeigen auch den höchsten Sulfitgehalt. Es sei nochmals hervorgehoben, daß ein großer Teil des löslichen Calciumsulfats erst dann auslaugbar war, wenn die äußere Sulfitkante durch Auslaugen mit Wasserstoffsulfoxid entfernt war.

Jedenfalls zeigen die bisher vorliegenden Beobachtungen, daß die chemische Verwitterung in der Richtung auf Bildung einer Calciumsulfitrinde unter Lichtwirkung stärker ist, als im Dunkeln.

Die Beobachtungen an den Bauten, aber auch in der Natur, führen aber immer wieder zu der Feststellung, daß im Schatten, unter Überhängen und unter leistenartigen Vorsprüngen in der Natur, unter Baldachinen, Rundstäben, in den Winkeln von Fialen und im Innern der Maßwerke eine viel intensivere Verwitterung sich zeigt als an der glatten Außenfläche und den in diesem Zusammenhange dem Lichte stärker ausgesetzten Seiten. Man spricht bei der Verwitterung in der Natur direkt von einer stärkeren Schattenverwitterung. Man wolle aber, wenn man die obigen Ergebnisse der Verwitterungsversuche auf die Natur übertragen will, sehr wohl beachten, daß hier noch ganz andere Erscheinungen hinzukommen. Wir stellen bei der SO_2 -Wirkung auf Kalke fest, daß die beleuchteten Stellen auch eine stärkere Calciumsulfitkante annehmen und damit wasserabweisender werden. Damit ist schon leichter chemischer Angriff in den lichtabgewandten Teilen erklärbar. Dazu kommt aber noch die verschiedenartige Abtrocknung an der glatten Außenfläche gegenüber Vertiefungen in der Natur wie an den verschiedenen Teilen architektonisch reichgegliederter Bauwerke. Oft nur kleine Unterschiede in dem Gefüge des verwandten Gesteins führen zu abweichenden Verwitterungserscheinungen. Fleckhaft setzt oft an einzelnen Quadern im Bauwerke, aber auch an einzelnen Felsen in der Natur, der chemische Angriff ein. Oft greift dann von diesen Stellen aus die Verwitterung weiter in die Umgebung fort. Die Verwitterungslösung dringt dann eben in die Umgebung des Entstehungsortes über und scheidet sich auf größerer Fläche aus. Hygrokopizität der ausgeschiedenen Salze kann schon zu einer Auflösung und Wiederausscheidungen und zu neuem Angriff führen. Die von den hygroskopischen Salzen aus der Luft aufgenommene Feuchtigkeit absorbiert dann aus der Luft Gase, in unseren Städten hauptsächlich SO_2 . Damit wird der Angriff verstärkt. Ein nur durch kleinsten Gefügeunterschied des Gesteins bedingter Angriff kann sich damit in

die weitere Umgebung fortpflanzen. Damit hängt dann zusammen, daß die an den Platten im abgekürzten Verwitterungsversuch beobachteten photochemischen Einflüsse sich an den Bauwerken wie in der Natur nicht so deutlich geltend machen. Die photochemischen Einflüsse werden durch andere überdeckt, sind aber sowohl für die Verwitterung an den Bauten wie in der Natur zu beachten.

6. Einfluß organischer Vorgänge auf die chemische Verwitterung der Bausteine.

Die Bedeutung der Organismen ist bei der Betrachtung der Verwitterung der Bausteine nur wenig Beachtung geschenkt worden¹⁾. Ich kann zur Beurteilung dieser Frage auch nur wenig beitragen, möchte aber auf einige Punkte hinweisen.

