

**Ergänzung 2 zu Posten 4****Zerfall des Sandsteins**

Die Türme der Stiftskirche mussten mehrmals tiefgreifenden Renovationen unterzogen werden, die letzten beiden Male von 1928 bis 1938 sowie von 2001 bis 2003. Der Sandstein war teils stark verwittert und deshalb flächig abgeblättert, besonders exponierte Bauteile waren sogar stückweise abgebrochen.

**Wir werden uns mit folgenden Fragen beschäftigen:**

- Weshalb ist Molassesandstein wenig verwitterungsresistent?
- Was lässt sich dagegen tun?



**Abb. 1:** Schäden vor der Renovation 1928-38 (Pfeil) und eingestützte Stiftskirche

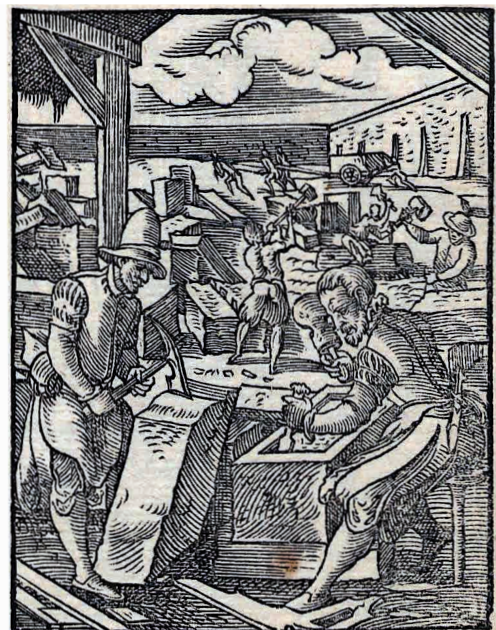


**Abb. 2:** Schäden vor der Renovation 2002-2003 und eingestützte Stiftskirche

**Sandstein - Fluch und Segen zugleich**

Viele sakrale Bauwerke in der Schweiz und in Deutschland sind aus Sandstein erbaut. So z. B. der Kölner Dom und der Dom in Freiburg im Breisgau, aber auch das Berner und Basler Münster oder das Zürcher Grossmünster. «Wenn der Dom fertig wird, geht die Welt unter.» So sagt der Volksmund in Köln über den dortigen Dom, an welchem 632 Jahre lang gebaut wurde, von 1248 bis 1880. Dasselbe gilt auch für Bern. Auch das dortige Münster wird aufgrund von einer geringen Verwitterungsresistenz des verwendeten «Berner» Molassesandsteins eine Baustelle für die Ewigkeit bleiben. Selten versteckt sich nicht die eine oder andere Seite des Berner Münsters hinter Baugerüsten, und ist die eine Seite fertig restauriert, beginnen die Arbeiten anderswo von Neuem. Ein klein wenig besser ergeht es Zürich, der dort häufig verwendete «Bollinger Sandstein» vom Oberen Zürichsee ist vergleichsweise weniger anfällig.

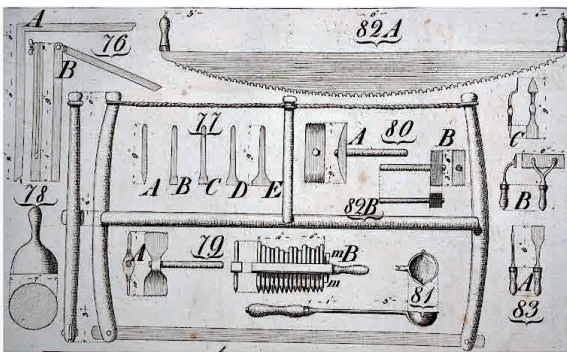
Der Molassesandstein ist kein hartes Gestein. Die Sandkörner sind nur schwach und auch nicht vollständig miteinander verbunden, wodurch der Sandstein fast wie ein Schwamm Wasser aufsaugen kann und nur langsam wieder austrocknet. Viele Mauern und kunstvoll von Steinmetzen geschaffene Verzierungen bröckeln deshalb langsam, aber stetig ab (Abb. 1,2). Dass dieses Gestein für Profanbauten wie Wehrtürme, Stadtmau-



**Abb. 3:** Steinmetze im 16. Jahrhundert bei der Arbeit



**Abb. 4:** Detailgenau aus dem Sandstein gehauene Figuren verdeutlichen, wie hervorragend Molasse-sandstein für feinste Bildhauerarbeiten geeignet ist.



