

Gabriele Grassegger/Günter Eckstein: Schadensvermessung an Natursteinen

Photogrammetrische und naturwissenschaftliche Untersuchungen,
Präzisionsvermessungen zum zeitlichen Verlauf von Steinschäden

Mit zwei Beiträgen wurde in jüngster Zeit in dieser Zeitschrift auf die Problematik des Steinerfalls aufmerksam gemacht (1984, Heft 2, S. 37–45, Eberhard Grunsky, 1988, Heft 1, S. 13–24, Gabriele Grassegger). Hierbei wurden Schadensformen und -ursachen, Schadensuntersuchungen und Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen in allgemeiner Form aufgezeigt und mit einer Vielzahl von Photos belegt. Mit diesem Bericht werden an konkreten Beispielen methodische Vorgehensweisen zur Schadensbestandsaufnahme vorgestellt. Neu ist dabei die Kombination von naturwissenschaftlich-technischen und photogrammetrischen Meßmethoden, die zusammengefaßt eine detaillierte Voruntersuchung ergeben. Darüber hinaus werden Verfahren vorgestellt, die die zeitliche Beurteilung von Steinschäden ermöglichen.

1. Einleitung

In den letzten Jahren ist die Anzahl der Schadensfälle bei Natursteinen laufend gestiegen. Die Zuschußanträge der Denkmaleigentümer zur Steinsanierung und Steinkonservierung haben 1989 das Dreifache des Betrages von 1985 erreicht. Damit ist aber auch der Umfang für die erforderlichen Voruntersuchungen gestiegen. Um einerseits diesen Mehraufwand bewältigen zu können und um andererseits bessere und abgesicherte Ergebnisse zu erhalten, wurden deshalb beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg neue Wege bei der Schadensbestandsaufnahme beschritten.

Jeder Maßnahme muß eine umfassende Voruntersuchung vorausgehen, wobei der Ist-Zustand dokumentiert und die Schadensursachen analysiert werden. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für ein Sanierungs- und Restaurierungskonzept, das vor den Ausführungsarbeiten festgelegt werden muß. Diese Untersuchungen benötigen einen größeren Zeitrahmen. Bei hochwertigen Steinplastiken wird die Schadensdokumentation vom Restaurator von einem Gerüst aus durchgeführt. Bei Natursteinfassaden sind die Gerüstkosten für die Voruntersuchungen sehr hoch und damit auch schwer durchsetzbar, denn von den ersten Untersuchungen bis zu einem fertigen Konzept und von den Ausschreibungen an Firmen über Finanzierungsplanungen bis zu den eigentlichen Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen vergehen Monate oder gar Jahre. Deshalb wurden beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg neue photogrammetrische Auswertemethoden eingesetzt, die es ermöglichen, ohne Gerüstbauten die Voruntersuchungen rationell und gründlich durchzuführen. Die Aufnahmen wurden in sehr kurzer Zeit von einer Hebebühne aus vorgenommen, die Schadenskartierung erfolgte am Auswertegerät.

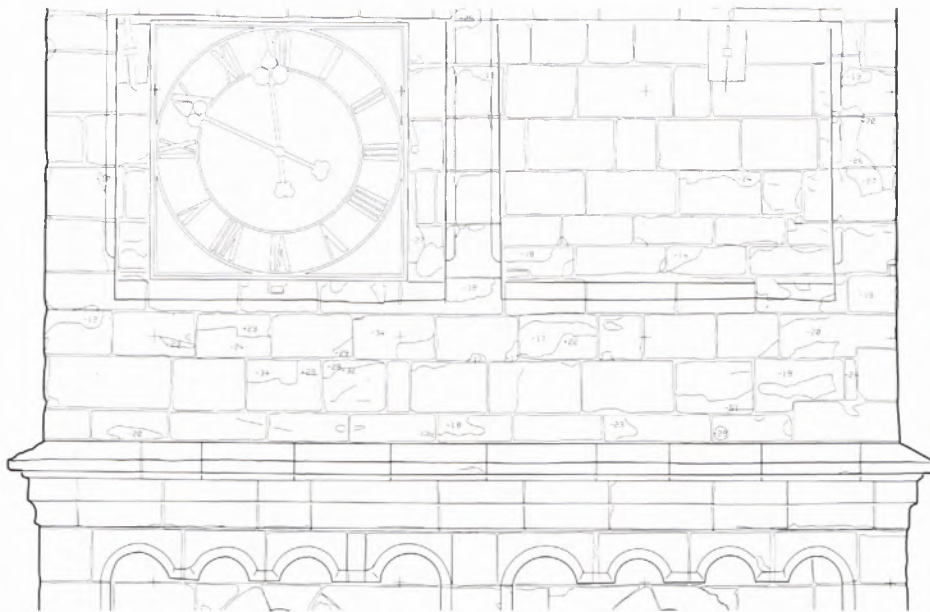
Die Schadensentwicklung und der Oberflächenverlust der Natursteine konnten bisher in der zeitlichen Abfolge nur qualitativ im Vergleich mit alten Aufnahmen beurteilt werden. Objektive Beurteilungen waren nicht möglich. Mit zeitversetzten photogrammetrischen Aufnahmen ist es möglich geworden, absolute Werte zu ermitteln und den Verwitterungsfortschritt zu beobachten.

2. Photogrammetrische Vermessung und Schadensinterpretation

Sanierungsmaßnahmen bei Natursteinfassaden wurden bis vor wenigen Jahren zwischen Denkmalpflegern, Architekten und Steinmetzfirmen oder Bauhütten direkt zu Beginn der Arbeiten abgesprochen. Voruntersuchungen waren nicht üblich. Zwar wurden vor den meisten Maßnahmen Bauaufnahmen erstellt, um Flächen und Volumen zu errechnen oder um statische Sicherungsmaßnahmen zu planen, ein steingerechtes Aufmaß erfolgte aber in den wenigsten Fällen oder nur in Form von Detailplänen bei wertvollen Werksteinen. Mit dem Durchbruch der Architekturphotogrammetrie, in Baden-Württemberg Ende der 60er Jahre, konnte die steingerechte Umzeichnung rationell durchgeführt werden. In der Regel handelt es sich um Pläne im Maßstab 1:50 mit einliniger Fugendarstellung. Graphisch darstellbar sind dabei nur die groben Steinschäden. Auf

1 ELLWANGEN, Ostalbkreis, St. Vitus. Übersichtsaufnahme aus Nordost auf den Chor, Nordturm und das nördliche Querschiff. Diese Bereiche wurden für den ersten Sanierungsabschnitt untersucht.





2 ELLWANGEN, St. Vitus, Nordturm. Ausschnitt aus der photogrammetrischen Auswertung der Nordseite.

Teil I: Graphische Auswertung durch das Ingenieurbüro Fischer, Müllheim. Darstellung der Architekturformen und der Steinschäden einschließlich der Schadens-tiefen, gemessen relativ zur gesunden Steinoberfläche.

der Grundlage dieser Pläne wurden bisher in einem weiteren Arbeitsschritt vom Gerüst und von Hebebühnen aus weiterführende Schadensinterpretationen durchgeführt. Eine manuelle Schadenskartierung erwies sich aber als extrem zeitintensiv und ungenau, da Schadensformen nur beschrieben werden und eine subjektive Bewertung erfolgt. Um der Aufgabenstellung der Vermessung von Schadensbildern gerecht zu werden, wurde folgender Vermessungsablauf gewählt (Abb.3).

Bei den photogrammetrischen Aufnahmen müssen bestimmte Kriterien eingehalten werden: Es sind, soweit technisch möglich, Stereoaufnahmen senkrecht auf die Fassadenebenen herzustellen. Dabei ist auf ein günstiges Basisverhältnis zu achten, d.h. das Verhältnis vom gegenseitigen Abstand der Stereoaufnahmen zum Objektabstand sollte zwischen 1:5 und 1:8 liegen, um eine optimale stereoskopische Interpretation vornehmen zu können. Weiterhin ist der Aufnahmemaßstab so zu wählen, daß die Strukturen der Steine und die Steinschäden klar erkennbar sind. Um auch biologische Besiedlungen wie Algen, Moose und Flechten, Feuchte-zonen, Verfärbungen und Ausblühungen (Abb.9) kartieren zu können, sind farbige Stereoaufnahmen oder bei Schwarzweißaufnahmen zusätzliche Farbaufnahmen erforderlich.