Flechten und Moose treten auf den Felswänden, aber auch an den Bauwerken eigentümlich fleckenhaft verteilt auf, ohne daß wir einen Grund für die eigenartige Verteilung erkennen. Die Verwesungsreste bilden auch mehr oder weniger fleckenhaft verteilte graue und schwärzliche Rinden auf der frischen Gesteinsfläche. Entfernen wir die Rinde, so sehen wir das Gestein darunter angefressen und oft gelockert²⁾. Diese dunklere Rinde ist reich an löslichen Verwitterungssalzen; an dem einen Orte nur an Sulfaten, an anderen Orten an Sulfaten und Chloriden. Die dunkle Färbung rührt größtenteils von dem an den Organismen festgehaltenen Staube, vor allem von Ruß her. Die dunkle Patina, die z. B. viele Kalke überzieht, kann damit einmal direkt von dem aus der Luft zugeführten Staub, andererseits aber auch von der auf dem Bauwerke angesiedelten Vegetation beeinflusst sein. Je trockener die Luft des betreffenden Ortes ist, um so geringer zumeist auch die Ansiedlung der Flechten und Moose. Feuchte Orte aber haben oft die Überkleidung weiter Bauteile mit Flechten und Moosen zur Folge. Dort ist dann der Angriff gerade der schwefligen Säure stärker. Die verwesende organische Substanz zeigte mir z. B. am Dome in Xanten in der feuchten Atmosphäre des Niederrheins eine sehr starke Absorption an schwefliger Säure.

Ich hatte 1907 bereits darauf aufmerksam gemacht, daß wir das gleiche Gestein ganz verschieden stark verwittert sehen, je nachdem es in einer Groß- oder Kleinstadt verwandt ist (Beispiel: Schwäbischer Stubensandstein in Köln, Stuttgart, an kleineren Orten Württembergs und endlich am Schlosse zu Neuschwanstein im Allgäu, hier

¹⁾ Angaben darüber bei Hirschwald 1908, S. 86ff., bei Seipp 1911, Herrmann 1916, Pollack 1923, Stiny 1929.

²⁾ Einen entgegengesetzten Fall des Schutzes durch Flechten beschreibt Seipp 1911, S. 27ff., 153ff. von Bauten bei Venedig.

prächtig erhalten gegenüber der starken Verwitterung am Kölner Dom!). Schon damals hätten die Feuchtigkeitsverhältnisse beachtet werden sollen, die bei den neueren Untersuchungen so besonders deutlich hervortreten. Nicht um die absoluten Niederschlagsmengen handelt es sich, sondern um die Dauer völliger Sättigung der Luft mit Wasserdampf. Schon die Großstädte mit ihrem lang anhaltenden Großstadtnebel beeinflussen ganz besonders die Wetterbeständigkeit der Bausteine. Kleinere Orte nahe der Meeresküste oder nahe großen Flüssen zeigen anderen Einfluß als solche weit ab von der Küste oder entfernt von den Flüssen. Diese Einflüsse hängen aber zum großen Teil mit der in feuchter Luft reicheren Flechten- und Moosansiedlung auf den Bauten zusammen.

Mehrfach wurde nun weiter bei Bausteinen (z. B. an der untersuchten Grünsandsteinquader vom Regensburger Dom) ein recht hoher Betrag an organischer Substanz auch in tieferen Teilen des Baues gefunden, ohne daß hierfür zunächst eine Begründung gegeben werden kann.

In diesem Zusammenhang möge darauf hingewiesen werden, daß namentlich in der englischen Literatur viele Angaben darüber vorhanden sind, daß die organische Substanz im Innern der Bausteinquader auf Bakterien zurückzuführen sei. Hörmann bezieht sich in dem am Schlusse dieser Mitteilung angegebenen Werke auf englische Untersuchungen, nach denen Bakterien bis 2 Fuß tief in das Gestein nachgewiesen seien. Die zerstörende Wirkung dieser Eindringlinge sei, nach englischen Forschern, für den Gesamteffekt manchmal größer als die der atmosphärischen Einflüsse. F. Rathgen hat aber schon früher (Tonindustrie-Zeitung 1911, 35. Jahrg., S. 86—87) bei Besprechung anderer englischer Untersuchungen über den Bakteriengehalt in verwitternden Bausteinen angeführt: „Sicher ist auch die Anwesenheit dieser Lebewesen schädlich; ich muß aber verneinen, daß sie allein die Ursache der Zersetzung sind.“ Diesem Urteil des auf dem hier erörterten Gebiete sehr verdienstvollen Forschers schließe ich mich an.