**Abb. 5:** Steinmetz - Werkzeuge, abgebildet in einem «Lehrbuch der Baukunst» von 1820

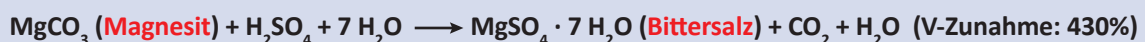
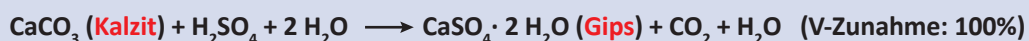
ern oder Wohnhäuser gewählt wurde, lässt sich durch seine leichte Verfügbarkeit in der unmittelbaren Umgebung der jeweiligen Städte erklären. Oft wurden die Mauern zum Schutz vor Verwitterung noch zusätzlich mit einem Mörtelüberzug versehen. Wieso aber wurde für wichtige, sakrale Bauwerke, die «für die Ewigkeit» hätten gebaut sein sollen, nicht ein dauerhafteres Gestein gewählt? Überall, wo Sandstein verwendet wurde, besass er zwei, für die damalige Zeit unabdingbare Eigenschaften, die ihn anderen Gesteinen gegenüber konkurrenzlos machten:

- Er war in geringer Distanz von der Baustelle in grosser Menge vorhanden. Dies senkte die Transport- und damit die Baukosten, besonders in jenen Zeiten bevor Eisenbahn und motorisierte Lastwagen existierten, als die Steine mühsam auf Pferdefuhrwerken transportiert werden mussten.
- Die Weichheit des Sandsteins ermöglichte es auch schon vor vielen hundert Jahren, sehr feine Verzierungen und Figuren aus dem Gestein heraus zu arbeiten, wie sie z. B. an der Stiftskirche in Form des barocken Figurenschmucks reichlich vorkommen (Abb. 4). Damals hatten die Steinmetze nur einfache, handgeschmiedete und nicht besonders harte Werkzeuge aus Eisen für ihre Arbeit zur Verfügung (Abb. 3, 5). Heute verwenden sie auch diamantbesetzte Fräsen und Pressluftgeräte.

Als mit dem Bau der meisten grossen sakralen Bauwerke aus Sandstein begonnen wurde, konnte man getrost damit leben, dass sich das Gestein bei Regen mit Wasser vollzog, denn es trocknete auch immer wieder aus. Sichtbare Schäden traten kaum oder erst mit grosser Verzögerung auf.

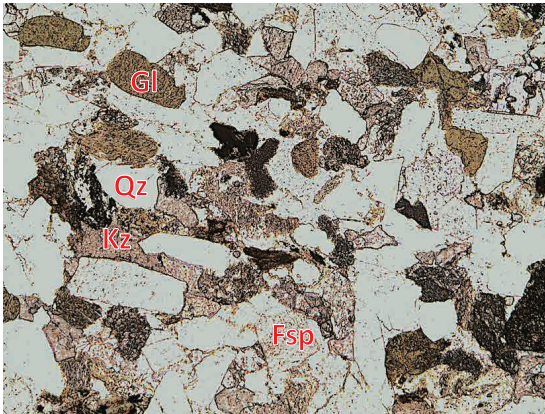
Mit der Industrialisierung, die in Mitteleuropa gegen Ende des 18. Jahrhunderts einsetzte, veränderte sich die Qualität der Luft jedoch grundlegend. Viele Industriebetriebe nutzten Kohle als Brennmaterial zur Produktion von Energie für ihre Maschinen. Der zunehmende Wohlstand in den Städten ging einher mit dem Verbrauch von Energie zum Heizen und für die Herstellung von elektrischem Strom. Dadurch wurden gewaltige Mengen an Abgasen ausgestossen, welche zusammen mit dem Regenwasser chemische Verbindungen bildeten, die tief in das Gestein eindrangen. Heute werden statt Kohle Erdöl und Erdgas verwendet. Obwohl Heizungen und Industrieanlagen technisch sehr ausgereift sind, gelangen jedoch noch immer grosse Mengen von Gasen in die Luft, welche die Bauwerke schädigen.

Fossile Brennstoffe enthalten beispielsweise einen geringen Anteil an Schwefel. Bei der Verbrennung entsteht daraus das Gas Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), das mit Luftsauerstoff und Regenwasser zu Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) reagiert. Dringt solch schwefelsäurehaltiges Regenwasser in die Poren von Sandstein ein, reagiert die Schwefelsäure mit dem Kalzit, der als Zement die Sandkörner zusammenhält (Abb. 7), zu Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , Abb. 6). Gipskristalle haben ein um hundert Prozent grösseres Volumen als die Ausgangsstoffe und üben beim Wachstum z. B. bei 70% Luftfeuchtigkeit und  $0^\circ\text{C}$  einen Druck von  $160 \text{ N/mm}^2$  auf ihre Umgebung aus. Wiederholtes Wachstum solcher Kristalle in den Gesteinsporen (Abb. 8) führt zur oberflächli-



**Abb. 6:** Beispiele chemischer Reaktionen von Mineralen in Gesteinen mit Schwefelsäure, die zu einer Volumenzunahme (V-Zunahme) führen.