Die photogrammetrischen Auswertungen gliedern sich in zwei Schritte: in die graphische Auswertung und die Interpretation der Schadensbilder und Schadensstufen.

Im ersten Schritt werden neben dem Bauteil auch die graphisch darstellbaren Schäden mit abgebildet. Es

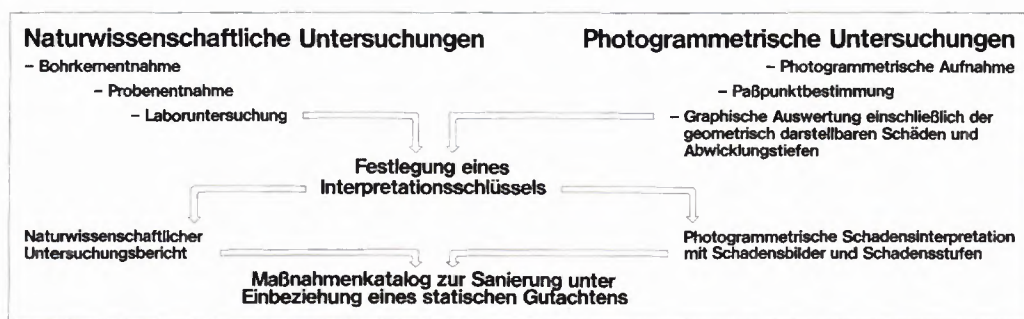
empfiehlt sich dabei in größeren Maßstäben, z. B. 1 : 20, auszuwerten, da hier Fugen zweilinig und die Schäden detailliert dargestellt werden können. Als wesentliche zusätzliche Information werden noch die Abwitterungstiefen und Aufwölbungen relativ zur gesunden Stein-oberfläche in mm-Angaben und in die Pläne eingetra-gen (Abb.2).

Im zweiten Schritt muß zunächst, abgestimmt auf die naturwissenschaftlichen Untersuchungen, ein Interpretationsschlüssel festgelegt werden. Danach müssen vor Ort ausgewählte Stellen den Schadensstufen und -bil-dern zugeordnet werden. Diese Musterstellen werden sodann durch stereoskopische Interpretation am Auswertegerät identifiziert und Stein für Stein vermessen und übertragen. Es ist unumgänglich, daß der Photo-grammometer bei der Interpretation vor Ort dabei ist, damit er eine räumliche Vorstellung von den Stein- und Schadensstrukturen hat. Diese Art der stereoskopi-schen Auswertung und Vermessung bedarf einer länge-ren Erfahrung.

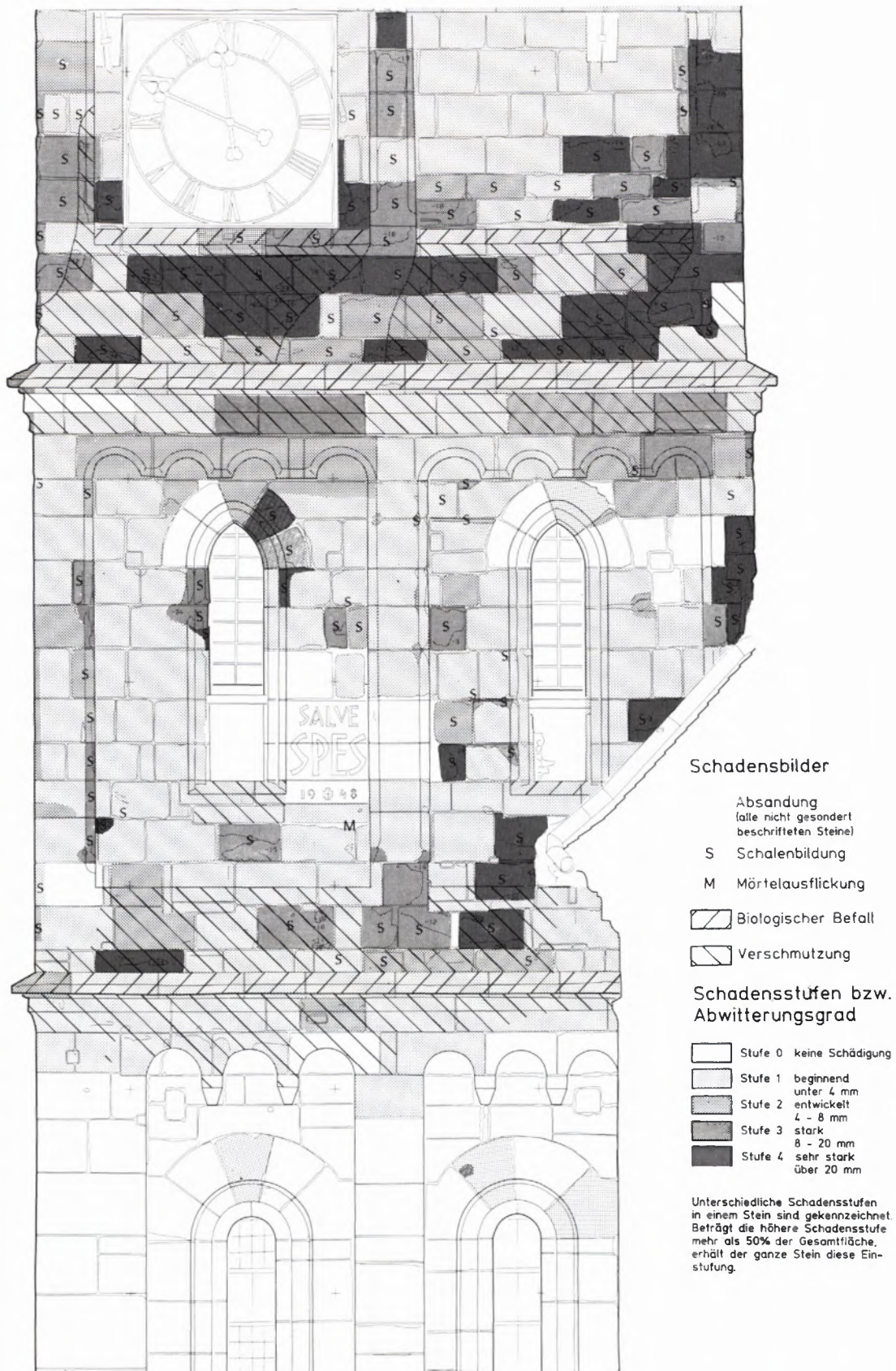
Derartige photogrammetrische Unterlagen stellen Meß-werte dar und können deshalb jederzeit neu bewertet oder mit späteren Aufnahmen verglichen werden. Des-halb sind diese Untersuchungen nicht nur für die prak-tische Bearbeitung, sondern auch für wissenschaftliche Zwecke von Bedeutung.

Beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg wurden bisher auf diese Weise von zwei Objekten Schadenskarti-erungen vorgenommen: St. Vitus in Ellwangen (Abb.1) und das Münster in Salem (Abb.7).

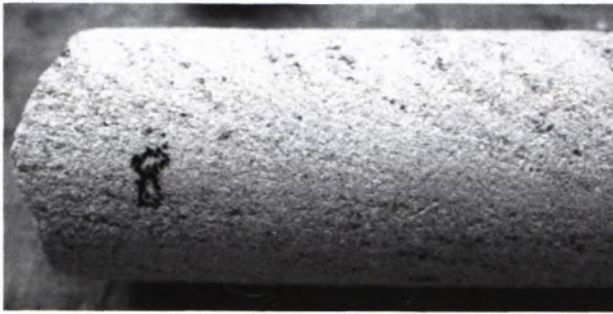
Die Schadensbilder am groben weißen Stubensandstein der Kirche in Ellwangen sind in erster Linie Absandun-



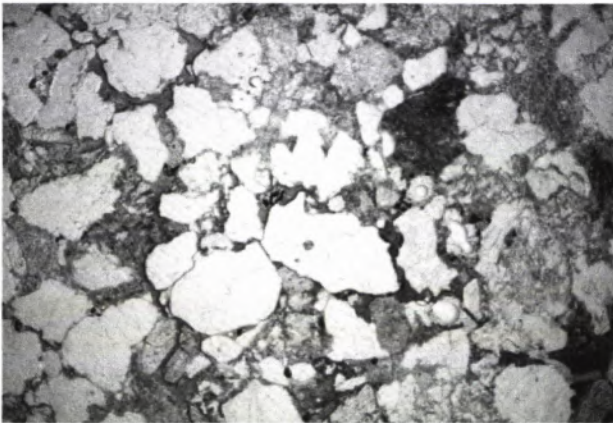
3 FLUSSDIA-GRAMM zum Ablauf einer naturwissenschaftlichen und photogrammetrischen Schadensbestandsaufnahme bei Natursteinen.