Wenn ich auch über weitere Untersuchungen auf diesem Gebiete nicht verfüge, so war es doch notwendig auf die von englischen Forschern mehrfach gemachten Angaben hinzuweisen und damit anzuregen, auch bei uns die etwaige Bedeutung dieser Organismen nicht außer acht zu lassen.

VIII. Zusammenfassung und Folgerungen.

Die vorstehenden Ausführungen sollen und können nur einen zunächst kleinen Auszug von vielen Untersuchungen geben, die ich seit 23 Jahren ausgeführt habe, womit ich zum Teil die an mich ge-

stellten Fragen durch Laboratoriumsversuche, durch Beobachtungen in der Natur und durch auf beide zurückgreifende Schlußfolgerungen zu beantworten suchte. Zum anderen Teil aber habe ich bei den Untersuchungen weitgehend wissenschaftliche Ziele verfolgen können.

Der Weltkrieg, die Bearbeitung meiner Untersuchungen während desselben und andere Umstände haben eine Veröffentlichung bisher hintangehalten. Ich hoffe aber bald, über ältere und jetzt erneut im Gange befindliche Untersuchungen weiteres berichten zu können.

Im folgenden seien zunächst einige der Hauptpunkte der vorstehenden Ausführungen, die sich hier absichtlich in erster Linie auf die chemische Verwitterung der Bausteine beschränkten, zusammengestellt und daran dann einige Folgerungen angeschlossen, welche sich aus den bisher vorliegenden Ergebnissen für die Fragen der Verwitterung in der freien Natur ergeben. Wie ich bisher möglichst vermieden habe, auf die abwegigen Ausführungen einzelner Autoren besonders aufmerksam zu machen, so sei das auch im folgenden weiter durchgeführt. Ich will damit unnötige Diskussionen zu vermeiden suchen. Andererseits habe ich an manchen Stellen angedeutet, wie viele Untersuchungsmöglichkeiten sich gerade auf dem hier erörterten Gebiete überall aufdrängen und ausgenutzt werden sollten. Damit gebe ich zu, daß auch meine Untersuchungen und Schlußfolgerungen nur ein Zwischenglied auf dem Wege zu einer endgültigen Erkenntnis der Bausteinverwitterung sind.

Es ist sehr bedauerlich, daß diese so überaus wichtige Frage der chemischen Verwitterung der Bausteine von Chemikern und Technikern, auch von den Materialprüfungsanstalten, so überaus nebensächlich behandelt wird. Die hier angeschnittenen Fragen müßten für die Beurteilung von Bausteinen in der heutigen Zeit viel eingehender und noch nach anderen Richtungen hin, als ich es durchführen konnte, geprüft werden. Denn wenn einmal eine wieder rege Bautätigkeit bei uns möglich ist, dann sollten die natürlichen Bausteine viel genauer, als bisher, in bezug auf ihre Wetterbeständigkeit bekannt sein, wenn man nicht an allen aus Natursteinen errichteten Bauwerken bald nach der Errichtung wieder an Erneuerung denken will! Denn die Verwitterung der Bausteine wird mit der Verfeinerung unserer Wohnungskultur immer stärker voranschreiten!

Aber zunächst eine Zusammenfassung einiger Hauptergebnisse der bisherigen Untersuchungen über die chemische Verwitterung von Bausteinen:

1. Neben der schwefligen Säure und der aus ihr hervorgegangenen Schwefelsäure, nach der allein bei den meisten Untersuchungen gefahndet wird, kommen noch viele andere, mehr oder weniger leicht-

lösliche Salze in Frage, welche im Gestein wandern und an der Oberfläche oder nahe unter ihr, zönenweise, auskristallisieren, bei erneuter Durchfeuchtung wieder aufgelöst werden, neu wandern und immer wieder in einer bestimmten Zone auskristallisieren. Es ist schon jetzt sicher, daß für jedes Salz eine optimale Zone der Auskristallisation vorhanden ist. Darüber wird noch näher berichtet, wenn weitere Vergleichs- und Kontrolluntersuchungen beendet sind.

