

Bitte zur Akte
Dom Meissen, 03700/02

18.11.98

J.-H.Kallweit, M.Konczalla.
Fachbereich Werkstoffe und Verfahren, Fachhochschule Osnabrück.

231298

Klimabedingte Bauschäden am Dom zu Meissen.

1. Einleitung

1-1. Anstoss zu vorliegender Untersuchung.

Während der Restaurationsarbeiten am Dom zu Osnabrück wurden 1994 historische Eisenanker geborgen. Teile wurden an Apel, Fachhochschule Osnabrück, mit der Bitte übergeben mit Hilfe von metallographischen Untersuchungen das Alter der Teile abzuschätzen. (1)(2). Es entstand die Idee, parallel dazu Stähle unterschiedlicher Herstellungszeiten, vom Puddeleisen bis zu modernen Baustählen, zu untersuchen. Der Lions Club Osnabrück war seit 1976 engagiert, den Erhalt des Domes zu Meissen zu unterstützen. Auf diesem Wege erhielt einer der Autoren (Kallweit) als damaliger Vorsitzender des Dombau-Vereins Kenntnis von Korrosionsproblemen an den im Dom eingebauten Stählen. Diese Stähle wurden in die Untersuchungen mit einbezogen und zusätzlich nach Gründen für das beobachtete recht unterschiedliche Korrosionsverhalten gesucht. Die Schäden wurden zunächst der hohen SO₂-Belastung in den vergangenen Jahren zugeschrieben. Aus diesem Grunde war die Sanierung der Westtürme bevorzugt von der Deutschen Stiftung Umweltschutz als Modellversuch finanziert worden. (3). Die Untersuchungen ergaben recht bald, daß die beobachteten Schäden an den Stählen und Steinen weitere Ursachen haben müßten. Die Aufgabenstellung erweiterte sich derart, daß im Laufe der Zeit insgesamt fünfzehn Kollegen der Fachhochschule und der Universität Osnabrück Teilaufgaben übernahmen. Diese Arbeiten wurden generell freiwillig und kostenlos außerhalb der Dienstzeit als Hilfe für die Restaurierungsarbeiten in den Neuen Bundesländern geleistet. (4)¹

1-2. Eingrenzung der bearbeiteten Probleme.

An dieser Stelle wird von den umfangreichen metallographischen Untersuchungen, obgleich hilfreich bei Diskussion von Korrosionsschäden, nicht berichtet werden. Weiter werden die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen hier nicht behandelt. Sie sind in (4) nachzulesen. Es sei lediglich anhand der Abb.1 und Abb.2 die Fortschritte der Metallurgie in den letzten drei Jahrhunderten exemplarisch dargestellt. Abb.1. und Abb.2.

Die nachstehenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf Stähle, die bei Wiederrichtung der Domtürme in Meissen eingesetzt wurden. Die von Schäfer in der Zeit von 1904 bis 1908 nach heftigen Diskussionen unter Restauratoren, Baufachleuten und der Landeskirche als Neuentwürfe wieder errichteten Domtürme tragen die Turmhelme auf einem schlanken Säulenoktagon, das ohne steinerne Querverstrebungen errichtet wurde. Beim Hochziehen der Säulen wurden in drei Höhen rechteckige Stahlträger eingezogen und innerhalb der Säulen verankert. Diese Stähle und weitere, die die Verstrebungen im Treppenhaus und an anderen Stellen unterstützen, wurden später nicht entfernt, da sie als statisch unverzichtbar erschienen. Abb.3. Bei allen Stählen traten Korrosionsschäden in unterschiedlicher Formen auf.

Die gravierenden Korrosionserscheinungen am Stein werden hier nicht behandelt. Es sei auf Gutachten hingewiesen. (6),(7).(8). G.Donath und M.Donath publizierten in (9) eine ausführliche Zusammenfassung über die Steinschäden und die erfolgten Sanierungen. Die Art der Bauschäden am Baukörper liessen vermuten, daß nicht unerhebliche mechanische Spannungen vorgelegen haben mußten. Es wurden im Labor für Simulationstechnik der

¹ Im Gegensatz zu Anmerkungen in (5) wurden zu keinem Zeitpunkt Verpflichtungen bezüglich fester Termine übernommen, da z.T. Fragen grundsätzlicher Art zu bearbeiten waren.

Fachhochschule Osnabrück Modellrechnungen bezüglich der Auswirkung einseitiger Erwärmung durch Sonneneinstrahlung und durch Windbelastungen durchgeführt.

2. Korrosionsprobleme an den eingebauten Stählen.

2.1. Art der korrosiven Belastung.

Da der Dom auf einem Felsen über der Stadt errichtet wurde, ist er den Abgasen aus Hausbrand, Industrie und Verkehr besonders ausgesetzt. Nach dem Kriege führte der fast ausschliessliche Einsatz von Braunkohle zu einer hohen Belastung mit Schwefeldioxyd. Hier wurde zunächst die Hauptbelastung vermutet.

Die hohen solitär stehenden Türme sind naturgemäß starken Wind- und Regeneinwirkungen ausgesetzt, sie bedeuten für Korrosionsvorgänge ein unvorteilhaft erhöhtes Angebot an Sauerstoff und Feuchtigkeit.

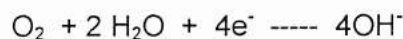
An den Verankerungsstellen der Stähle im Stein können bei nicht sachgerechter Einbettung aus dem Stein und aus den Einbettmaterialien korrosionsförderliche Stoffe austreten.

2.2. Grundprinzipien der Sauerstoffkorrosion

Korrosionsvorgänge sind in der überwiegenden Mehrzahl elektrochemischer Natur, es sind exotherme, selbstablaufende Vorgänge. (19). Daß diese Reaktionen nicht zu schnellen Zerstörungen führen, liegt an der Ausbildung porenfreier gasdichter Oberflächenschichten, die die Reaktionspartner trennen. Die Größe der Diffusionsgeschwindigkeit von Sauerstoff und Feuchte und ihre Geschwindigkeit des eventuellen Eindringens durch Risse etc. bestimmen die Reaktionsgeschwindigkeit. Wasser besitzt die für die Korrosion bedeutsame Eigenschaft, Salze zu lösen und damit Elektrolyte mit elektrischer Leitfähigkeit bilden zu können. Metalle können in Elektrolyten direkt als Metallionen aufgelöst werden. Z.B.:



Aus Gründen der Elektroneutralität müssen an anderen Stellen Elektronen-verbrauchende Gegenreaktionen ablaufen. Das kann durch Reduktion des im Elektrolyten aufgenommenen Sauerstoffs geschehen nach dem Schema:



In sauren Lösungen (H-Ionen !) kann eine Reduktion der Wasserstoffionen zu Wasser erfolgen nach :



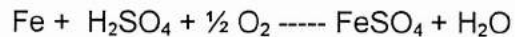
Die geometrische Trennung der anodischen und kathodischen Bereiche in Metallen kann sich von den Gitterabständen der kristallinen Strukturen bis zur Größenordnung sichtbarer Distanzen erstrecken, aber nicht beliebig weit. (Wirkungs-Reichweite von Schutzelektroden.)

Die Elektronenabgabe an den anodischen Bereichen, bzw. die ausgleichende Elektronenaufnahme in den kathodischen, erfolgen meist nicht mit dem gleichem Energieaufwand. Es bilden sich zwischen den Elektroden im oxydierten und reduzierten Zustand Potentialunterschiede aus. Dieses „Redoxpotential“ ist von entscheidendem Einfluß für den Ablauf der Korrosionsvorgänge. Es ist von der Leitfähigkeit im Elektrolyten, von der Ionenkonzentration und dem pH-Wert des Elektrolyten abhängig.

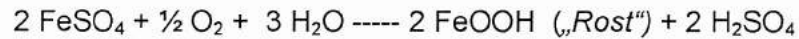
2.3. Grundprinzipien der Korrosion in SO₂-Atmosphäre

Rostschichten besitzen ein ausgeprägtes Speichervermögen für Feuchtigkeit und im Besonderen für Schwefeldioxyd. SO₂ bildet zusammen mit Wasser schweflige Säure, die durch zu-

zusätzlich präsenten Sauerstoff zu Schwefelsäure oxydiert wird. Diese löst die Reaktion aus:



Die Bildung des Eisen(II)Sulfats ist der eigentliche Korrosionsvorgang in mit Schwefeldioxyd belasteter Atmosphäre. Der vorhandene Sauerstoff oxydiert das Eisen(II)Sulfat aber weiter zu Eisen (III)Sulfat. Beide Sulfattypen hydrolysieren in Wasser und Sauerstoffumgebung zum eigentlichen „Rost“ nach:



Die neu entstehende Schwefelsäure beschleunigt den Vorgang. Schwefelverbindungen können im Stahl auch als Eisensulfid vorliegen oder bei Verankerungen im Stein aus gipshaltigen Einbettmassen austreten und an diesen Stellen in Verbindung mit Wasser Korrosion auslösen. Bei undichten Einbettungen kann es leicht kapillar eingezogen werden.

3. Prüfverfahren zum Nachweis von Korrosions-Promotoren in den Oberflächen.

3.1. Suche nach Schwefel in den Stahloberflächen.

Wenn Schwefeldioxyd aus der Atmosphäre Hauptauslöser des Rostens der Stähle am Dom zu Meissen ist, müßte es sich in den Stahl-Oberflächen nachweisen lassen. Elektrochemische Potentialmessungen nach DIN 50900 ff hatten gezeigt, daß die Stähle aus Meissen in Schwefeldioxyd-haltiger feuchter Luft korrodieren müßten. Klassische chemische Analysen ergaben keine Hinweise auf Schwefel in den Oberflächen. Es wurden daher mehrere moderne Verfahren mit erhöhter Nachweis-Empfindlichkeit eingesetzt. Sie sind in (4) beschrieben worden.

Klassische chemische Naßanalyse.
Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX).
Elementenverteilung im Rasterelektronenmikroskop.
Wellenlängen-dispersive Mikroanalyse (Mikrosonde).
Röntgen-angeregte Photonen Spektroskopie (ESCA).
Sekundär-Ionen-Massenspektroskopie.

Die Ergebnisse waren zunächst enttäuschend. Mit keinem der Verfahren konnte in den Oberflächen freistehender Stähle Schwefel nachgewiesen werden. Dagegen wurde Schwefel an Stücken aus den Verankerungsstellen sowohl in den Oberflächen als auch in anhaftenden Mörtelresten sicher nachgewiesen.

Die Gesamtanalysen (EDX-Analysen an Oberflächen und Schnitten) ließen aufgrund des festgestellten Kupfergehaltes vermuten, daß um die Jahrhundertwende Minette-Erze aus Lothringen zur Stahlerzeugung eingesetzt worden waren. Zusätzlich war aufgefallen, daß die Stähle aus Meissen erhebliche Schwankungen in den Gehalten von Stahlbegleitern aufwiesen. Diesem Umstand war aber wegen der Fixierung auf die Suche nach Schwefel zunächst keine Beachtung geschenkt worden. Erst Diskussionen unter historischen Gesichtspunkten der Eisenmetallurgie (14) brachten den Hinweis nach Phosphor zu suchen, das durch Seigerungs-Vorgänge während der Verhüttung örtlich angereichert wurde.