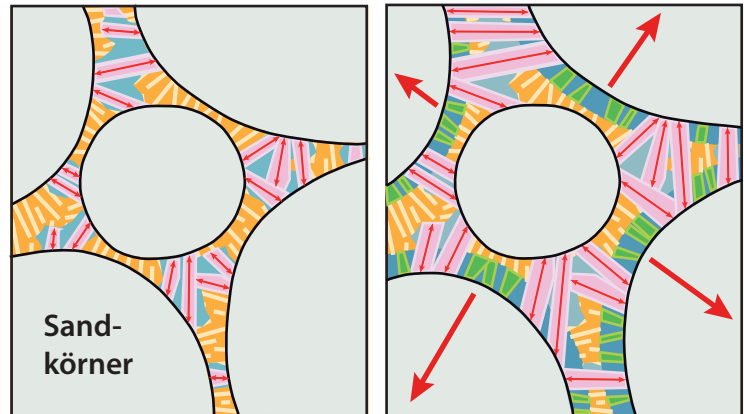
**Abb. 7:** Dünnschliffphoto eines Molassesandsteins, Vergrößerung ca. 25 x.

Qz: Quarz

Fsp: Feldspat

Gl: Glaukonit (grünlich-bläulich, gibt dem Gestein seine Farbe)

Kz: Kalzit, wächst als Zement in den Poren zwischen den anderen Mineralkörnern.



**Abb. 8:** Sprengung von Sandstein: In wassergefüllten Poren zwischen den Sandkörnern (hellblau) wachsen z. B. Gips- oder Steinsalzkristalle (rosa). Diese dehnen sich durch ihr Wachstum aus und drücken die Sandkörner auseinander. Dabei entstehen neue Hohlräume (dunkelblau), in welchen auch wieder Kristalle wachsen (grün). Auch diese drücken die Sandkörner weiter auseinander. So lösen sich die Sandkörner nach und nach voneinander ab und das Gestein bröckelt auseinander. Die roten Pfeile geben die Richtung der Ausdehnung an.

chen Lockerung des Gesteins und schliesslich zum Abblättern der Gesteinsoberfläche. Beispiele dafür findet man in allen Städten mit Bauwerken aus Molassesandstein (Abb. 9, 10).

Einen Ausdehnungseffekt von gar 430% hat das Wachstum von Bittersalz, das aus einer Reaktion des Minerals Magnesit mit Schwefelsäure entsteht (Abb. 6). Auch Steinsalzkristalle können in den Gesteinsporen wachsen (Abb. 11). Natriumchlorid wird vor allem im Winter über Wasser aufgenommen, das mit gelöstem Streusalz belastet ist. In porösem Sandstein kann Wasser wie in einem Schwamm durch die Kapillarkraft<sup>1</sup> in die Mauern aufsteigen.



**Abb. 9:** Stellen mit abblätterndem «Luzerner Sandstein» am Haus Bahnhofstrasse 16 in Luzern



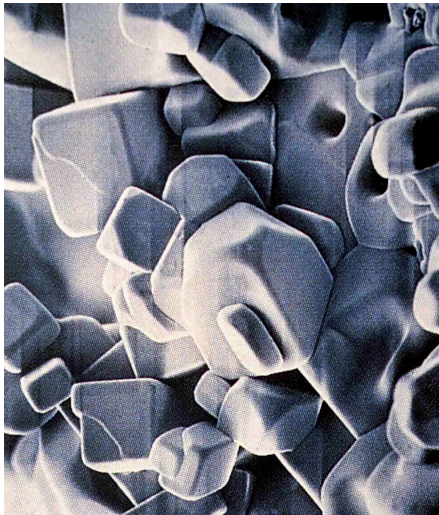
**Abb. 10:** Bei Feuchtigkeit wachsen in den Poren des Sandsteins feine Gipskristalle (weiss), die Schicht um Schicht des Gesteins abblättern lassen (Nydegghof, Bern).

### Münsterbauhütten

Etliche Städte mit grossen Sakralbauten – meist als Münster bezeichnet – aus verwitterungsanfälligen Sandstein betreiben sogenannte Münsterbauhütten. In der Schweiz sind dies Bern und Basel, in Deutschland z. B. Feiburg im Breisgau. Dies betrifft aber nicht nur Bauwerke aus Molassesandstein, auch der viel ältere rote Buntsandstein aus der Triaszeit kann verwitterungsanfällig sein, so z. B. im Fall von Basel und Freiburg im Breisgau. Auch St. Gallen betrieb für die grosse Renovation in den Jahren 1928-1938 vorübergehend eine Bauhütte (Abb. 12).