Gerade das ständige Wandern und Wiederausscheiden bedingt die Zermürbung unter einer an der Oberfläche befindlichen härteren Schale, in welcher die Vorgänge der Karbonatneubildung unter normalen atmosphärischen Verhältnissen eine besondere Bedeutung haben.

2. Unter gewöhnlichen Bedingungen unserer Städte kommen für das Wandern Karbonate, Bikarbonate, Sulfate und Chloride in erster Linie in Frage. Neugebildetes Calciumkarbonat begünstigt oft eine Verhärtung der äußeren Schale. Der Hauptbereich der Ausscheidung der Sulfate liegt — soweit wir bis jetzt übersehen können — unter dieser neuen, meist dünnen Karbonatschale. Schon in der äußeren Schale treffen wir Sulfate, darunter aber angereichert hauptsächlich die Sulfate von Ca, Mg, Na, in speziellen Fällen selbstverständlich auch andere.

Die Chloride (bisher hauptsächlich Na, Ca, seltener K-Chloride nachgewiesen) sind nur hier und da in der Nähe der Oberfläche in erheblicher Menge festzustellen. Verschiedene Ursachen kommen für das Auftreten von Chloriden in Frage.

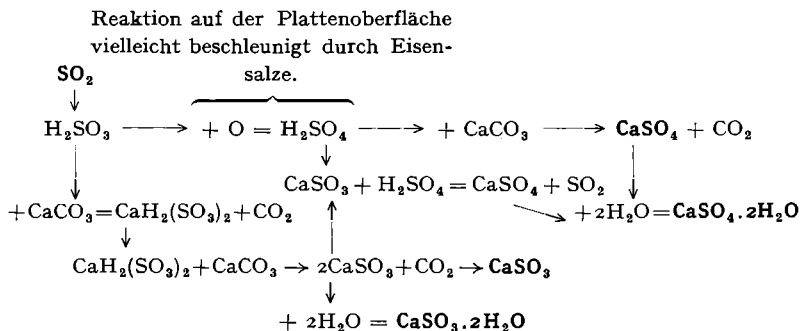
Ein näher untersuchtes Beispiel zeigte (Abb. 2) eine rasche Abnahme der Sulfate von Ca und Mg gegen das Innere der untersuchten Quader (Grünsandstein vom Regensburger Dom) hin. Demgegenüber stieg der Betrag an Chloriden an derselben Bausteinquader nach dem Innern hin gleichmäßig an.

3. Es scheint geradezu, daß die leichter löslichen Salze in das Bauwerk hineingetrieben werden, während die schwerer löslichen Salze in der Nähe der Oberfläche zurückbleiben.

Es ist aber anzunehmen, daß die Verteilung der löslichen Verwitterungssalze abhängt von der Durchlässigkeit des Gesteins, nicht direkt von dem Wasseraufsaugungsvermögen, sondern mehr von der geringen Durchfeuchtung und endlich von der Löslichkeit der einzelnen Salze. Gerade in dieser Richtung sollten neue Untersuchungen einsetzen. Ob das eine Beispiel des Grünsandsteins vom Regensburger Dom ausreichend ist, das werde ich durch chemische Untersuchung von ähnlich ausgewählten Proben verschiedener Eruptiv- und Sedimentgesteine nachzuprüfen suchen.

4. Die meisten Beurteiler der Rauchgasverwitterung betrachten nur die schweflige Säure in ihrer Einwirkung auf die Bausteine und beurteilen die Frage des Zerfalls durch chemische Einflüsse nur aus den neugebildeten Sulfaten.