3.2. Suche nach Phosphorseigerungen.

Bei dem um die Jahrhundertwende üblichen Siemens-Martin-Verfahren wird der Kohlenstoffgehalt durch Windfrischen auf den Endwert herausgeblasen. Beim Giessen von Rohbrammen verbindet sich der Sauerstoff infolge der abnehmenden Löslichkeit mit dem in der Restschmelze angereicherten Kohlenstoff zu Kohlenmonoxyd. Das in der Schmelze aufsteigende CO bewirkt eine Badunruhe, („Koch-Reaktion“). Da der Block von außen nach

innen abkühlt, erfolgt eine Anreicherung der Stahlbegleiter im Inneren der Bramme. (Blockseigerung). Diese „unberuhigt“ gegossenen Stähle haben eine homogene, saubere Oberfläche, die geseigerte Kernzone ist für Korrosionsvorgänge nicht zugänglich. Dieser Zustand bleibt normalerweise beim Ausschmieden erhalten. Sollten aber relativ kleine Profile, wie sie z. B. in Meissen eingesetzt wurden, gefertigt werden, wurden die Brammen auch schon einmal in Längsrichtung getrennt, um das Ausschmieden zu erleichtern. Das bedeutet aber, daß in diesem Fall die Seigerungen der Kernzone nach außen gelangen. Im Raster-Elektronenmikroskop wurde mit Hilfe von EDX-Analysen die Elementenverteilung potentieller Seigerungs-Komponenten abgefragt. Es zeigte sich, daß an den Schnitt-Oberflächen Eisenphosphide örtlich angehäuft vorlagen. Eisenphosphide neigen von allen Stahlbegleitern am stärksten zu Seigerungen, sie sind korrosionsfördernd.

4.0. Deutung der beobachteten unterschiedlichen Korrosionsformen.

Der Stand der um die Jahrhundertwende angewandten Stahlgußtechnik gestattete noch nicht die Herstellung von Stählen mit vollständig homogenem Feinkorngefüge. Da die Zuganker nicht ausgetauscht werden können, bleibt die Korrosionsgefährdung bei den vorhandenen Klimata vom Prinzip her bestehen. Gegenmaßnahmen müssen den örtlichen Gegebenheiten angepaßt werden.

Korrosive Schäden an den Stählen wurden schon in älteren Gutachten beschrieben, sie bezogen sich aber ausschließlich auf die Verankerungsstellen, wo Treibrost Rissaufweitungen verursachte. (6), (7), (8). Da aber an den freistehenden Eisen andere Schadensbilder beobachtet wurden, mußten Materialeigenschaften des Eisens selbst die Korrosionsschäden zusätzlich beeinflussen. Vier unterschiedliche Roststrukturen wurden an den Stahlträgern beobachtet:

Ohne Kontakt mit Stein, flächenhafter Abtrag („*Flächenkorrosion*“).

Ohne Kontakt mit Stein, Muldenfraß und Lochfraß („*Korn Grenzenkorrosion*“).

Mit Kontakt zum Stein, Rostaufblähungen („*Quellrost*“, „*Spaltkorrosion*“).

Im Bereich der Verankerung verstärkter Rostanfall („*Kontaktkorrosion*“).

4.1. Flächenkorrosion.

Beim Schmieden der unberuhigt gegossenen Stahlträger entstehen auf der Oberfläche allgemein geschlossene korrosionshemmende Schichten von Eisenoxyd Fe_3O_4 . (Dunkler Hammerschlag). Werden diese Schichten durch mechanische Bewegungen (Wind) oder durch thermische Belastungen aufgerissen, kann an diesen Stellen durch Luftsauerstoff und Feuchte ein Belüftungselement entstehen. Da die Rissbildung meist gleichmäßig verteilt ist, entsteht Flächenkorrosion. Liegen im Stahlgefüge Schmiedetexturierungen vor, legen unterschiedliche Korrosionsgeschwindigkeiten diese Strukturen frei. Das war an den Proben aus Meissen festzustellen. Reine Flächenkorrosion ist selten und erfolgt nur bei sehr gleichmäßigem, sehr feinem Gefüge. (z. B. bei Eisenbahngleisen, sie ist dann meist nicht gravierend.) An den Proben aus Meissen wurde bevorzugt eine Mischform der Flächenkorrosion mit Ansätzen zur Muldenkorrosion beobachtet. Da die zweifellos in der Luft vorhandenen Schwefelkonzentrationen nicht zu nachweisbaren Schwefelverbindungen an den Oberflächen der freistehenden Stähle führten, muß angenommen werden, daß das große Angebot von Sauerstoff zur Dominanz von Sauerstoffkorrosion führte. Schwefelverbindungen wirkten lediglich als Korrosions-Promotoren und wurden immer wieder durch Regen ausgewaschen. Abb. 3. Bei dieser Hypothese muß aber einschränkend darauf hingewiesen werden, daß die Möglichkeiten zur Probenentnahme an den eingebauten Verstärkerstählen extrem limitiert war, Aussagen für alle Stahlanker sind so nicht möglich.

4.2. Lochfraß, Muldenkorrosion.

Befinden sich unter der oxydischen Oberflächenschicht Bestandteile mit örtlichen Ausscheidegefügen, kann es zu örtlichen Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Gefügebestandteilen wie Ferrit oder Zementit kommen. Die Korrosionsvorgänge verlaufen so von außen nach innen entlang von Korngrenzen. Es kann zu gefügebedingten Rissausbreitungen kommen. Noch gravierender wirken Ausscheidungen von Legierungselementen oder von im Stahl noch vorhandenen Eisenverbindungen wie Phosphide oder Sulfide. Sie führen zu starken Potentialunterschieden und damit zu Korrosion innerhalb der oberflächennahen Materialschichten. Muldenkorrosion und Lochfraß sind immer Zeichen von Inhomogenitäten im Material. Die teilweise beobachtete extreme Muldenkorrosion dürfte Folge von Eisenphosphiden sein, die durch die Verfahrenstechnik der Profilverstellung an die Oberflächen gelangten. Abb.4.

Abhilfe bei den oben genannten Korrosionsformen an freistehenden Stahlankern kann nur durch Oberflächenschutz gewährleistet werden. Die Schutzschichten sollten so dauerelastisch sein, daß sie nicht durch thermische oder mechanische Wechselbelastungen aufgerissen werden. Die Stähle sind im Prinzip alle ohne Gerüstbau zugänglich. Vor dem Schutzanstrich ist eine Entrostung angezeigt, sie kann inzwischen auch biologisch mit Hilfe von Siderophoren erfolgen (10). Schutzverfahren sind nicht Thema der vorliegenden Arbeit. Es sei aber erwähnt, daß die Deutsche Bundesstiftung Umwelt ein neues Korrosionsschutz-Verfahren auf der Basis von Polyphenylaminen fördert. (11), (12), (13)..

4.3 Spaltkorrosion. (Quellrost).

Dieser besonders gefährliche Korrosionstyp wurde bereits von Baer und Reiss beschrieben. (6), (7). Befinden sich zwischen Metallteilen schmale Spalten (z.B. nicht durchgeschweisste Wurzeln von Schweissnähten oder zwischen Metall und Nichtleitern, z.B. Mauerhaken im Stein), kann infolge von Kapillarkräften äußere Feuchtigkeit nach innen eingezogen werden. In den Spalten ist durch Diffusionshemmung der Austausch mit außen anstehendem Wasser erschwert, es kommt zu einer Elektrolytbildung mit zunehmender Konzentration. Ist der benutzte Einbaumörtel nicht neutral, wird der Vorgang beschleunigt. Da Rost die Dichte von etwa $3,5 \text{ g/cm}^3$ hat, Eisen aber $7,9 \text{ g/cm}^3$, kommt es zu Volumenvergrößerungen. Die entstehenden Schichtungen sind meist nicht optimal dicht gepackt, es kann im Extremfall bis zu etwa 7-facher Volumenvergrößerung mit erheblicher Sprengkraft kommen. Können die Verankerungsstellen durch mechanische Kräfte noch quer zum Anker bewegt werden, entstehen kritische Situationen. Eigenbewegungen des Säulenoktogons durch Wind und Sonne sind am Dom zu Meissen nicht auszuschließen. Abb.5.

4.4. Kontaktkorrosion.

Beim Abbinden von Gips oder Gipsmörtel entsteht nur bei stöchiometrischer Zugabe von Wasser ein trockenes Haufwerk von Dihydratkristallen $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Da auf Baustellen meist mit Wasserüberschuss gearbeitet wird, entsteht ein poröses Material, dessen Hohlräume mit Calciumsulfatlösung angereichert sind. Sie können im Kontakt mit Eisen, und selbst bei verzinktem Eisen, Korrosion auslösen. Wenn von außen Wasser kapillar stetig eingezogen wird, kommen die Korrosionsprozesse nicht zum Stillstand. In Meissen wurde gipshaltiger Mörtel eingesetzt. (5). Abb.6. Es entstand ebenfalls Quellrost.

Die durchgeführten Sanierungs und Präventivmaßnahmen an den Verankerungsstellen am Dom zu Meissen sind von Donath ausführlich beschrieben worden.² (5). Durch das Fehlen elastischer Abdichtungen, z.B. Bleiversiegelungen, wurde die Rissaufweitung an den Veran-

² Bei Schutzmaßnahmen mit Hilfe von Opferelektroden muß beachtet werden, daß diese keine Fernwirkungen auf freistehende Stahlteile in größeren Abständen haben.

kerungsstellen sicherlich mit durch Quellrost ausgelöst. Die oft zu beobachteten Stein-schäden mit Rissen unter 45° wiesen aber darauf hin, daß Quellrost allein nicht Ursache dieser Schäden gewesen sein konnte. Es mußten zusätzlich mechanische Belastungen gewirkt haben. Sie wurden in Wechselbelastungen infolge Sonneneinstrahlungen und infolge von Wind vermutet. Zu deren Grobabschätzung wurden daher Simulationsrechnungen über FEM-Verfahren durchgeführt.

5.0 Der Einfluß von Sonneneinstrahlungen und Wind auf das Säulenoktogonal.

5.1. Geometrisches Ersatzmodell.

CAD-gestützte Modell-Berechnungen der Verformungen von geometrischen Strukturen unter Last ersetzen als ersten Verfahrensschritt die reale geometrische Form durch ein dreidimensionales Elementennetz, das die Geometrie als Summe finiter Elemente (FEM) beschreibt. Anzahl der gewählten Elemente und Knoten im Netzwerk bestimmen den rechnerischen Aufwand der Gesamtanalyse. Gleichzeitig beeinflusst die vorgegebene reale Geometrie die Anzahl der mindest notwendigen FEM-Elemente. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, ist es oft notwendig, die reale Geometrie durch eine vereinfachte Modell-Geometrie zu ersetzen. Bei so komplizierten Geometrien wie bei einem gotischen Dom sind vereinfachende Ersatz-Modelle unabdingbar. Siehe Ansicht des oberen Turmaufbaues Abb. 7. Die Rechnungen zur Analyse der thermisch induzierten Spannungen beziehen sich nur auf das Säulenoktogonal, das die Turmhelme trägt, die Berechnung der windinduzierten Spannungen berücksichtigt das Säulenoktogonal und die Turmhelme. Wegen der Symmetrie der Säulenordnungen wurden die Rechnungen am Oktogonal auf einen Viertelausschnitt bezogen, die Säulengeometrie wie in Abb. (8a) und Abb. (8b) dargestellt. Das geometrische Ersatzmodell des oberen Turmes zeigt Abb. (9). Es muß gerade hier darauf hingewiesen werden, daß durch den notwendigen Verzicht auf die komplizierten gotischen Bauelemente das Windverhalten nur bedingt beschrieben werden kann.

5.2. Belastungsmodell bei Simulation der thermisch-induzierten Lasten.

Für die Simulationsrechnungen wurde eine Workstation SUN SPARC 10 mit der Software Ansys 5.3 eingesetzt. (15).