4 ELLWANGEN, St. Vitus, Nordturm. Ausschnitt aus der photogrammetrischen Auswertung der Nordseite. Teil II: Interpretation nach Schadensbildern und Schadensstufen durch das Referat Photogrammetrie des Landesdenkmalamtes. Die stärksten Schäden haben sich oberhalb der Simse durch Feuchtigkeitsstau und an den Eckbereichen entwickelt. Der untere Abschnitt ist durch das Querschiff geschützt und nahezu unbeschädigt.



5 ELLWANGEN, St. Vitus. Aus der Fassade entnommener Bohrkern für die naturwissenschaftlichen Untersuchungen. Es handelt sich um sehr grobkörnigen Stubensandstein, der eine deutlich erkennbare Schrägschichtung aufweist.



6 ELLWANGEN, St. Vitus. Dünnschliffmikroskopische Aufnahme durch die äußere Schadenszone von Bohrkern 1a. Dargestellt ist die schwerste Schadensform mit über 3 cm tiefen Schalen. Die Aufnahme zeigt im wesentlichen oberflächenparallele Ribbildungen, erhöhte Porosität (im Dia blau) sowie chemische Auflösungen von Feldspaten und Tonmineralien (feinkörnig, im Dia weiß-grau). Vergrößerung 45fach, parallele Polarisation, eingefärbtes Harz.

gen und Schalenbildungen mit Abplatzungen bis zu 40 mm. Die Schäden wurden in 5 Stufen eingeteilt (Abb. 4). Der grobe Sandstein ließ sich bei den Schadensstufen 2–4 stereoskopisch eindeutig bestimmen. Schwieriger waren die Übergänge von unbeschädigten Steinen zu beginnenden Schadensbildern (Stufe 0 und 1) zu interpretieren. Nicht sichtbar bei der Auswertung sind oberflächenparallele Ribbildungen und Hinterschnittflächen. An den Eckbereichen konnten diese Schäden durch die Aufnahmen der angrenzenden Seiten interpretiert werden. Hohlliegende Stellen waren zu erkennen, wenn sie mit einer Aufwölbung verbunden waren.

Der Bereich um den Nordturm an der Basilika in Ellwangen wurde inzwischen eingerüstet, mit den Sanierungs- und Konservierungsmaßnahmen wurde begonnen. Ein Vergleich der photogrammetrischen Pläne und Schadenskartierungen mit den tatsächlichen Schäden ergab eine hohe Übereinstimmung. Diese Aussage deckt sich auch mit einer Schadenskartierung von St. Georg in Nördlingen von Münzer (1987), wo die Übereinstimmung etwa 90% betrug (Angaben nach einem unveröffentlichten Vortrag von U. Münzer vom Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München anlässlich der wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V. 1987 in Friedrichshafen).

Die Schadensinterpretation der Nordquerhausfassade des Münsters in Salem war dagegen wesentlich schwieriger. Der grüne Rorschacher Sandstein ist feinkörniger und kontrastärmer als der Ellwanger Stein, und die Schadensbilder sind vielseitiger und fließend. Der Maßstab für die Stereoaufnahmen mußte deshalb in Salem größer gewählt werden (Salem 1 : 120, Ellwangen 1 : 150), und die Schadensstufen mußten enger gegliedert werden (Titelbild). Eine endgültige Beurteilung des Maßwerkkfensters und des vorgesetzten Maßwerkgiebels war trotz zusätzlicher Schrägaufnahmen nicht möglich, da nicht alle Risse und Ablösungen parallel zur Fassadenebene erkannt werden konnten. Hier war in Zusammenarbeit mit dem Restaurator eine Überprüfung und Einstufung vor Ort erforderlich.

Sowohl in Ellwangen als auch in Salem wurde eine photogrammetrische Aufnahmekonstellation gewählt, die eine 20fache Überhöhung, zusätzlich zu der Vergrößerung am Auswertegerät, ergab. Dadurch konnte die Topographie der verwitterten Steinoberfläche sehr genau erkannt werden. Gemessen wurden Abwitterungstiefen von 2 bis 60 mm, relativ zur gesunden Steinoberfläche. Die Meßgenauigkeit betrug ± 2 mm.

3. Naturwissenschaftliche Untersuchungen

Die gemeinsame Kartierung im Labor mit Vermessung der Schadensbilder (Abb. 2 und 4) ließ eine spätere Zuordnung aller Schäden nach den technisch-naturwissenschaftlichen Untersuchungen zu. Diese Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend kurz umrissen (Grassegger 1989); die Untersuchungen erfolgten nach Bohrkernentnahmen (Abb. 5).

- Dünnschliffmikroskopische und Röntgenbeugungsphasen-Bestimmungen zeigten, daß es in einigen Gesteinsvarietäten zu schwerwiegenden Mineralveränderungen gekommen ist. Es ließen sich im wesentlichen Tonmineral-Abbau, Tonmineral-Gefügeveränderungen, Feldspatersetzung und Ribbildungen nachweisen (Abb. 6).
- Zusätzliche mechanische Kennwerte, wie die Haftzugfestigkeitsprofile zeigten, daß es im wesentlichen zwei Gesteinsvarietäten gibt, was starken Einfluß auf ihr Verwitterungsverhalten hat: Stubensandsteine mit überwiegender Quarzzementen (Tonminerale als Porzemente) und Varietäten mit Tonmineralen (Kaolinit) als Zementgeneration (Kontaktzemente).
- Erstere besaßen Haftzugfestigkeiten von 1 bis 2 N/mm², zeigten kaum Schäden und wären durch eine festigende Behandlung unnötig steif geworden. Hingegen waren tonig gebundene Stubensandsteine meist stark zurückgewittert und wiesen schwere Schalenbildungen auf. Sie konnten nurmehr dann befriedigend gefestigt werden, wenn keine Schalenbildung vorlag und die Tiefe der Haftzugfestigkeitsabnahme im Bereich der Festiger-Eindringtiefe lag.
- Die Haftzugfestigkeit durfte auch absolut gesehen nicht wesentlich unter 0,5 N/mm² liegen. So konnten große Bereiche der zuletzt beschriebenen Stubensandsteinvarietäten der Schadensstufen 3 und 4 (Schäden > 8 mm) nicht mehr gefestigt werden.
- Weitere Messungen zeigten, daß die Wasseraufnahme, Sorptionsfeuchte und Porosität mit dem Schädigungsgrad zunimmt.

Die Gesamtheit der naturwissenschaftlich-technischen Ergebnisse konnte einzelnen Schadensstufen zugeord-

net werden. Durch die flächenhafte Schadensbestandsaufnahme wurde eine sehr exakte, mengenmäßige Sanierungsplanung für das Objekt durchgeführt.

Die Umsetzung der Untersuchungsergebnisse hat bereits im Herbst 1989 mit dem 1. Sanierungsabschnitt im Bereich des Nordturms begonnen.

Der Molassesandstein des Salemer Münsters zeigt andere Verwitterungserscheinungen. Rein optisch sind wechselnd dicke Schalen vom mm-Maßstab bis zu 3 cm zu beobachten (Titelbild), bröckeliger Zerfall und auch Ausblühungen (Abb. 8–10). Die technischen Messungen ergaben, daß der Molassesandstein sehr weich ist, geringporös und zu hohen Absorptionsfeuchte-Gehalten neigt.

Mineralogisch-chemische Untersuchungen zeigten Veränderungen von verschiedenen Mineralen und die Neubildung von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Thenardit (Na_2SO_4) in den Schadenszonen an.