Aber schon die Einwirkung der schwefligen Säure der Rauchgasatmosphäre führt zumeist zu Sulfiten. Das möge durch folgendes Schema dargestellt werden, welches die aus der chemischen Einwirkung der schwefligen Säure hervorgehenden Neubildungen andeutet:



Das neugebildete Calciumsulfit übt eine ganz besondere schützende Wirkung aus. Kalksteine werden dadurch geradezu imprägniert, so daß erst eine äußere Abwaschung erfolgen muß, ehe erneut Sulfate sich bilden können. Aber sofort, wenn eine Abwaschung vorher gebildeter Sulfiten und Sulfate durch den Niederschlag erfolgt ist, dann setzt auf dem vielleicht freigelegten Karbonatgestein zuerst sich doch wieder eine wenn auch noch so dünne Sulfit-
haut ab, welche wiederum schützt. Die Sulfatverwitterung von Kalksteinen wird durch die immer wieder sich erneuernde Calciumsulfit-
haut ganz wesentlich verzögert. Die gute Erhaltung vieler Kalksteine in einer an schwefliger Säure angereicherten Atmosphäre (Großstädte) ist ganz wesentlich durch diese Sulfitbildung bedingt. Die gute Erhaltung ist aber nicht allein abhängig von den chemischen Vorgängen. Deshalb sei hier ganz besonders darauf aufmerksam gemacht, daß zur Beurteilung der Wetterbeständigkeit eines Bausteines auch die Frost-
gefahr besonders beachtet werden muß. Andererseits sind grobporöse Kalke nicht so durch eine Calciumsulfit-
haut dichtungsfähig, wie feinporöse und dichte. Das Optimum der Wetterbeständigkeit liegt augenscheinlich bei feinporösen Kalken, was noch weiter untersucht werden sollte.

5. Es soll nicht behauptet werden, daß die einzige wasserabweisende Schutzschicht durch die Calciumsulfitrinde gebildet wird. Sicher werden spätere Untersuchungen noch andere Rinden feststellen.

6. Die polygenen Gesteine, mit verschiedenen Komponenten und verschieden stark entwickeltem Bindemittel zeigen eine geschlossene Rindenbildung durch Calciumsulfid auch bei kalkigem Bindemittel nicht. Deshalb sind — nach den bisher vorliegenden Ergebnissen — die reinen Kalksteine wetterbeständiger als Kalksandsteine. Sandsteine mit dolomitischem Bindemittel sind noch weniger wetterbeständig als Sandsteine mit rein kalkigem Bindemittel.

7. Verwitterungsversuche zeigten eine starke Absorptionsfähigkeit von Karbonatgesteinen gegenüber Gasen. Auch nur in geringer Menge dem zugeleiteten Luftstrom zugesetzte Gase wurden stark absorbiert. Wurden andersartig zusammengesetzte Gase über die Versuchskörper geleitet, so zeigte sich Austausch der absorbierten Gase. Es sollte systematisch nachgeprüft werden, welche Gase am stärksten absorbiert werden. Zunächst scheint schweflige Säure am stärksten aus einer an SO_2 armen Atmosphäre von Kalksteinen absorbiert zu werden.

8. Die Verwitterungsversuche zeigten eine Bedeutung der Lichtwirkung für einige Vorgänge der chemischen Verwitterung. Die dem Lichte abgewandten Seiten der Versuchskörper oder völlig abgeblendete Versuchskörper verwitterten sehr viel langsamer als die dem Lichte zugewandten oder ganz im Hellen verwitternde Versuchskörper. Nur scheinbar steht dem gegenüber, was bisher in der Literatur als Schattenverwitterung bezeichnet ist.

Suchen wir daraus nun Folgerungen für die Verwitterung in der freien Natur zu ziehen.