Es wurde das Eigengewicht der Oktogonsäulen und das Gewicht der Turmhelme berücksichtigt, das anteilig verteilt auf den Pfeilern lastet. Die Pfeiler ruhen fixiert gegen Verschiebungen in Schwerkrachtrichtung auf der Aussichtsplattform der Türme, nach oben können sich die Pfeiler gegen die Schwerkrachtrichtung gegen das Gewicht der Turmhelme verschieben. Die thermische Belastung durch Sonneneinstrahlung war nicht abschätzbar. Es fehlten Angaben zum Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit vom Schwärzungsgrad des Mauerwerkes, der wechselnden Feuchtegehalte und der Abkühlung durch variable Winde. Es wurde daher auf die gemessenen Werte von Temperaturdifferenzen Schattenseite-Einstrahlungsseite zurückgegriffen. Die Wärmebelastung wurde durch ein mittleres Temperaturfeld mit folgenden Eigenschaften abgebildet: In Haupteinstrahlrichtung entsteht ein Temperaturgradient von $20 \text{ K}/0,6 \text{ m}$. Das Temperaturfeld wurde als stationär angenommen, d.h. „die Sonne steht still“. Die Längenwahl $0,6 \text{ m}$ wurde gewählt, weil dadurch etwa die halbe Dicke der Pfeiler linear nach innen thermisch belastet wird. Die vereinfachende Annahme eines linearen Temperaturgradienten und statischer Belastungen ergeben Minimalwerte der Beanspruchung. Nach Donath wurden zwischen Sonnen- und Schattenseite Temperaturunterschiede bis in den Bereich von $(50,60 \text{ K})$ gemessen. Der Temperaturgradient fällt im Rechenansatz linear mit den Winkelabweichungen zur Haupteinstrahlrichtung ab, d.h. der Gradient ist bei senkrechtem Strahleneinfall am größten, bei 90°

Abweichung = 0. Abb (10).veranschaulicht die unterstellte thermische Belastung.Die Ergebnisse der für die Verschiebungen in Metern und Spannungen in Pascal.sind als Mittelwerte von Bereichen Farblisch kodiert dargestellt.Die zugehörigen Zahlenwerte sind der Legende zu entnehmen.³

5.3. Ausgewählte Ergebnisse der Simulationsrechnungen.

Abb. 11 dokumentiert die resultierenden Verschiebungen im Säulenoktagon. Die Säulen verdrehen am oberen Ende ungleichmäßig nach außen.Verschiebungen verhindern den Aufbau von Spannungen,diese sind daher am fixierten Säulenfuß am größten,wobei hier besonders gefährliche Zugspannungen auftreten. Abb.12,Abb.13.In Abb.14 symbolisieren Länge und Lage der Vektoren den Betrag und die Richtung der Hauptspannungen.Es wird deutlich,daß einseitige thermische Belastungen dazu führen, die Pfeiler auf dem feststehenden Turmsockel unter Torsion herauszudrehen.Es können hierdurch an diesen Stellen Risse entstehen.In der Praxis wandert die Sonne um die Türme herum,es wandern die erzeugten Spannungen im Tagesrhythmus mit.Da die Spannungen durch relative Temperaturdifferenzen von außen nach innen verursacht werden,aber bei linear angenommenen Wärme-ausdehnungs-Koeffizienten nicht von der Absoluthöhe der Temperaturen, entstehen periodische Wechsel-Belastungen,die nicht auf die Hochsommerzeit beschränkt sind.

Thermisch induzierte Verformungen beachtlichen Ausmaßes wurden auch am Großen Wendelstein in Torgau gemessen.(15)

An den Einbindungsstellen der stählernen Zuganker entstehen in unmittelbarer Nähe zum Stein die größten Spannungen.Das führt wegen der induzierten inneren Spannungen im Stahlgefüge zu erhöhter Korrosionsanfälligkeit. Abb.15. Sollten in der Struktur korrosionsbedingte Anrisse kritischer Größe entstehen,kann es zur Rissfortplanzung und Bruch kommen.

Die Steinausbrüche an den Einbindungstellen der Verstärkerstähle zeigen Bruchlinien unter 45° zur Normalbelastung.(Eigengewicht),hier verlaufen nach den Regeln der Statik die Hauptspannungslinien.Die Steinfugen sind hier aber durch Quellrostbildung nicht nur gespalten,sondern die Steine sind zusätzlich aus dem Mauerwerk herausgeschoben.Es wurde vermutet,daß hier durch Windbelastungen induzierte Wechsel-Spannungen wirksam wurden.Es wurde daher an einem geometrisch vereinfachten Turmmodell die Wirkung des Staudruckes von Wind simuliert.Abb.16.

5.4. Windinduzierte Belastungen.

Es wurde dasselbe Rechnersystem wie unter 5.3. mit einem Updating zu Ansys 5.4 eingesetzt.Das Säulenoktagon und die Turmhauben wurden durch ein vereinfachtes Ersatzmodell beschrieben. Der Verzicht auf die Berücksichtigung der gotischen Feinstruktur war notwendig,um den Rechenaufwand für das zu generierende FEM-Netzwerk der Rechnerkapazität anzupassen.Wegen der Symmetrie des Turmes konnte mit einem Halbmodell gearbeitet werden.Der Wind greift in der eingetragenen x-Richtung an.Wegen ihrer Masse und Festigkeit wurde die Turmhaube als starres Bauteil aufgefaßt..Es wird wie unter 5.3 angenommen,daß das Säulen-Oktagon fest mit dem Turm-Unterteil verbunden ist. Das FEM-Ersatzmodell des Oktogons mit dem Turmhelm ist in Abb (17) aus zwei Blickrichtungen wiedergegeben.

Es wurde mit einer laminaren Luftströmung der Geschwindigkeit von 8.1 m/s gerechnet. (Unterer Bereich Windstärke 5 nach der Beaufortskala).Sie erzeugt nach der Gleichung von Bernoulli einen senkrechtem Staudruck von 43 Pa .Es muß hier festgestellt werden,daß die an der aufgerissenen gotischen Struktur der Bauoberfläche entstehenden Windturbulenzen zu nichtlaminaren Strömungsanteilen führen. Diese Anteile bleiben unberücksichtigt.Die

³ Die Angabe unrealistischer Dezimalstellen bei den Werten ist eine Eigenschaft der benutzten Software.

Rechnungen wurden mit und ohne Berücksichtigung des Eigengewichtes des Baukörpers durchgeführt.

5.5 Ergebnisse der Simulationsrechnung.

Abb.(18) zeigt die Absolutverschiebungen durch Windlast bei laminarer Anströmung. Der Turmhelm wird entsprechend der Annahme absoluter Starrheit in Windrichtung geneigt. Die errechneten Maximalwerte von $6.78 \exp -6$ Metern zeigen, daß infolge des Eigengewichtes der Turmhelme eine Verschiebung durch Windlast praktisch auszuschließen wäre. Selbst bei Orkanböen der Windstärke 11 (Windgeschwindigkeit etwa 30 m/s) würde die Verschiebung nur etwa um den Faktor 10 größer werden. Es sei aber darauf hingewiesen, daß diese Aussagen nur für statische laminare Anströmungen gilt. Wenn bei dynamischen Belastungen bei unterschiedlichen Frequenzen Resonanzbereiche durchlaufen werden, kann es zu Resonanzschwingungen mit größerer Amplituden kommen. An den fixierten Säulenfüßen des Oktogons treten die geringsten Verschiebungen auf, damit aber die größten Spannungen. Im starren, als Ganzes beweglichen Turmhelm werden praktisch keine Spannungen aufgebaut. Die Abb.19 zeigt den Teilausschnitt des Säulenoktogons und Abb.20 den Spannungsaufbau im Inneren der Säulenenden. An der Luvseite entstehen Zugspannungen, an der Leeseite Druckspannungen. Der Vergleich der Größenordnung der im Prinzip gefährlicheren Zugspannungen mit den durch das Eigengewicht immer vorhandenen Druckspannungen zeigt aber, daß die Zugspannungen immer überkompensiert werden, es herrschen summarisch immer Druckspannungen. Die Simulationsrechnungen ergeben, daß Bauschäden durch statische laminare Windlasten entgegen den Vermutungen im Bereich der aufgesetzten Türme nicht wahrscheinlich sind.

5.6. Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse der Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen erscheinen bei erstem Augenschein im Widerspruch zu den greifbaren Erfahrungen zu stehen: Die Windlast wird körperlich empfunden, die Spannungen durch thermische Belastungen dagegen nicht. Bei unterdrückter thermischer Ausdehnung entstehen jedoch um Größenordnung höhere Spannungen. Die Beanspruchung des Säulenoktogons durch einseitige Erwärmung ist gegenüber statischer Windbelastung wesentlich höher. Andererseits dürfte bei gleichzeitiger Windeinwirkung die Erwärmung der Steinoberflächen durch Konvektion jedoch merklich reduziert werden. An den Säulenfüßen entstehen gefährliche Zugspannungen, die Säulen werden unter Verformung nach außen hin tordiert. Die in das Oktogon aus Gründen der Baustatik eingezogenen Stahlanker erzeugen an den Verankerungsstellen zusätzliche mechanische Spannungen. Diese führen zu erhöhter Korrosionsgefährdung. Das bedeutet die Notwendigkeit aktiven Rostschutzes gerade in diesen Bereichen.

Klimabedingte Bauschäden können zusätzlich im Winter entstehen, wenn in Spalten eingedringendes Wasser friert und das mit sinkenden Temperaturen zunehmende Volumen des Eises zu erheblichen Spannungen führen kann. Ob die verwendeten Steine in den Oberflächen zu gefährlicher Wasseraufnahme neigen, kann von dieser Stelle nicht beantwortet werden. Diese Vorgänge müßten noch untersucht werden. In jedem Fall war die erfolgte sorgfältige Verschließung der Fugen an den Einbindungsstellen der Anker eine notwendige Präventionsmaßnahme.

An den Stahlankern und Bändern werden unterschiedliche Rosttypen beobachtet. Außer an den Einbettungsstellen am Stein dürfte Sauerstoffkorrosion dominierend sein, diese wird durch das atmosphärische Schwefeldioxyd als Korrosionspromoter stimuliert. An den zwangsläufig wenigen zur Verfügung stehenden Proben aus freistehenden Stahlankern konnten auch mit modernsten Analysemethoden keine Schwefelverbindungen an den Oberflächen festgestellt werden. Das Gefüge der um die Jahrhundertwende gefertigten Stähle zeigt infolge von Korngrenzenkorrosion Flächenkorrosion mit Ansätzen zur

Muldenkorrosion. An den Verankerungstellen in Verbindung mit chemischen Reaktionen Quellrost. An einigen Stählen wird ausgeprägte Muldenkorrosion beobachtet. Sie dürften durch Phosphoreicherungen hervorgerufen worden sein. Diese sind wahrscheinlich durch Längsteilungen der Brammen während der Profilverfertigung an die Oberfläche verlagert worden. Während die Korrosionsschäden an den Stahlankern durch erweiterten aktiven Rostschutz wohl weitgehend verhindert werden können, dürften die thermisch induzierten Spannungen eine mit der Art des Baukörpers verbundene Problematik bleiben.

Es wird angeregt, durch Einbau geeigneter Sensoren an den bekannten Gefährdungsstellen eine weitgehend automatisierte zeitliche Dauerkontrolle der mechanischen Spannungen und Verschiebungen einzurichten. Zusätzlich dazu sollten die relevanten Klimadaten wie Feuchte Temperatur und Wind nach Stärke und Richtung gemessen werden. Es könnte die Chance eröffnet werden, Korrelationen zu finden, die allgemein gültige Rückschlüsse zur Sicherung historischer Großbauten ermöglichen. Im Fall der Türme des Domes zu Meissen liegen eine bereits umfangreiche Bau- und Schadensaufnahmen und zusätzlich Rechenmodelle vor. Letztere könnten ohne größere Schwierigkeiten erweitert werden.

Die Autoren danken Herrn Dr. A. Weinmann, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück und Herrn Dombaumeister G. Donath und Herrn Kustos St. Nierade in Meissen für wertvolle Informationen. Basis der vorliegenden Arbeit war der unter (4) zitierte Bericht des Fachbereiches Werkstoffe und Verfahren der Fachhochschule Osnabrück und des Fachbereiches IV der Universität Osnabrück.

6.) Literaturverzeichnis.