4. Photogrammetrische Vermessungen zum zeitlichen Verlauf von Steinschäden

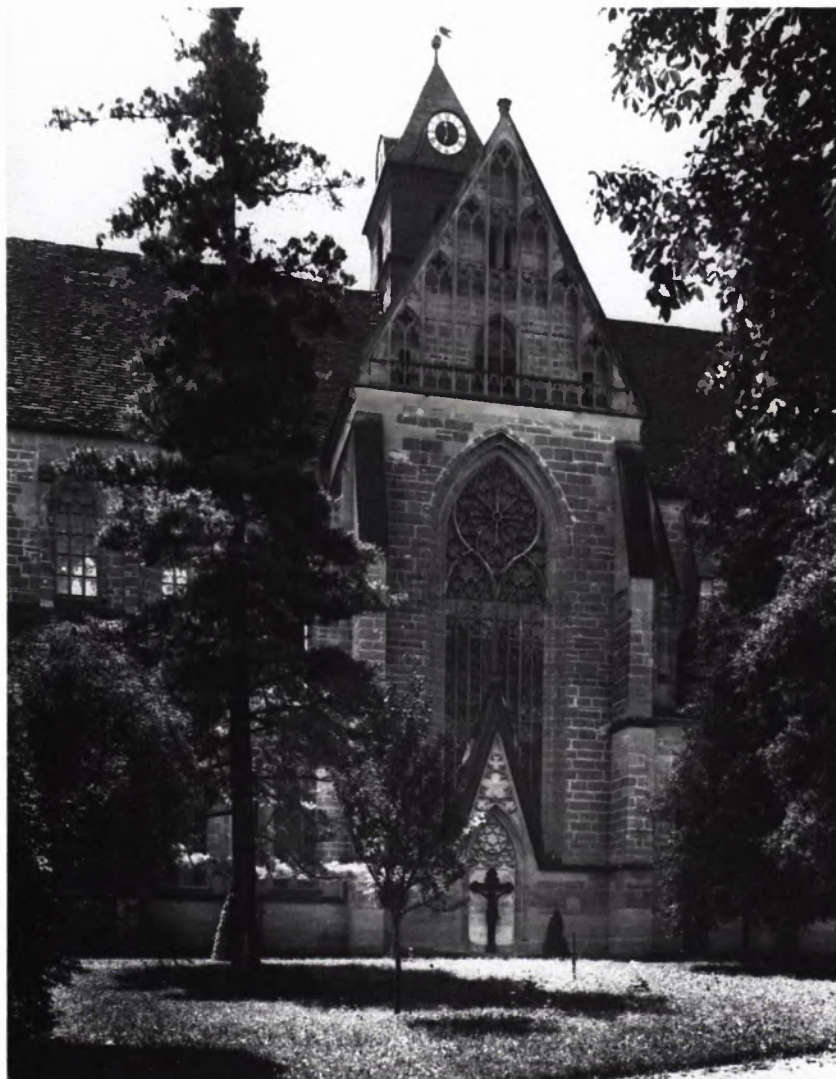
Schäden und Substanzverluste bei Natursteinen, insbesondere bei wertvollen Skulpturen und Epitaphien, sind heute überall offensichtlich. Quantitative Messungen über Schadensentwicklungen und Oberflächenverluste konnten bisher nicht durchgeführt werden, da fortschreitende Veränderungen nur beobachtet wurden.

Deshalb wurden Überlegungen angestellt, ob mit zeitversetzten photogrammetrischen Messungen, d.h. mit Aufnahmen in periodischen Abständen, genaue Aussagen über die Verluste möglich sind.

In einer ersten Versuchsphase mußten die Grundlagen hinsichtlich Aufnahmeanordnungen, Auswertemethoden und relativer und absoluter Genauigkeit erarbeitet werden. Dies erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik in Stuttgart (Oesterle 1988). Dabei wurden sowohl Aufnahmen mit unterschiedlichen Anordnungen getestet, als auch vorhandene Aufnahmen mit Neuaufnahmen meßtechnisch verglichen. Weiterführende Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Referat Photogrammetrie des Landesamtes für Flurbereinigung und Siedlung vorgenommen. Sämtliche photogrammetrischen Vermessungen erfolgten an analytischen Auswertegeräten. Dabei wurden vorhandene mathematische Modelle, die bei der topographischen Vermessung eingesetzt werden, auf die speziellen Belange der Nahbereichsphotogrammetrie abgewandelt.

Erst nach der Festlegung der technischen Bedingungen und Möglichkeiten konnten sinnvolle Einsätze geplant werden. Inzwischen wurden Versuchsfelder zur Erforschung von Schadensentwicklungen und zur Kontrolle von erfolgten Restaurierungen angelegt. Zu nennen sind wiederum die Basilika in Ellwangen und das Mün-

7 SALEM, Bodenseekreis, ehem. Klosterkirche. Fassade des nördlichen Querhauses. Aufnahme zwischen 1900 und 1920.





8 SALEM, ehem. Klosterkirche, nördliches Querhaus. Aufnahme von 1935. Die Sockelpartie bis zur dritten Steinlage sowie die unteren Gewändesteine sind Auswechslungen (vgl. dazu auch U. Knapp, 1988, dortige Abb. 1). In den unteren Bereichen hatten sich bereits damals neue Steinschäden entwickelt.

ster in Salem sowie die abgeschlossene Konservierung der Chorportale vom Münster in Schwäbisch Gmünd. Untersuchungen mit zeitversetzten Beobachtungen werden an den folgenden zwei Beispielen vorgestellt.

5. Vermessung eines geschädigten Steines im achtmonatigen Abstand

An der schwer geschädigten Sockelzone des Salemer Münsters wurden je zwei Testfelder im Bereich der anstehenden Sanierung und im Nachbarbereich angelegt. Es handelt sich dabei um feinkörnigen, grünen Molassesandstein, der starke schalige Abplatzungen und Zurückwitterungen bis zu 10 mm mit Schuppenzonen zeigt. Die Sockelzone entspricht der Schadensstufe 4, bei der keine Konservierung mehr möglich ist. Dieser Bereich stammt aus einer Sanierung in den achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts (Knapp 1988), so daß sich Schäden in ca. 100 Jahren entwickelt haben. Die Schadensursachen sind im Sockelbereich auf Frost-Tau-Belastungen mit Tausalzbelastungen zurückzuführen. Auch Schadstoffanreicherungen wie Sulfat, Nitrat und Chlorid und auch Dehnungen spielen eine Rolle (Abb. 8 und 9, 13 und 14).

Untersuchungen in der oben erwähnten Diplomarbeit haben gezeigt, daß Aufnahmen mit der Stereomeßkammer SMK 40 mit dem Bildmaßstab 1:20 optimale Ergebnisse bringen. Weiterhin wurde erkannt, daß absolute Vergleichswerte nur möglich sind, wenn über identische Paßpunkte orientiert werden kann. Deshalb wurden für jede Aufnahme in den Ecken der Versuchsfelder Edelstahlsschrauben fest installiert. Zur Verfahrensuntersuchung wurde ein Feld im Abstand von 8 Mona-