1. Auf den Felsen in der freien Natur bemerken wir in verschiedensten Klimaten schützende Häute, Rinden, Krusten und Schalen. In manchen Fällen sind diese oft unmeßbar dünnen Häute ihrer chemischen Zusammensetzung nach nicht faßbar. Wir sehen, daß viele dieser Häute die darunter befindlichen Gesteine gegen chemische Einflüsse der Atmosphären schützen. Aber nicht alles, was wir von Rinden kennen, ist eine chemische Neubildung. Ich machte bereits darauf aufmerksam, daß die durch die Korrasion, durch den Sandschliff der Wüste hervorgerufene äußere Glättung nichts mit chemischen Vorgängen zu tun habe. „Die Politur, die äußere Glättung ist keine Folge chemischer Vorgänge, sondern nur durch Korrasion bedingt. Selbstverständlich ist die Grenze schwer zu ziehen zwischen rein mechanischer Politur und den geringen, eine dünne Rinde bedingenden Ausschwitzungen . . .“¹⁾. Solche durch Korrasion bedingte

¹⁾ E. Kaiser, Diamantenwüste, Berlin 1926, II, 301.

Polituren treten auch anderwärts auf, sind nicht auf die Wüste beschränkt!

2. Sehen wir in den Trockengebieten der Erde, besonders in der Wüste, nicht überall gleichmäßig durchgehende Krusten- und Rindenbildungen, so mag dieser Wechsel zweifellos edaphisch bedingt sein. Aber das Hervortreten schwerer löslicher Salze an der Oberfläche, das auf besondere Gesteinsausstriche oder auf eindampfende Regen- und Endseen beschränkte Auftreten von leichter löslichen Salzen in den Trockengebieten der Erde findet durch den Vergleich mit der Bausteinverwitterung eine besondere Beleuchtung.

Kalkkrusten des Trockengebietes, stellenweise auftretende Gipsausscheidungen, nur selten nach Regenschauern oder Landregen auftretende Chlormagnesium- und Chlornatriumausblühungen sind besser erklärbar. Daß die Ausblühungen in den Trockengebieten zum Teil edaphisch, zum Teil klimatisch bedingt sind, habe ich bereits betont (Kaiser, 1928).

Es wäre sehr wünschenswert, daß auch in einem Wüstengebiet die Verteilung der verschiedenen Verwitterungssalze im Untergrunde näher untersucht würde. Es müßten entsprechend der Untersuchung an einem Bodenprofil oder an einer Bausteinquader die löslichen Salze in den Untergrund verfolgt werden.

3. Die Absorptionsvorgänge, wie wir sie für die Bausteine nachwiesen, spielen auch für die Verwitterungsvorgänge in der freien Natur eine Rolle! Das möchte ich als ein ganz wichtiges Ergebnis aus meinen Untersuchungen folgern. Ich weiß noch nicht, welche Gase in der freien Natur absorbiert werden. Aber bei weiteren Untersuchungen sollte man bedenken, daß Gasabsorption aus der Luft stellenweise bedeutend sein kann. Es ist wahrscheinlich, daß auf der durchfeuchteten Felsoberfläche eines Karbonatgesteins die Absorption der Kohlensäure eine besondere Rolle spielt, daß dann Calciumbikarbonatrinden einen dichtenden Einfluß ausüben. Ich halte es für sehr wahrscheinlich, daß auch in der Wüste die der Atmosphäre in ganz geringen Mengen beigemischten Gase eine ganz besondere Rolle für die Rindenbildung spielen. Ich habe bei meinen bisherigen Wüstenstudien der Krusten-, Rinden- und Schalenbildung noch nicht die Aufmerksamkeit geschenkt, welche vom Gesichtspunkt der hier erörterten Untersuchungen über die Bausteinverwitterung notwendig ist. Ich weise aber diejenigen, welche die Wüsten weiter studieren können auf diesen chemisch-geologischen Gesichtspunkt nachdrücklich hin.