<sup>1</sup> Kraft, die Flüssigkeiten in einer Kapillare gegen die Schwerkraft nach oben steigen lässt. Ursache ist die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Kapillare.





**Abb. 11:** Rasterelektronenmikroskopische Fotografie von NaCl (Steinsalz)-kristallen, die Mauerwerk sprengen können, Bildhöhe 0.05 mm.



**Abb. 12:** Bauhütte auf dem Klosterplatz in den Jahren 1928 bis 1938

«Bauhütte» ist ein historischer Begriff für einen Werkstattverband, dem verschiedene Spezialisten wie Steinmetze, Zimmerleute, Maurer, Schmiede und Glaser angehören. Die Bauhütten waren früher streng hierarchisch organisiert und bewahrten ihre Berufsgeheimnisse im engsten Kreis. Sie hatten eine eigene Gerichtsbarkeit und politische Vertretung und waren für die Ausbildung junger Berufsleute besorgt. Viele grosse sakrale Bauten wie Münster, Dome und Basiliken wurden von Bauhütten gebaut, die nach der Fertigstellung aber meist aufgelöst wurden.

In Bern wurde in den 1880er-Jahren für die Aufstockung des Turmes von 61 auf 101 m eine neue Münsterbauhütte gegründet, die bis heute aktiv ist. Heute ist es ihre Aufgabe, den Zerfall des Berner Münsters so gut wie möglich aufzuhalten. Kaputte Steinblöcke werden laufend repariert oder ersetzt. Dabei kommen modernste Techniken zum Einsatz. So wird zum Beispiel mittels feiner Spritzen eine Flüssigkeit in Risse eingespritzt, die unter der Gesteinsoberfläche aushärtet und dadurch schadhaftes Gestein von innen verklebt und stabilisiert (Abb. 13).

Abgeblätterte Stellen werden mit Mörtel nachgeformt (Abb. 14). Manchmal müssen auch Teile vollständig ersetzt werden (Abb. 15, 16). Diese Arbeiten sind sehr aufwändig und können Jahre dauern.

An den Aussenmauern des Berner Münsters, die dem Wetter besonders ausgesetzt sind, gibt es nicht mehr viele Originalsteine aus der Zeit des Münsterbaus. Die meisten Steine wurden im Lauf der Zeit ersetzt, oft sogar mehrmals. Dabei wurde auch Sandstein aus Zug oder sogar St. Margrethen in der Region Bodensee verwendet. Das Vermischen unterschiedlicher Gesteinstypen mit unterschiedlichen Eigenschaften



**Abb. 13:** Injektion einer Flüssigkeit, die in den Rissen aushärtet und den beschädigten Stein stabilisiert. Dafür wird eine medizinische Spritze verwendet.



**Abb. 14:** Reparatur einer abgeblätterten Stelle durch das Auftragen von Spezialmörtel und feinen Netzen.



**Abb. 15:** Herstellung eines neuen Steins als Ersatz durch einen Steinmetz mit traditionellem Werkzeug.

ten schuf jedoch weitere, noch grössere Probleme. Härtere Steinblöcke «erdrücken» die Weicheren, wodurch erst recht Risse entstehen und die Steine abblättern. Seit dem Jahr 2000 wird viel weniger ersetzt und dafür mehr durch die Injektion von Klebstoffen und das Auftragen von Mörtel repariert.

Eine radikale Lösung wurde in Zürich gewählt, wo die Fassadenverkleidung des ETH-Hauptgebäudes, die in den 1860er-Jahren aus Berner Sandstein errichtet wurde, bereits ab 1921 durch einen sehr soliden, farblich kaum unterscheidbaren Kunststein aus Zement, weissem Quarzsand und den Farbpigmenten Chromoxidgrün und Ocker ersetzt wurde. Mit der Zeit setzte sich Kunststein als Imitat von Sandstein im Bauwesen des 19. und frühen 20. Jahrhunderts sogar weitgehend durch (Abb. 18).



**Abb. 16:** Ein neu hergestellter Stein wird anstelle eines kaputten Steins eingesetzt.



**Abb. 17:** Um die richtigen Mörtelmischungen und Injektionsflüssigkeiten zu finden, wird in der Münsterbauhütte geforscht und «geprübelt».



**Abb. 18:** Fassadensteine des Hauses «Du Pont» von 1914 in Zürich. Im Detail erkennt man die grünen Glassplinter, die der Kunststeinmasse beigemischt wurden. Der Kunststein erweist sich als stabil und genügend verwitterungsbeständig.

1. Welches sind die Vor- und Nachteile von Sandstein für den Bau von Gebäuden?
  
2. Können Sie sich vorstellen, weshalb Sandstein heute nur noch für Reparaturarbeiten an bestehenden Gebäuden abgebaut wird und keine Verwendung mehr findet für grosse Bauten?