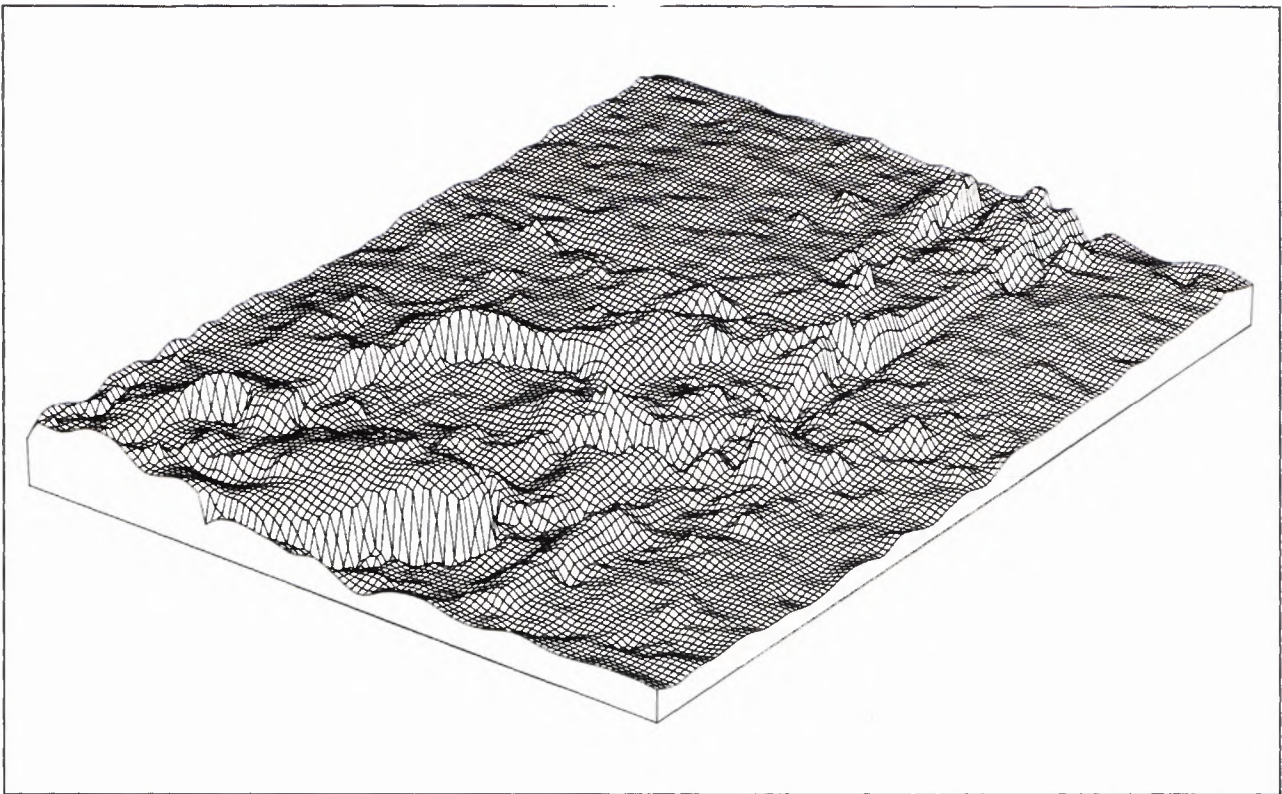
ten (Februar und Oktober 1988) erneut photogrammetrisch aufgenommen. Anschließend wurden beide Stereomodelle mit einem identischen regelmäßigen Raster mit 20 mm Maschenweite ausgemessen. Bruchkanten wurden zusätzlich eingemessen. Sodann wurden digitale Höhenmodelle errechnet (Programmsystem SCOP). Die graphische Ausgabe erfolgte zunächst für jedes Modell getrennt in Form von Höhenstufenplänen im Maßstab 1:2 (Abb. 11 und 12). Anschließend wurden in einem Differenzenmodell die Veränderungen der Aufwölbungen und Abwitterungen in Stufen von jeweils 2 mm aufgezeigt (Abb. 15).

Eine Vorstellung von der Meßgenauigkeit können die mittleren Klaffungen der digitalen Höhenmodelle vermitteln, die mit ca. $\pm 0,3$ mm errechnet wurden. Maximale Abweichungen können den dreifachen Wert erreichen. Beim Differenzenmodell muß um den Faktor $\sqrt{2}$ erhöht werden. Damit liegt die Meßgenauigkeit innerhalb von 1 mm. Beim Differenzenmodell können partielle Abweichungen geringfügig darüberliegen. Wegen dieser Genauigkeitskriterien und aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Höhenabstufungen in den Einzelmodellen und die Veränderungen im Differenzenmodell in Schichten von 2 mm ausgegeben.

Die Vermessung des 60 x 80 cm großen Versuchsfeldes zeigt Ergebnisse, die in der Deutlichkeit nicht erwartet werden konnten. Die beobachteten und vermessenen



9 SALEM, ehem. Klosterkirche, nördliches Querhaus. Photogrammetrische Nahaufnahme von 1988 zur Schadensvermessung. Am linken Sockel ist die Oberfläche des Steines vollständig abgetragen, der Schaden hat auf die Profile der Gewände übergriffen. Der untere zurückliegende Stein im Bogenfeld ist ebenfalls stark abgewittert. Die beiden darüberliegenden Steine waren 1935 noch intakt gewesen und zeigen nun starke Schalenbildungen. Die Schäden sind auf Feuchtebeeinflussungen, Salzausblühungen und damit verbundene Absprengungen im Molassesandstein zurückzuführen.



10 SALEM, ehem. Klosterkirche, nördliches Querhaus. Perspektivische Darstellung der Oberfläche des in Abb. 9 gekennzeichneten, stark geschädigten Steines. Die auf der photogrammetrischen Vermessung aufgebaute Gitterliniendarstellung veranschaulicht die Schadensstruktur.

Veränderungen in 8 Monaten im einzelnen:

- Der gesamte Flächenanteil mit Verlusterscheinungen mit mehr als 1 mm Abwitterung im Musterfeld umfaßt ca. 160 cm² (3%).
- Die neuen Abwitterungsbereiche sind in den bereits vorher am stärksten ausgewittert anzusehenden Bereichen aufgetreten. Es sind Zonen mit starken Absandungen und Schuppen, die sich weiter vertieft haben. In der Mitte des unteren Bildrandes konnte im Differenzenmodell das Abplatzen einer Schale über 9 mm Tiefe beobachtet werden. In dieser 50 cm² großen Zone sind ca. 20 cm³ abgefallen.
- Der andere „aktive“ Schadenstyp sind Schalenbildungen. Die Messungen ergaben, daß sowohl vorhandene Schalen sich laufend vergrößern, als auch neue Schalen entstehen.
- Im oberen mittleren Bereich des Versuchsfeldes war zum Zeitpunkt der Erstaufnahme eine beulenartige Aufwölbung mit einer Abplattung vorhanden. In der zweiten Aufnahme ist sichtbar, daß die Beule sich vergrößert hat und weitere Teile abgeplatzt sind. Es ist aber optisch nicht erkennbar, daß sich bereits das gesamte Umfeld aufgewölbt hat. Erst die exakten Vermessungen ergaben, daß sich hier in einem Zeitraum von nur 8 Monaten schon ca. 100 cm² zwischen 1 und 3 mm von der Oberfläche abgehoben haben! Phänomenologisch bedeutet dies, daß neue oberflächenparallele Risse entstanden sind, bzw. sich weiter fortpflanzen, wodurch sich neue Schalen aufwölben.
- Weitere starke Aufwölbungen sind entlang der Abbruchkanten zu den Zurückwitterungszonen entstanden. Die Messungen ergaben, daß sich die Aufwölbungen um 1-5 mm auf einer Breite von 2-3 cm er-