4. Mannigfache Parallelen ergeben sich aus der Betrachtung der Verwitterung der Bausteine im ausgesprochen humiden Klima im Vergleich mit der Verwitterung in den Trockengebieten. Die früher gezogene Folgerung, daß wir im humiden Klima die Verwitterung

ariden Klimas sehen und von „Inseln aridem Klimas“ im humiden sprechen könnten, ist nicht mehr haltbar. Die gleichen Endprodukte der Verwitterung, sowohl gleiche Verwitterungsreste wie gleiche Verwitterungslösungen können sich, allerdings nur unter besonderen Umständen, unter dem Einfluß verschiedenartigen Klimas bilden.

Die bei der biologischen Betrachtung längst erkannte Konvergenz von Entwicklungsreihen kann auch auf die anorganischen Vorgänge übertragen werden. Sehen wir das gleiche Endprodukt der Verwitterung und der Sedimentation an der Erdoberfläche, so ist es noch nicht durch die gleichen äußeren Einflüsse bedingt!

Hiermit will ich besonders betonen, daß wir schon bei der vergleichenden Betrachtung der Verwitterungsreste, der damit zusammenhängenden chemischen Zusammensetzung des Grundwassers, weiter bei der Beurteilung von morphologischen Formen und endlich bei der Erklärung der Sedimentationserscheinungen genau zu prüfen haben, ob nicht durch das verschiedenartige Zusammenwirken von doch zum Schluß ganz entgegengesetzten äußeren und inneren Einwirkungen dasselbe Endprodukt erzielt worden ist. Wir dürfen also — mit anderen Worten — nicht so ohne weiteres aus den gleichen Endprodukten auf die gleichen Vorgänge zur Entstehung des Endproduktes zurückschließen.

5. Eine erste Rolle für die Konvergenzerscheinungen in der Ausbildung gleicher Endprodukte spielen die edaphisch bedingten Erscheinungen. Durch besondere Verhältnisse in dem strukturellen, chemischen und tektonischen Aufbau des Untergrundes können äußere Erscheinungen und Formen vorgetäuscht werden, die normalerweise nur unter ganz abweichenden klimatischen Verhältnissen auftreten sollten.

München, 27. April 1929.

Literatur.

Es können hier nur einige zusammenfassende Werke und eine Auswahl aus den vielen Einzelarbeiten über die chemische Verwitterung, besonders an Bausteinen, angeführt werden, letztere soweit sie in der vorliegenden Arbeit besonders benutzt sind oder besondere Gesteine behandeln:

Blanck, E. und Rieser, A., Über Verwitterungserscheinungen am Bremer Rathause (Chemie der Erde, Jena 1928, Bd. 4, 137—144).

Behrend, F. und Berg, G., Chemische Geologie, Stuttgart 1928. (Nur für die Fragen der chemischen Verwitterung in der freien Natur.)

Blanck, E., unter Mitwirkung von F. Kunz und F. Preiß, Die ariden Denudations- und Verwitterungsformen der sächsisch-böhmischen Schweiz als Folge organischer Verwitterungsfaktoren im humiden Klimagebiet (Tharandter forstliches Jahrbuch 73., 1922, 38—60, 93—134).