- 1.) B. Apel, Bericht an das Bischh. Generalvikariat Osnabrück v. 20.5.94.
- 2.) St. Lütge-Glanemann, Das Münster, 1/95.
- 3.) Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Förderbescheide 00131(1991) u. 03700(1993).
- 4.) J.-H. Kallweit, Hrg. Sonderbericht des Fachbereiches Werkstoffe und Verfahren, FH Osnabrück, 1997.
- 5.) G. Donath, Dombauberichte Dom zu Meissen 94/95 u. 95/96.
- 6.) O. Baer, Denkschrift zur Bausituation am Meissener Dom, 1983.
- 7.) W. Preis, Gutachten, Bauzustand der beiden Westtürme, Dresden 1984.
- 8.) Untersuchungen Institut Fresenius Dresden, 1991, 1992 u. 1993.
- 9.) G. Donath, M. Donath, Das Münster, 51, 3/98.
- 10.) M. Kunz, Maschinenmarkt 103, (1997), 21.
- 11.) B. Wessling, Materials and Corrosion 47, p. 439 (1996).
- 12.) B. Wessling, Metalloberfläche, 6/(1996).
- 13.) VDI-Nachrichten, VDI-Verlag, Düsseldorf, 12-09-1997.
- 14.) Private Mitteilung K. Schäfer, vorm. Stahlwerke Georgsmarienhütte.
- 15.) Deutsche Stiftung Umwelt, Förderbescheide AZ 04490 (1994) u. AZ 13584 (1998).
- 16.) Ansys 5.4, Swanson Analysis Cooperation, Huston. (1998).
- 17.) Private Mitteilung Dr. A. Weinman, Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- 18.) Denkmalpflege in Sachsen, Mitt. des Landesamtes f. Denkmalpflege Sachsen, 1996.
- 19.) U. Nürnberger, Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bd I u. II, Wiesbaden 1995.

Bildunterschriften

Abb.1. Querschliff eines Puddeleisen, Vergrößerung 10 : 1., Adlerätzung.

Abb.2. Querschliff eines Betonstahles B St 500, Vergrößerung 10:1, Adlerätzung.

Abb.3. Zuganker, Flächenkorrosion mit Übergang zu Muldenkorrosion. Durch unterschiedlichen Korrosionsangriff werden Schmiedestrukturen sichtbar.

Abb.4. Zuganker. Ausgeprägte Muldenkorrosion innerhalb einer schützenden Schicht aus FeOOH.

Abb.5. Quellrost an der Einbindungsstelle eines Mauerhakens.

Abb.6. Steinabsprengung durch Quellrost.

Abb.7. Westturmanlage mit Zugankern im Säulenoktogonal. Bauzeichnung Büro Donath.

Abb.8a. Grundriss des Säulenoktogons. Bauzeichnung Büro Donath.

Abb.8b. Vereinfachte Geometrie des Säulenquerschnittes zur Generierung des FEM-Netzes.

Abb.9. Ersatzmodell des oberen Turmaufbaus im Bereich des Säulenoktogons, Viertelausschnitt.

Abb.10. Temperaturverteilung im Rechnermodell. Die Temperaturen sind farblich kodiert und als Zahlenwerte in der Legende angegeben. Die Tabellen oberhalb sind hier und in den folgenden Darstellungen interne Daten der benutzten Software.

Abb.11. Thermisch ausgelöste geometrische Verschiebungen im Säulenoktogonal.

Abb. 12. Thermisch ausgelöste Spannungen im Säulenoktogonal.

Abb. 13. Thermisch ausgelöste Zugspannungen am Fuß des Säulenoktogons.

Abb. 14. Lage und Richtung der Hauptspannungen am Fuß des Säulenoktogons.

Abb. 15. Thermisch ausgelöste Spannungen an der mittleren Einbindung der Stahlanker.

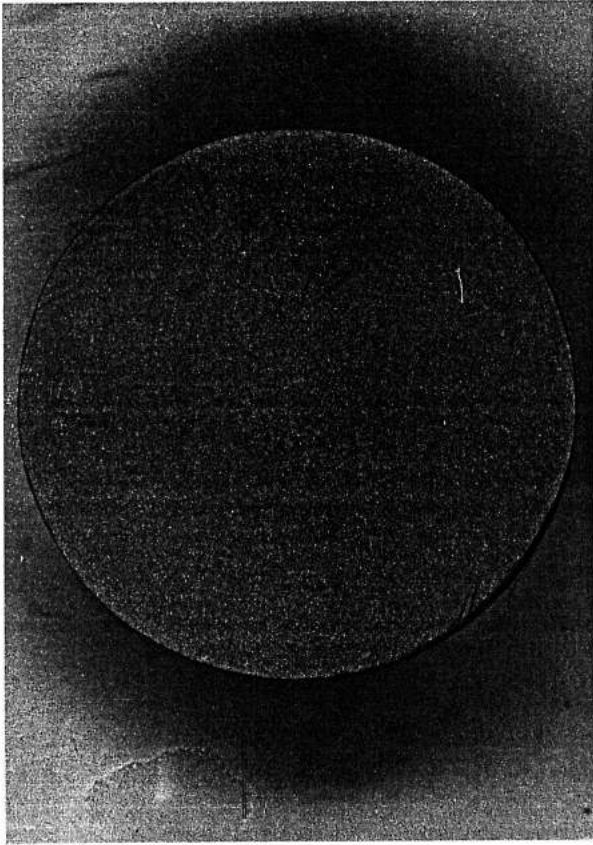
Abb. 16. Bruchlinien der Steinabsprengung und Steinverschiebung an der Einbindung eines Zugankers.

Abb. 17. FEM-Halbmodell des Säulenoktogons mit Turmhelm in zwei Ansichten.

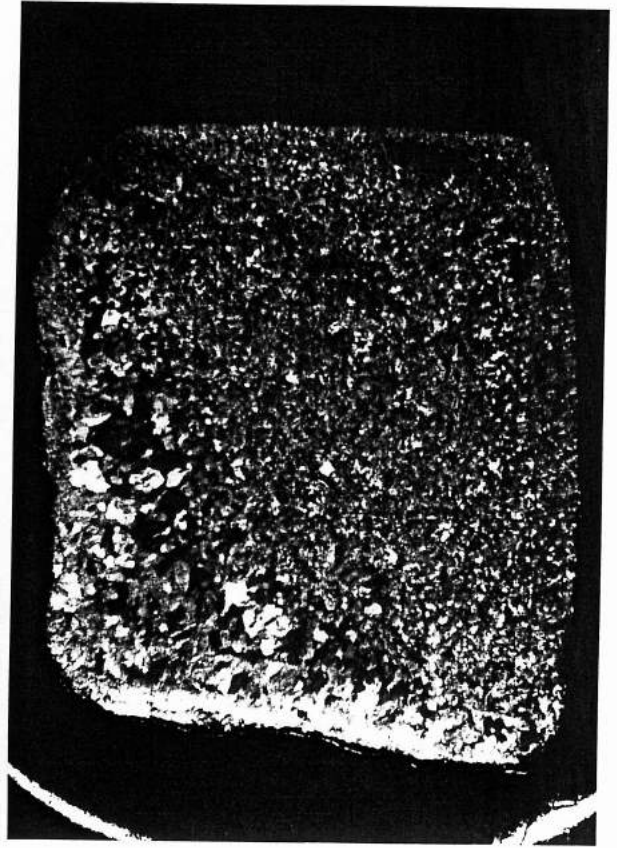
Abb. 18. Verschiebungen von Turmhelm und Säulenoktogonal durch Windlast.

Abb. 19. Vergleichsspannungen durch Windlast im Säulenoktogonal.

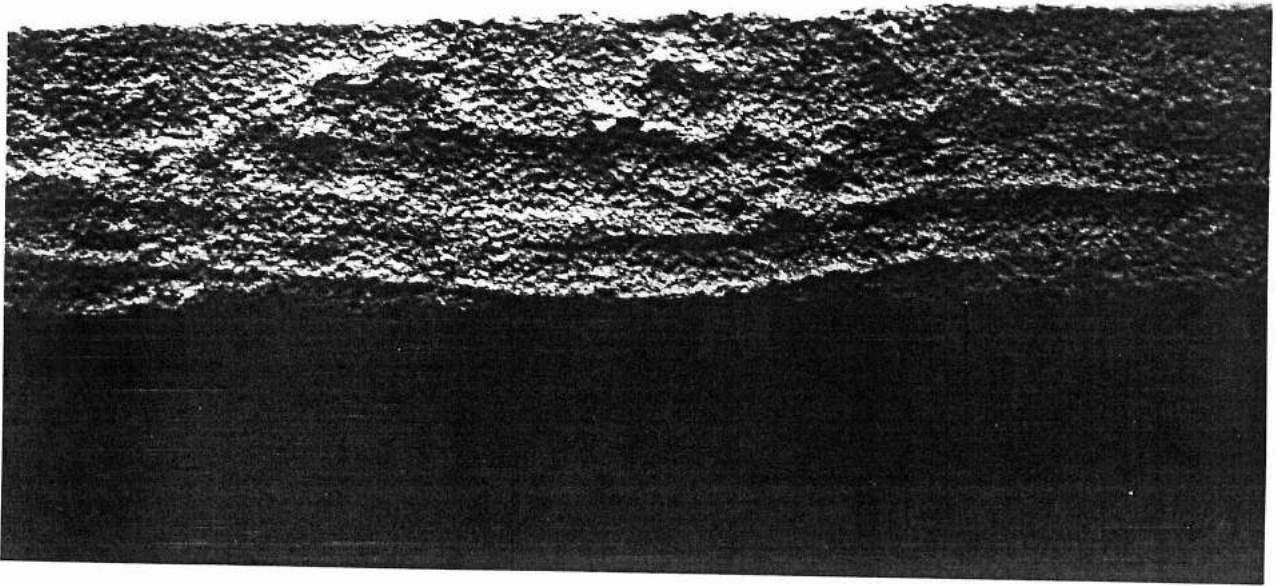
Abb. 20. Durch Windlast bewirkte Vergleichsspannungen im Inneren des Oberteiles des Säulenoktogons.



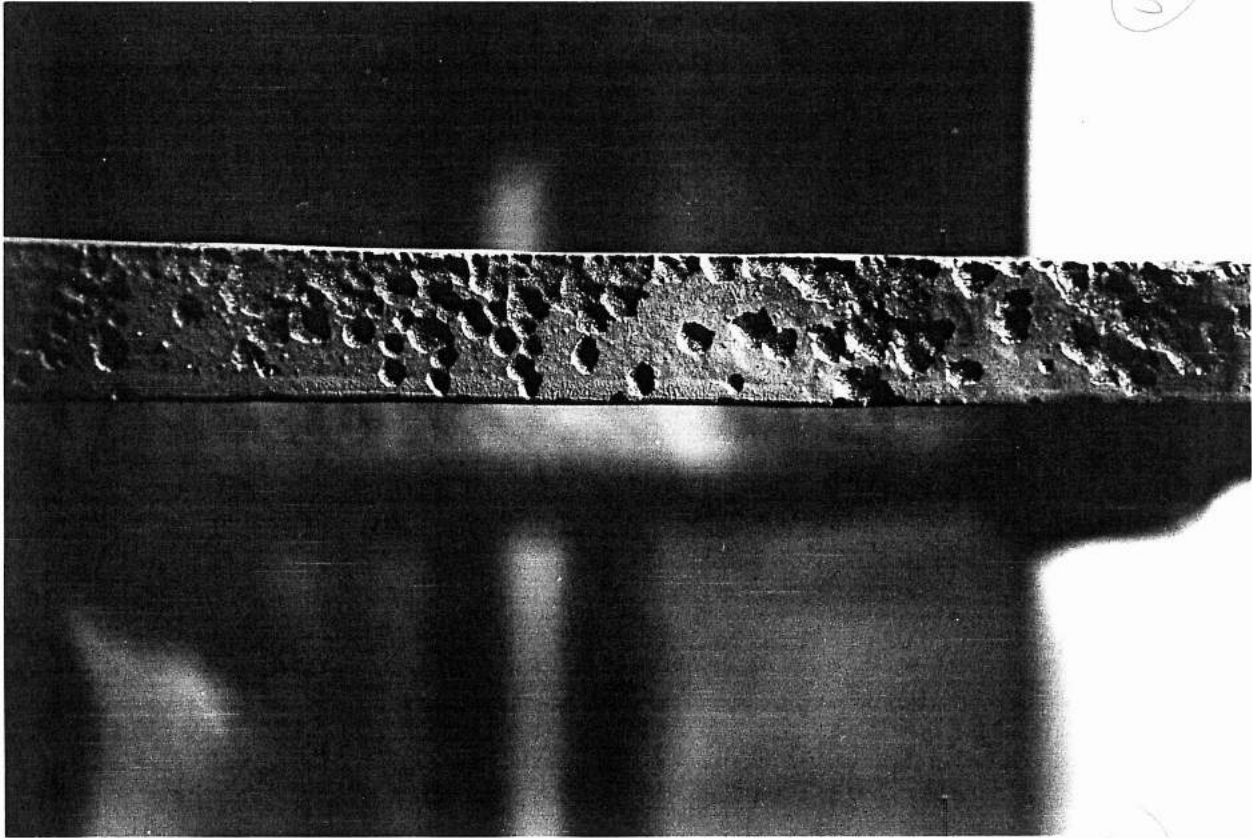
(1)