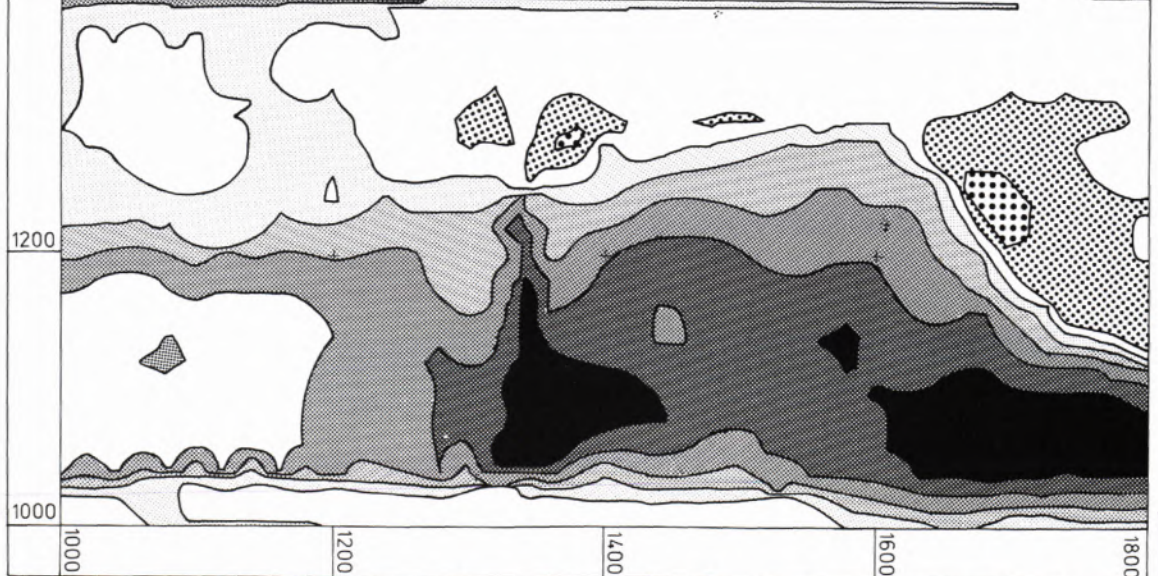
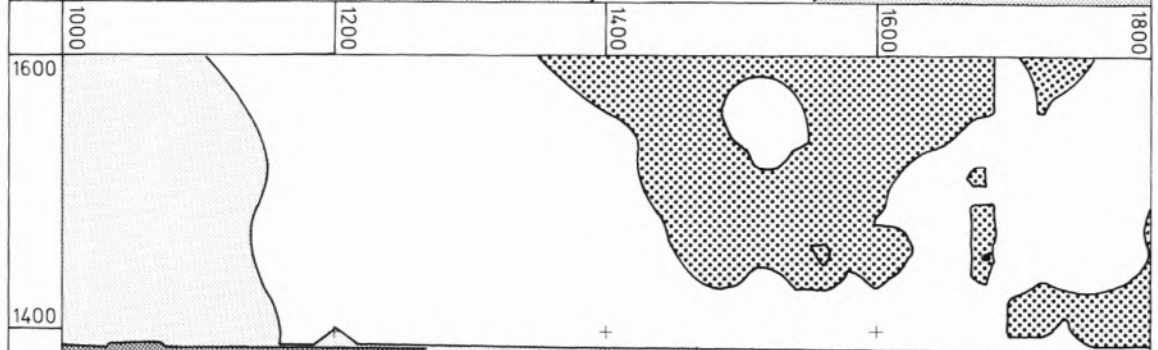
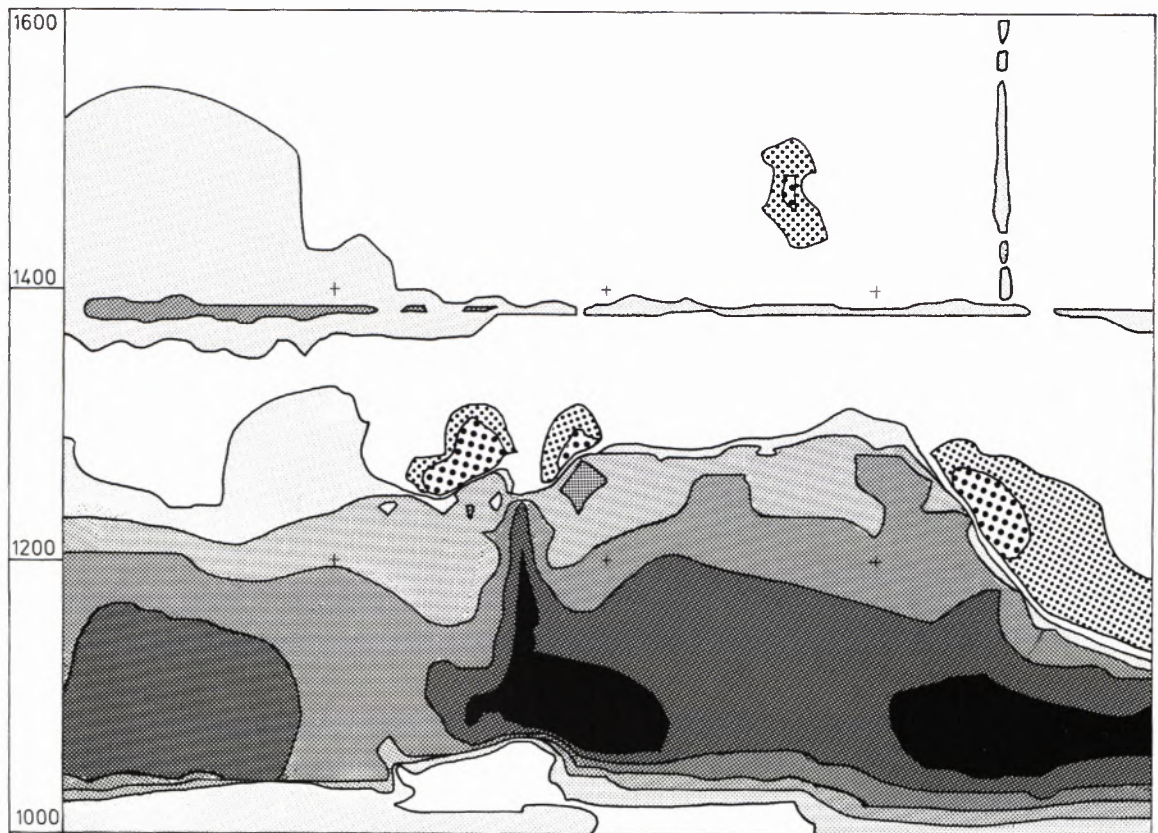
höht haben (Abb. 14 rechter gebogener Schalenrand).

Eine Zusammenfassung der genannten Ergebnisse zeigt, daß sich ca. 15% der beobachteten Fläche innerhalb der letzten 8 Monate um mehr als 1 mm verändert haben.

6. Vermessung eines geschädigten Epitaphs in siebzehnjährigem Abstand

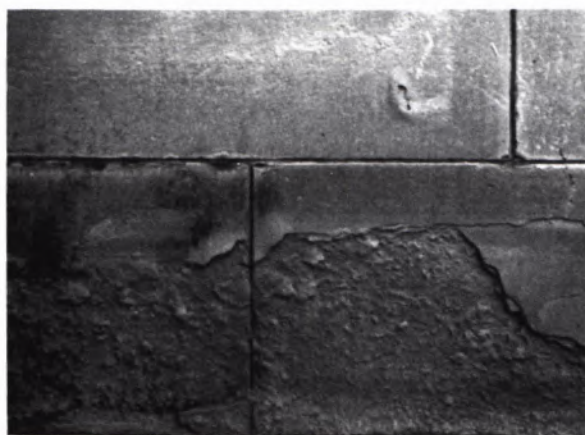
Im Jahr 1970 wurde die Kirche St. Dionys in Esslingen von G. Nagel (Institut für Baugeschichte, Universität Stuttgart) photogrammetrisch aufgenommen. Aus den ca. 200 Aufnahmen konnte ein stereoskopisches Modell ausgewählt werden, das an der Nordseite des Chores ein Schilfsandstein-Epitaph mit abbildet, und wegen örtlicher Zwänge mit einem geringeren Abstand als üblich aufgenommen worden war (Abb. 16). Im Rahmen der Versuche zur Erfassung von Steinschäden durch photogrammetrische Methoden führte K.-H. Österle 1988 Vergleichsmessungen an diesem Objekt durch.

Zunächst wurden die Aufnahmeverhältnisse der Erstaufnahme rekonstruiert und unter denselben Bedingungen eine Neuaufnahme hergestellt. Da keine signalisierten Paßpunkte vorhanden waren, wurde versucht, in beiden Modellen über möglichst unverwitterte natürliche Punkte außerhalb des Epitaphs identische Orientierungen herzustellen. Angestrebt wurde eine Genauigkeit von ± 1 mm. Nach den absoluten Orientierungen wurde in beiden Modellen die Oberfläche profilweise und in Form von Bruchkanten erfaßt und das digitale Höhenmodell berechnet (Programmsystem HIFI). Die mittleren Fehler in der Höheneinstellung wurden dabei mit ± 1 mm bzw. $\pm 1,7$ mm errechnet. Die mittleren Fehler beim Differenzenmodell dürften somit bei ± 2 mm liegen. Bezogen auf den Bildmaßstab von