- Eibner, A., Zur Frage der Möglichkeiten konservierender Behandlung stark verwitterter mittelalterlichen Steinbauten in Beschränkung auf Feststellungen innerhalb Bayerns. (Zentralblatt der Bauverwaltung. Berlin 1927. 481—485.)
- W. Fischer, Verwitterungserscheinungen am Dresdener Zwinger (Natur und Museum, Frankfurt a. M. 1927, 57., 505—516).
- Gäbert, C., Steuer, A. und Weiß, K., Handbuch der Steinindustrie. Erster Band: Die nutzbaren Gesteinsvorkommen. Verwitterung und Erhaltung der Gesteine, Berlin 1915.
- Hertel, B., Auswahl und Behandlung der für Restaurationen in Betracht kommenden Materialien (Sonderdruck aus dem Stenographischen Bericht des 12. Tages für Denkmalpflege in Halberstadt 1912, 27 S.).
- , Die Wiederherstellungsarbeiten am Kölner Dome. Zeitschrift d. Rhein. Vereins für Denkmalpflege und Heimatschutz, 19. Jahrg., 1926, Heft 3, 39—91.
- Herrmann, O., Steinbruch-Industrie und Steinbruchgeologie, 2. Aufl., Berlin, Gebr. Bornträger, 1916.
- Hirschwald, J., Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit, Berlin 1908.
- , Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung, Berlin 1912.
- Hörmann, Hans, Denkmalpflege und Steinschutz in England. Veröffentlichung der Bayerischen Staatsbauverwaltung, München 1928. (Dort auch Angaben der wichtigeren neueren englischen Literatur über Verwitterung an den Hauptbauten Londons.)
- Kaiser, E., Der Stubensandstein aus Württemberg, namentlich in seiner Verwendung am Kölner Dom, N. Jb. f. Min., Geol. u. Pal. 1907, II, S. 42—64.
- , Über Rindenbildung an Kalksteinen („Der Steinbruch“, 1910).
- , Verwitterung. Zusammenfassender Artikel im Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Bd. 10, Jena 1915, S. 279—284.
- , Die Verwitterung der Gesteine, besonders der Bausteine (Handbuch der Steinbruchindustrie, Berlin 1915, Bd. I, 410—439).
- , Über edaphisch bedingte geologische Vorgänge und Erscheinungen (Sitzber. d. B. Akad. d. Wiss., München 1928, Math.-naturw. Abt., 37—70).
- Kühn, K., Steinverwitterung und Steinsicherung (Zs. f. Denkmalpflege 2. Berlin und Wien 1928. 77—84).
- Lasaulx, A. von, Die Bausteine des Kölner Domes, Bonn 1882.
- Pollack, V., Verwitterung in der Natur und an Bauwerken, Wien, Waldheim Eberle A.G., 1923. (Die Angaben über die chemische Verwitterung sind sehr verbesserungsbedürftig! Aber viel Literatur.)
- Rathgen, F., Verwitterung von Kalksteinen, Tonindustrie-Zeitung 1911, 35. Jahrg., 86—87.
- Report of the stone preservation Committee. Department of Scientific and Industrial Research. London 1927¹⁾.

¹⁾ Diese wichtige Arbeit, auf die ich erst durch die Arbeit von Dr. H. Hörmann aufmerksam wurde, ist mir durch dessen Vermittlung erst während der Drucklegung dieser Mitteilung zugegangen. Leider kann ich bei dieser Gelegenheit auf recht wichtige Einzelheiten der Untersuchungen an Bauten Englands nicht mehr eingehen. Es sei aber darauf hingewiesen, daß Scott Russell eine besondere Methode der Untersuchung auch der äußeren verwitterten Rinde in dieser Arbeit beschreibt.

- Schmöle, R., Der Baumberger Sandstein und seine Verwitterung (Dissert. d. Univ. Münster i. W., Druck: Halle 1926).
- Seipp, H., Die Wetterbeständigkeit der natürlichen Bausteine und die Wetterbeständigkeitsproben, mit besonderer Berücksichtigung der Dachschiefer, Jena 1900.
- , Die abgekürzte Wetterbeständigkeitsprobe der natürlichen Bausteine mit besonderer Berücksichtigung der Sandsteine, namentlich der Wesersandsteine, Frankfurt a. M. 1905.
- , Italienische Materialstudien, Stuttgart 1911.
- Stiny, J., Technische Gesteinkunde, Wien, J. Springer, 1929.
- Wagner, H., Über Verwitterung und Erhaltung der Bausteine („Der Steinbruch“ 1913, Heft 40—43).
- Weiß, Max, Die Rauchfrage in München, Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt 1907.
- Zöllner, P., Der Grünsandstein von Soest und seine Verwitterung (Zs. f. prakt. Geol. 35., 1927, 7—13).