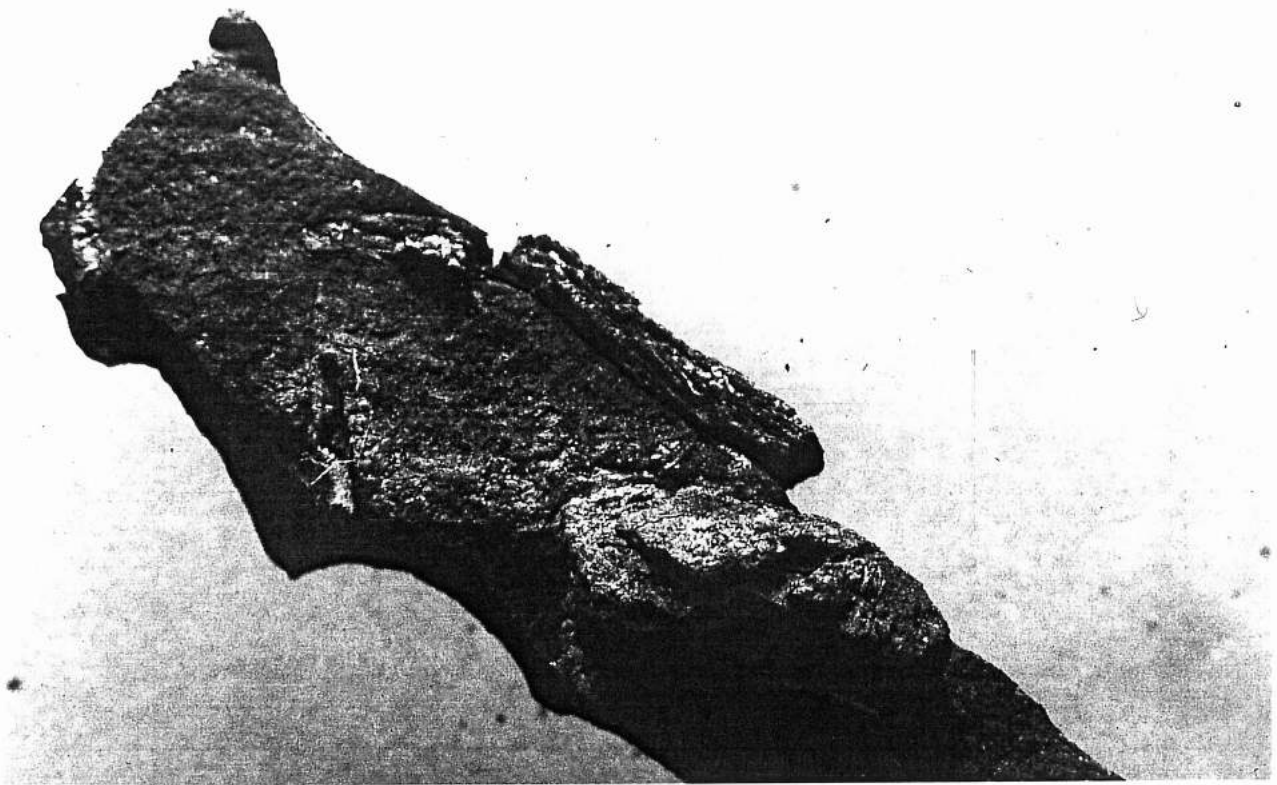
(2)