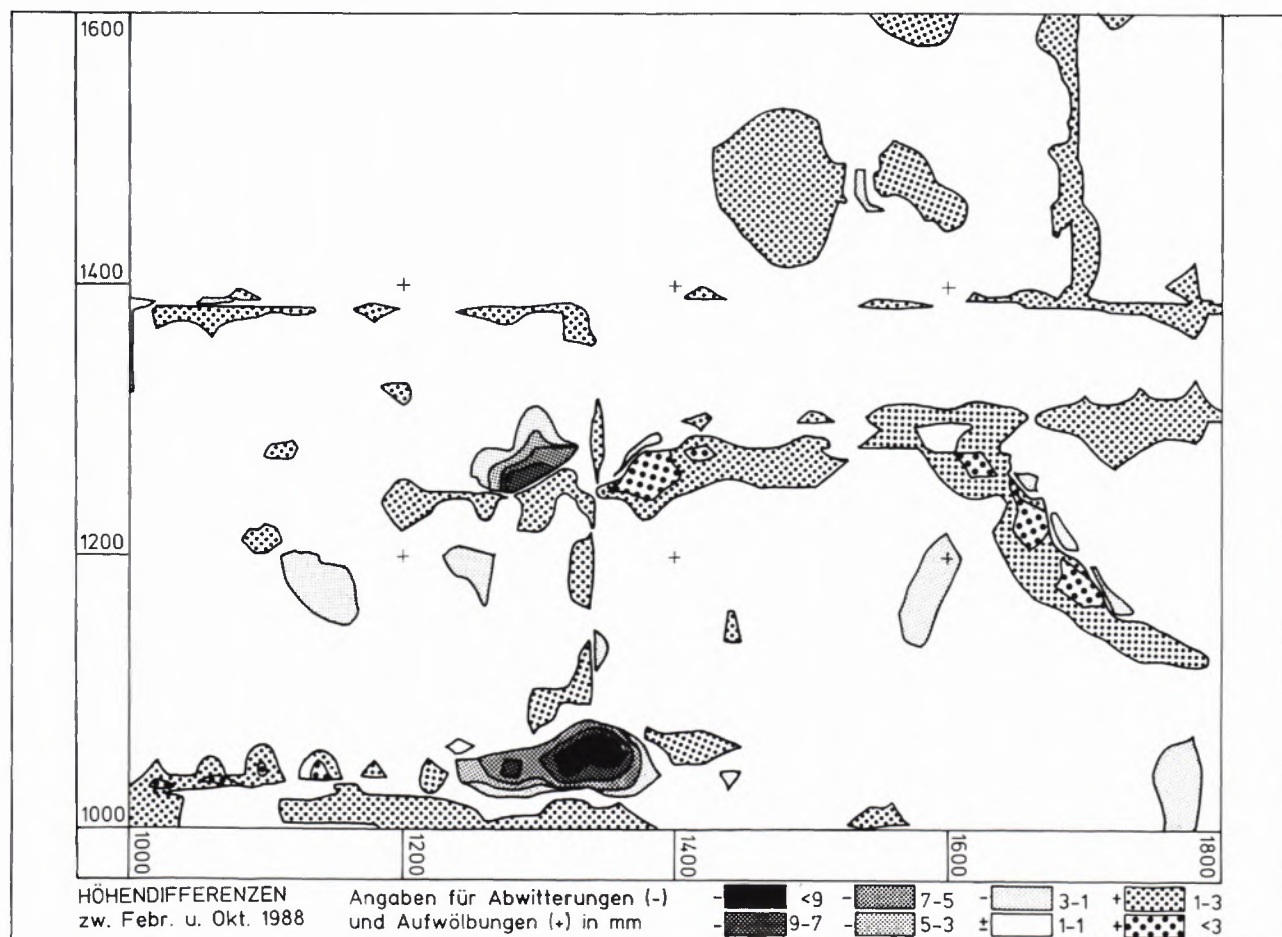
HÖHENSTUFEN Februar 1988 > 91 93-95 97-99 101-103
 Angaben in mm Oktober 1988 91-93 95-97 99-101 < 103

◀ 11 u. 12 SALEM, ehem. Klosterkirche, Nordfassade. Darstellung einer stark beschädigten Steinpartie im Februar und im Oktober 1988 in Form von Höhenstufenplänen. Die Steinoberfläche wurde jeweils über Stereoaufnahmen erfaßt, photogrammetrisch vermessen und als digitale Höhenmodelle berechnet. Dabei wurde das Niveau der noch gesunden Oberflächen über fest installierte Bezugspunkte, für beide Aufnahmen gleich, mit einer Tiefe von 100 mm festgelegt. Die Höhenschichtenpläne zeigen deutlich Aufwölbungen und Abwitterungen an. (Umgezeichnet nach der Auswertung durch das Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung.)



13 u. 14 SALEM, ehem. Klosterkirche, Nordfassade. Photogrammetrische Nahaufnahmen der geschädigten Steinpartie vom Februar und vom Oktober 1988. Die Abbildungen zeigen den untersuchten Ausschnitt von 600/800 mm.

15 SALEM, ehem. Klosterkirche, Nordfassade. Darstellung der Höhendifferenzen aus den Vermessungen der geschädigten Steinpartie, errechnet über die digitalen Höhenmodelle der um acht Monate zeitversetzten Messungen. Der Plan zeigt die Bereiche auf, die sich innerhalb dieses Zeitraumes um mehr als 1 mm verändert haben. Deutlich zu erkennen sind Aufwölbungen entlang der Abbruchkanten und im mittleren oberen Bereich eine großflächige Aufwölbung, deren Zentrum abgeplatzt ist. Im unteren Bereich, der schon bei der Erstaufnahme ausgewittert war, sind an zwei Stellen Schalen von ca. 9 mm Tiefe abgeplatzt. (Vereinfachte Umzeichnung nach der Auswertung durch das Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung.)





1 : 100, aufgenommen mit der Stereomeßkammer SMK 120, entsprachen diese Werte den Erwartungen.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte getrennt für beide Modelle in Form von Höhenlinien und Konturlinien (Abb.17). Im errechneten Differenzenmodell wurden die Gesamtabwitterungsverluste ermittelt und die Differenzhöhenlinien gezeichnet. Im Gegensatz zu topographischen Anwendungen erwiesen sich Höhenlinien als schwer interpretierbar und somit nicht informativ. Deshalb wurden an drei exponierten Stellen Querprofile berechnet und kartiert, wodurch Abwitterungsverluste anschaulich gemacht werden konnten (Abb.18).

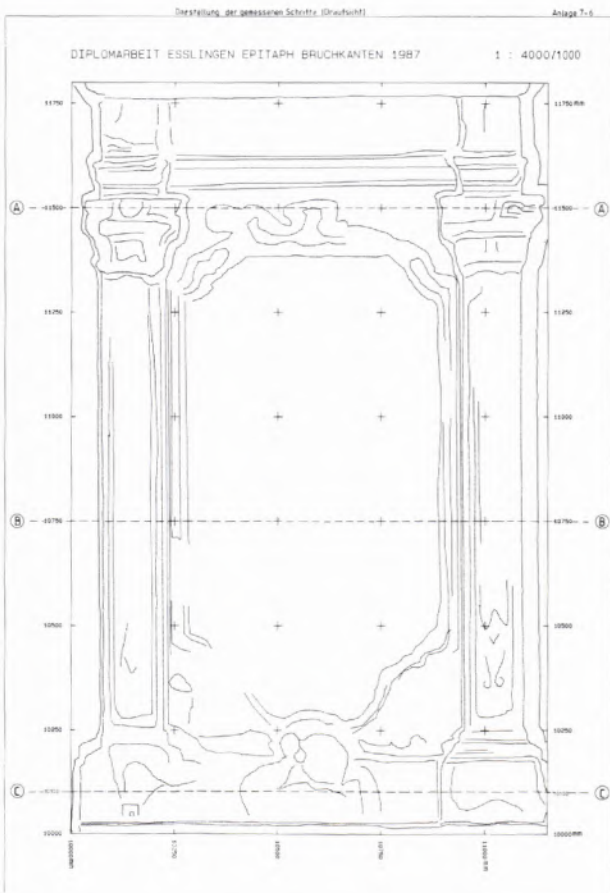
Die Ergebnisse für den Schadensverlauf innerhalb von 17 Jahren im einzelnen:

- Der Abtrag am Epitaph hat sehr unterschiedlich stattgefunden. Besonders starke Verluste sind an herausragenden Teilen wie Kapitellen und Basen in der Einrahmung des Epitaphs zu beobachten. So hat z. B. im Profil A die linke Säulenbase bis zu 2,6 cm Abtrag erfahren und in Profil C ist ein Teil von 3,5 bis 6,6 cm Tiefe herausgebrochen. Das mittlere Plattenteil zeigt Aufrauungen und Verluste von Spitzenwerten bis 8 mm. In einigen Bereichen sind auch kaum Veränderungen aufgetreten, besonders im Zentralbereich der Platte. Auf der beobachteten Fläche von ca. 2 m² hat sich im Laufe von 17 Jahren ein Gesamtverlust von 4,25 dm³ ergeben, was einer durchschnittlichen Abwitterungstiefe von 2,1 mm entspricht.
- Die Abtragungstiefen pro Jahr betragen somit ca. 0,12 mm, wobei berücksichtigt werden muß, daß punktuell mechanische Beschädigungen nicht auszuschließen waren.
- Über das Differenzmodell wurde pro Jahr ein Verlust von 125 cm³/m² berechnet, was einem gewichtsmäßigen Abtrag von 275 g/m² entspricht. In den letzten 17 Jahren hat das Epitaph insgesamt gewichtsmäßige Verluste von 4,67 kg/m² erlitten.