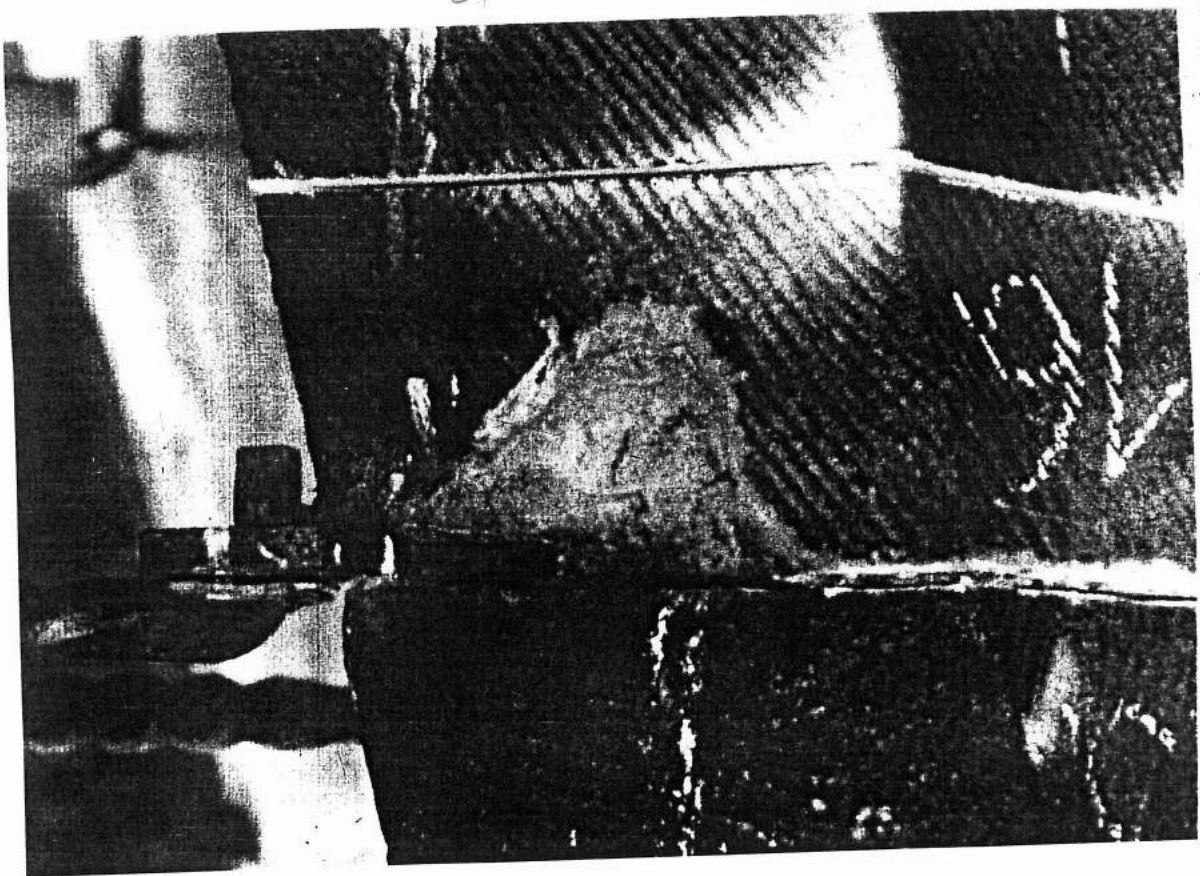
3



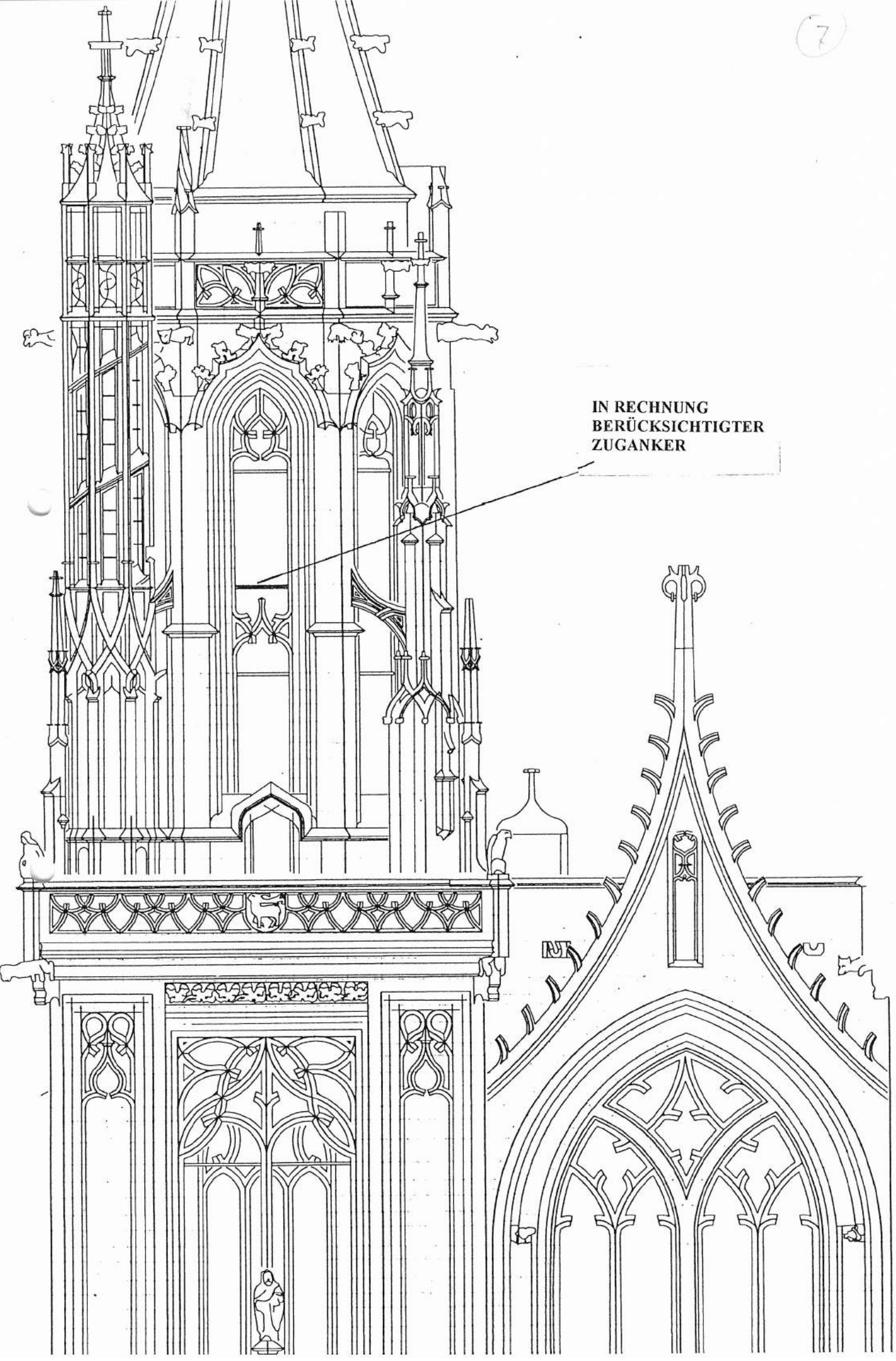
4



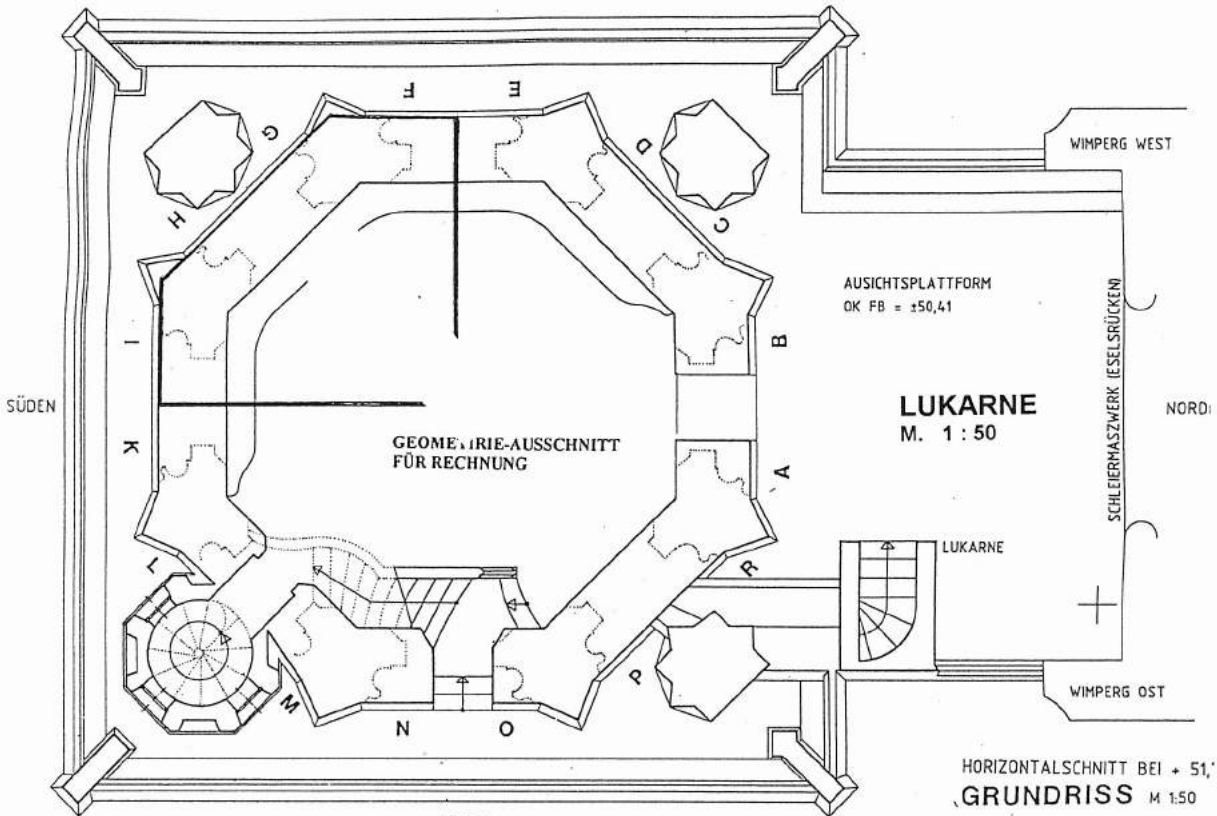
51



61

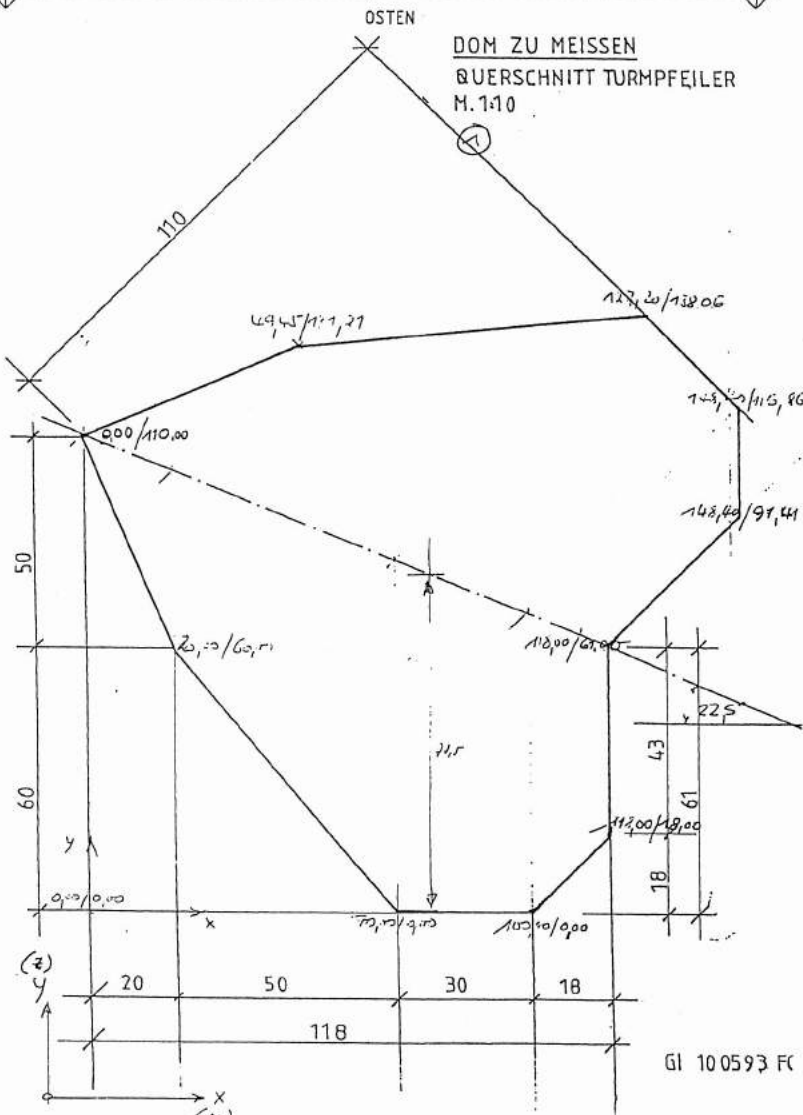


IN RECHNUNG
BERÜCKSICHTIGTER
ZUGANKER



AI

8u

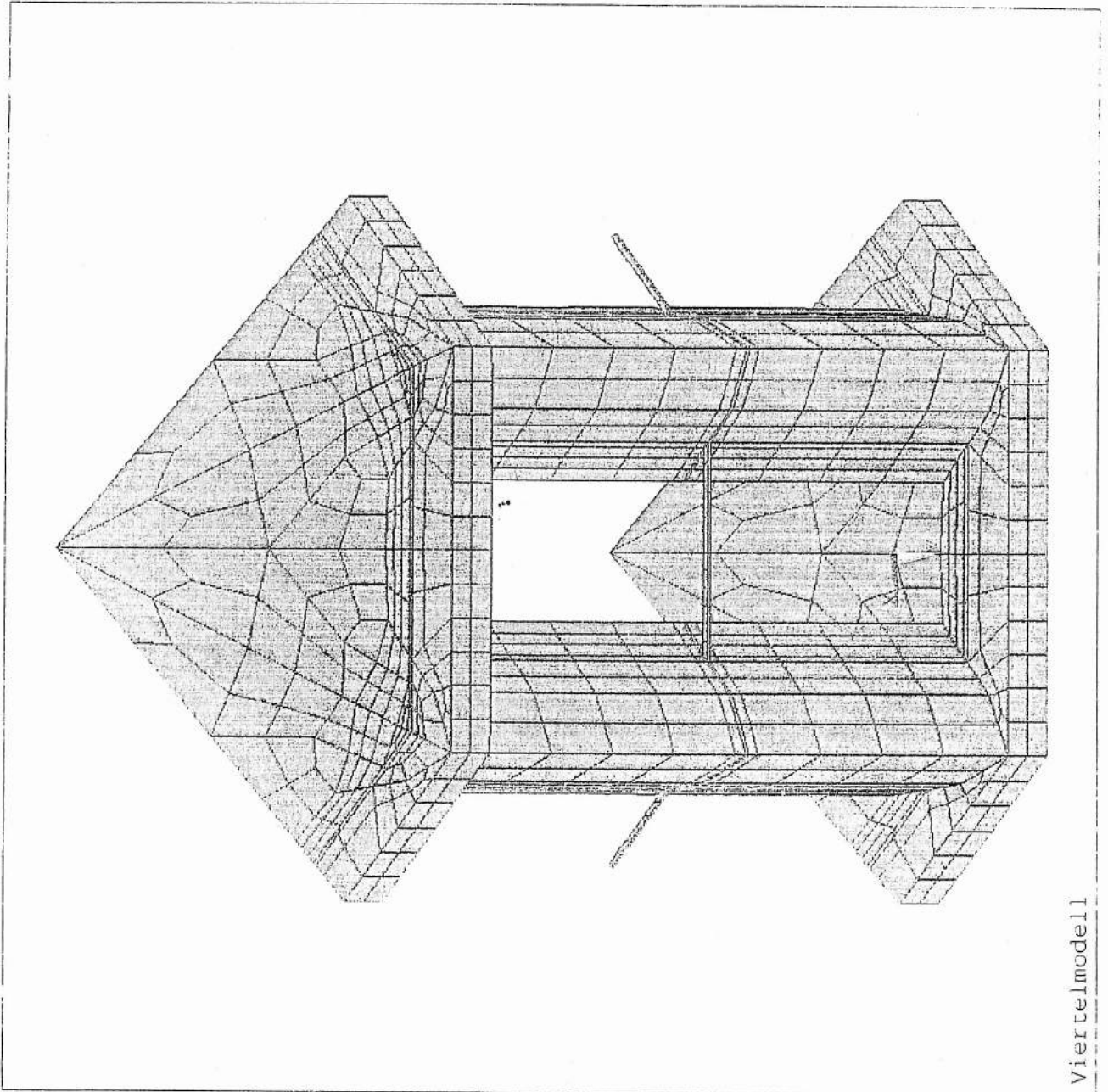


VEREINFACHTE
GEOMETRIE ZUR
GENERIERUNG DES
FEM-NETZES

A

8u

ANSYS 5.0 A
AUG 14 1996
15:09:00
PLOT NO. 6
ELEMENTS
TYPE NUM
XV = -0.931E-08
YV = 0.642788
ZV = 0.766044
DIST=4.542
YF = 0.98
ZF = 3.35
A-ZS=-180
Z-BUFFER

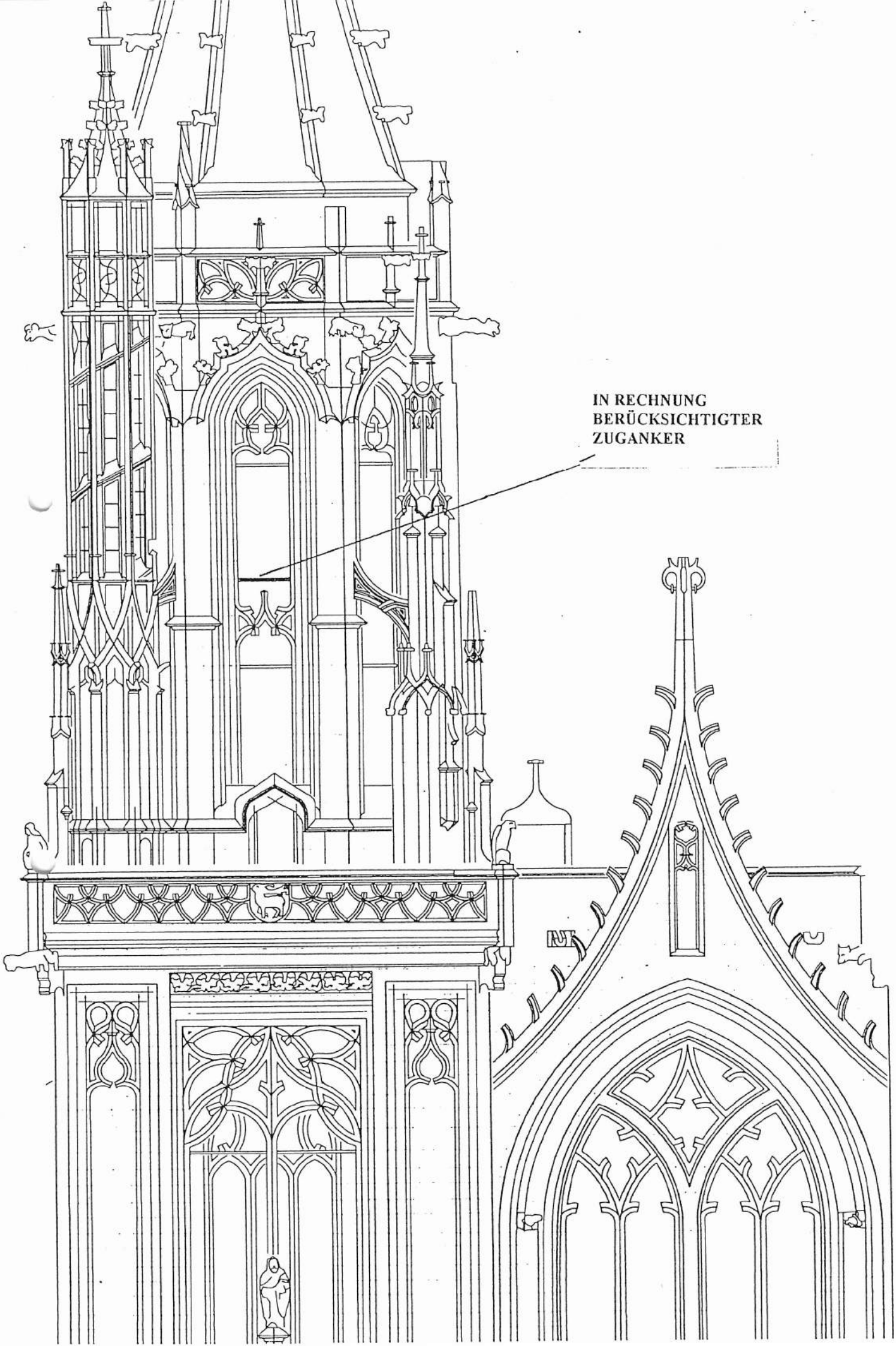


Viertelmodell

Abb.101

98

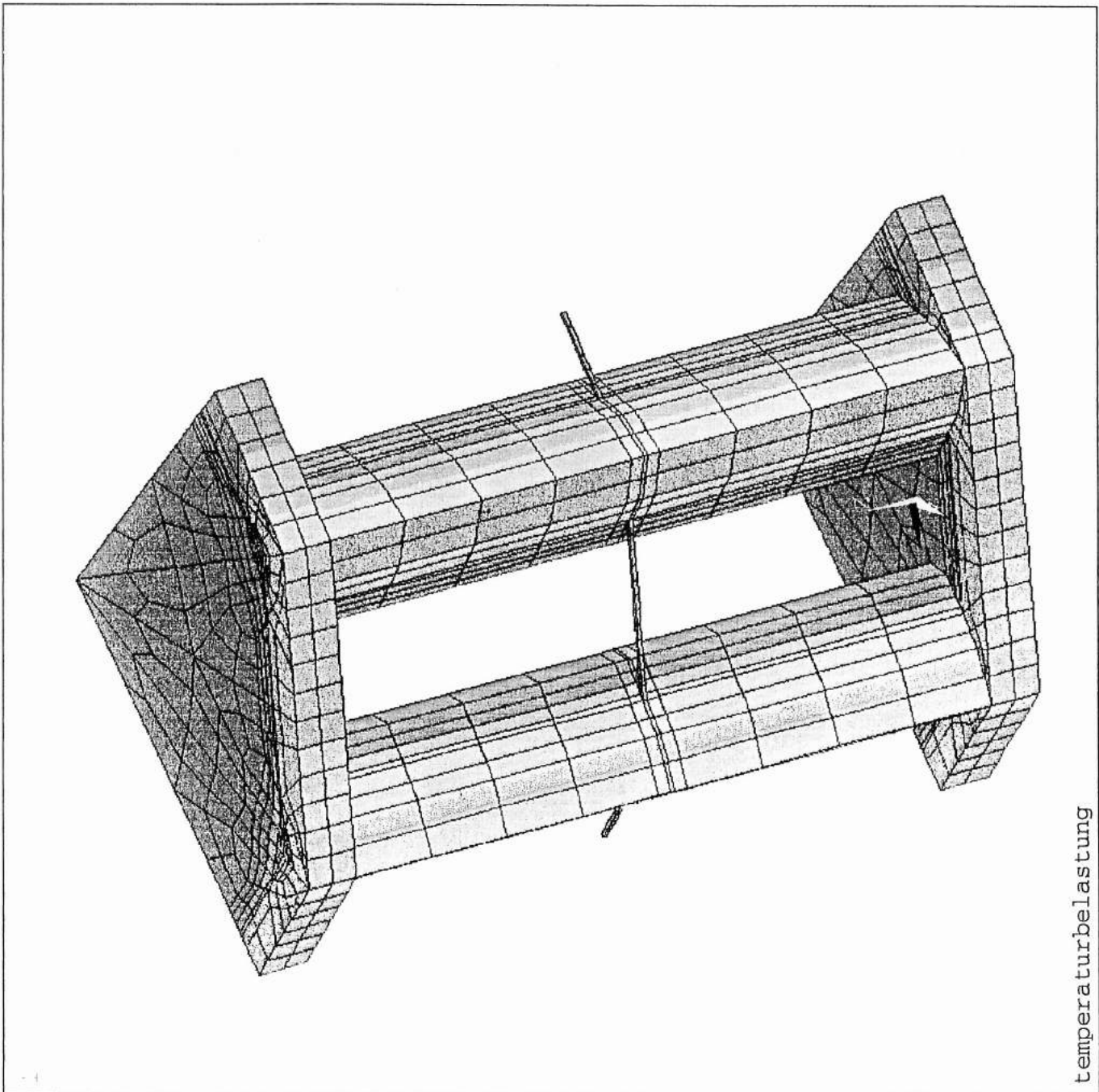
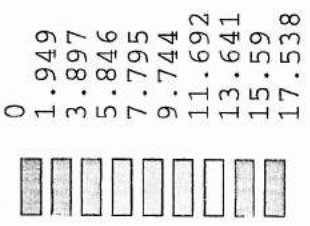
9



IN RECHNUNG
BERÜCKSICHTIGTER
ZUGANKER

ANSYS 5.3
DEC 30 1996
11:34:18
PLOT NO. 5
ELEMENTS
TEMPERATURES
TMIN=0
TMAX=17.538

XV = -.385174
YV = .824549
ZV = .414519
DIST=5.069
YF = -.98
ZF = 3.35
A-ZS=146.856
Z-BUFFER



temperaturbelastung

Abb.102

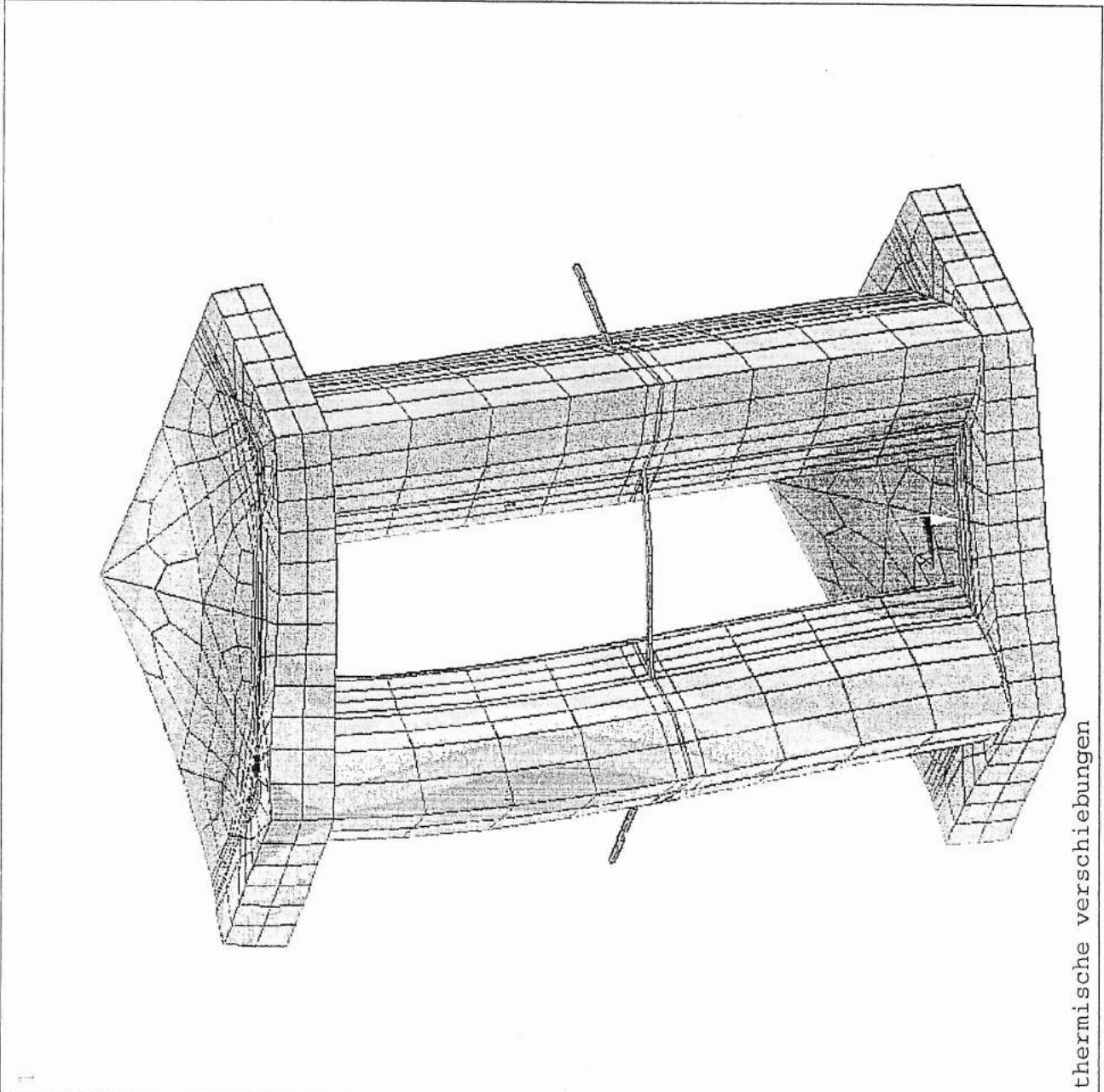
10

11

```

ANSYS 5.3
DEC 30 1996
11:24:33
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.528E-03
SEPC=15.433
SMN =.135E-06
SMX =.528E-03
.135E-06
.588E-04
.118E-03
.176E-03
.235E-03
.294E-03
.352E-03
.411E-03
.470E-03
.528E-03