Bei diesen berechneten Werten muß aufgrund der geschilderten Meßbedingungen ein gewisser Toleranzspielraum eingeräumt werden. Der Vergleich mit den Querprofilen zeigt aber, daß die Angaben plausibel sind. Weiterhin wurden diese Ergebnisse unter der Annahme eines linearen Schadensverlaufs ermittelt, was sicher nicht immer zutrifft. Trotz dieser Einschränkungen können diese Messungen eine quantitative Vorstellung von Abtragungsraten und Verwitterungstiefen liefern.

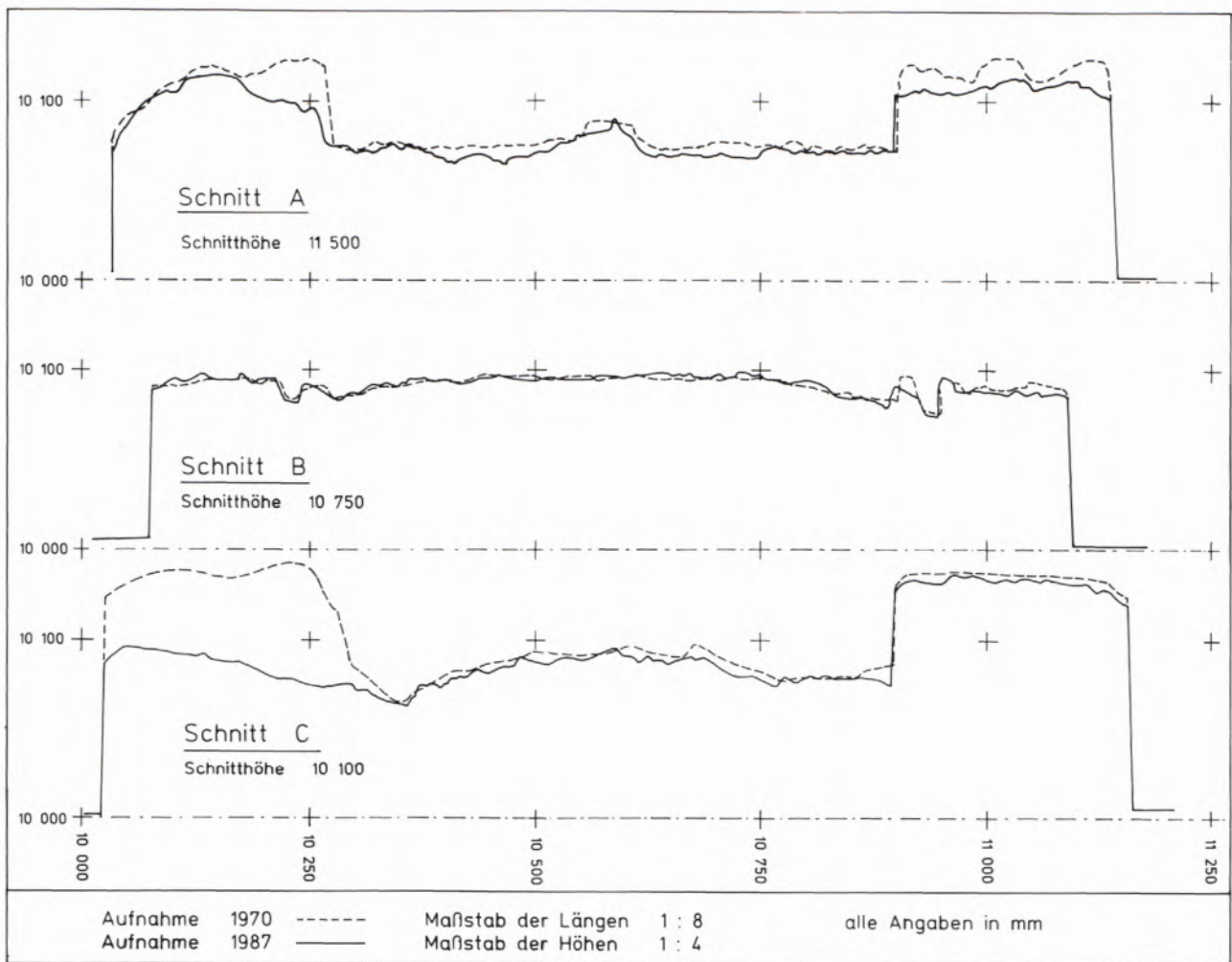
7. Schluß

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, daß eine präzise photogrammetrische Aufnahme und Vermessung von Schäden nicht nur zur Reproduzierbarkeit von Schadensbeschreibungen beiträgt, sondern darüber hinaus Daten zur Geschwindigkeit der Schadensentwicklung und des



16 ESSLINGEN, St. Dionys, Epitaph an der Nordseite des Chores. Ausschnitt aus der photogrammetrischen Aufnahme von G. Nagel, 1970.

17 ESSLINGEN, St. Dionys, Epitaph an der Nordseite des Chores. Photogrammetrische Vermessung der Bruchkanten und Darstellung der gemessenen Schnitte aus der Aufnahme von 1987.



18 ESSLINGEN, *St. Dionys, Epitaph an der Nordseite des Chores*. Darstellung der photogrammetrisch gemessenen Schnitte aus den Aufnahmen von 1970 und 1987. Der Vergleich zeigt, daß an herausragenden Stellen wie Kapitellen und Basen starke Verluste entstanden sind, im Zentralbereich der Platte dagegen keine Veränderungen stattgefunden haben. (Umzeichnung nach der Auswertung von K.-H. Österle.)

Erfolges von Konservierungsmaßnahmen liefert. In Verbindung mit den naturwissenschaftlich-technischen Untersuchungen ist es möglich, Gesamtaussagen über den Zustand von Natursteinfassaden zu gewinnen. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß der Abwitterungsfortschritt bei Schalenbildung, Abschuppung und Absanden kein langsamer Prozeß ist. Mit dieser Arbeit konnten Werte für Abtragsraten in verschiedenen Bereichen angegeben werden. Diese Ergebnisse sind sicher auf ähnliche Sandsteinvarietäten und vergleichbare Schadensbilder größenordnungsmäßig übertragbar.

Ellwangen. Werkstoff und Konstruktion II. Festschrift zum 65. Geburtstag von G. Rehm 1989, S. 94–111.

U. Knapp: Eine Musterrestaurierung des 19. Jahrhunderts. Die Instandsetzung der Klosterkirche Salem in den Jahren 1883 bis 1894. Denkmalpflege in Baden-Württemberg, Heft 3/1988, S. 138–146.

K.-H. Österle: Photogrammetrische Aufnahmen am Kloster Salem, Bodenseekreis, und Versuch der Interpretation und quantitativen Erfassung umweltbedingter Schäden an Sandsteinoberflächen. Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik in Stuttgart 1988.

Literatur:

G. Eckstein, D. Müller: Geodäsie und Photogrammetrie in der Denkmalpflege des Landes Baden-Württemberg. Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft Juli 1989, Tagungsführer zum 73. Deutschen Geodätag 30. 8.–2. 9. 1989, S. 81–97.

G. Grassegger: Das Verwitterungsverhalten der Stubensandsteine – Untersuchungen am Beispiel der Basilika St. Vitus/

Dipl.-Geologin Dr. Gabriele Grassegger
LDA · Bau- und Kunstdenkmalpflege
Ing. (grad.) Günter Eckstein
LDA · Referat Photogrammetrie
Mörikestraße 12
7000 Stuttgart 1