```



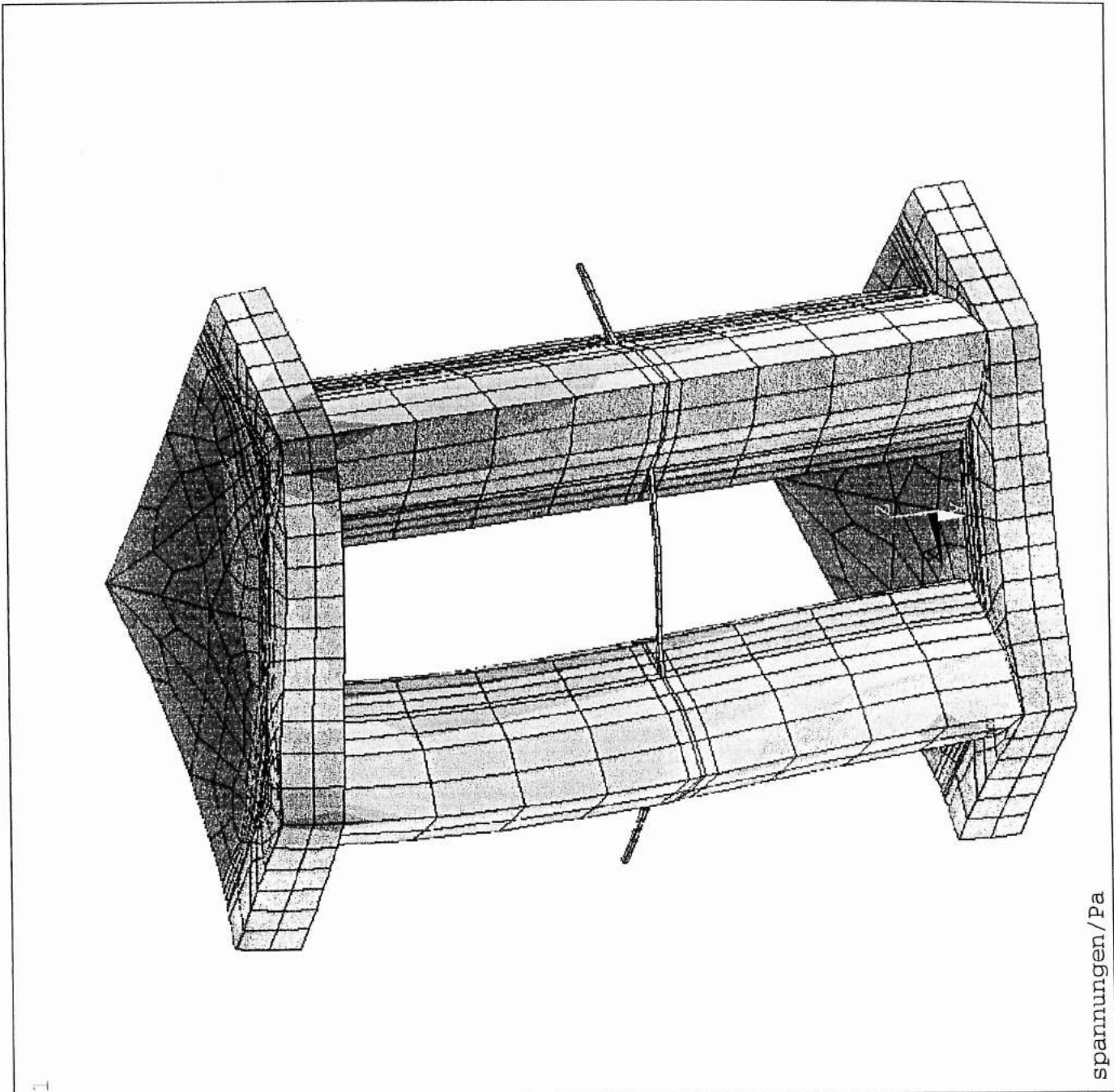
11

Abb.103

```

ANSYS 5.3
DEC 30 1996
11:24:58
PLOT NO. 2
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
TOP
DMX =.528E-03
SMN =28052
SMX =.840E+07
SMXB=.139E+08
28052
958077
.189E+07
.282E+07
.375E+07
.468E+07
.561E+07
.654E+07
.747E+07
.840E+07

```

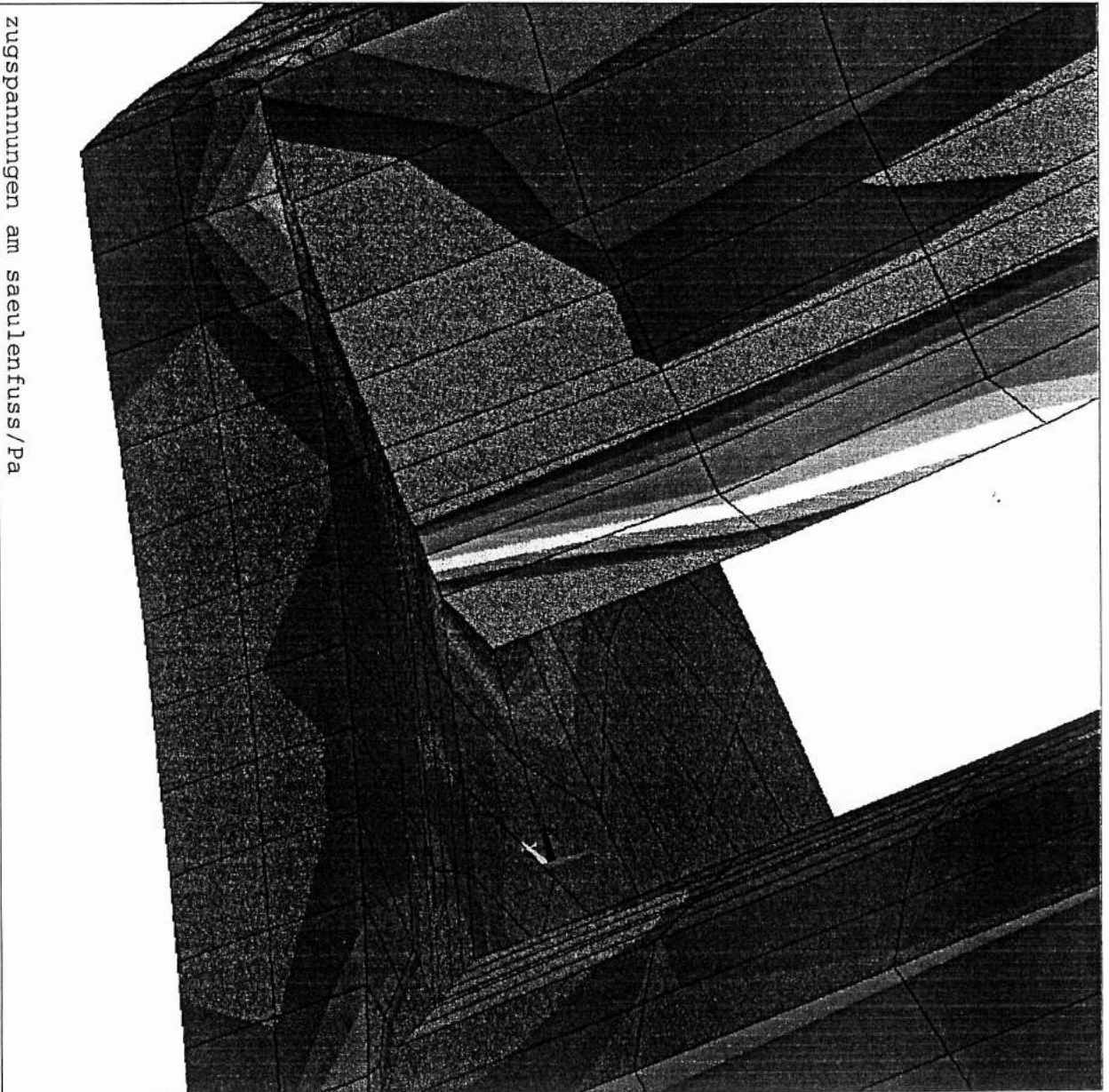


spannungen / Pa

Abb.104

12

13

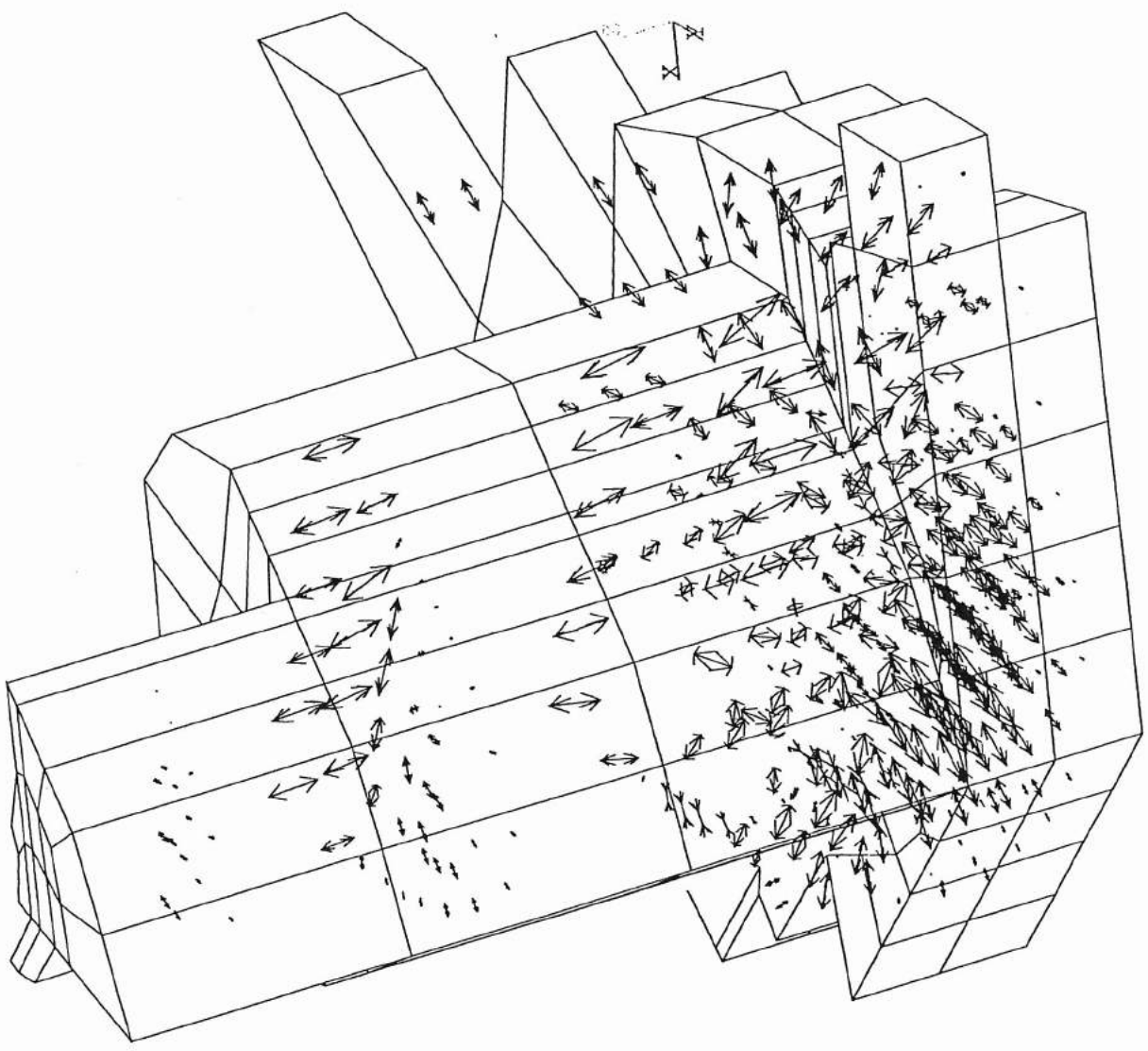


ANSYS 5.3
DEC 30 1996
11:32:18
PLOT NO. 4
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
S1 (AVG)
TOP
DMX =.528E-03
SMN =-.167E+07
SMNB=-.481E+07
SMX =.802E+07
SMXB=.137E+08
0
166667
333333
500000
666667
833333
100E+07
117E+07
133E+07
150E+07

zugspannungen am saeulenfuss/Pa

ANSYS 5.3
JAN 9 1997
10:32:07
PLOT NO. 1
VECTOR
STEP=1
SUB =1
TIME=1
S TOP
PRIN1
PRIN2
PRIN3

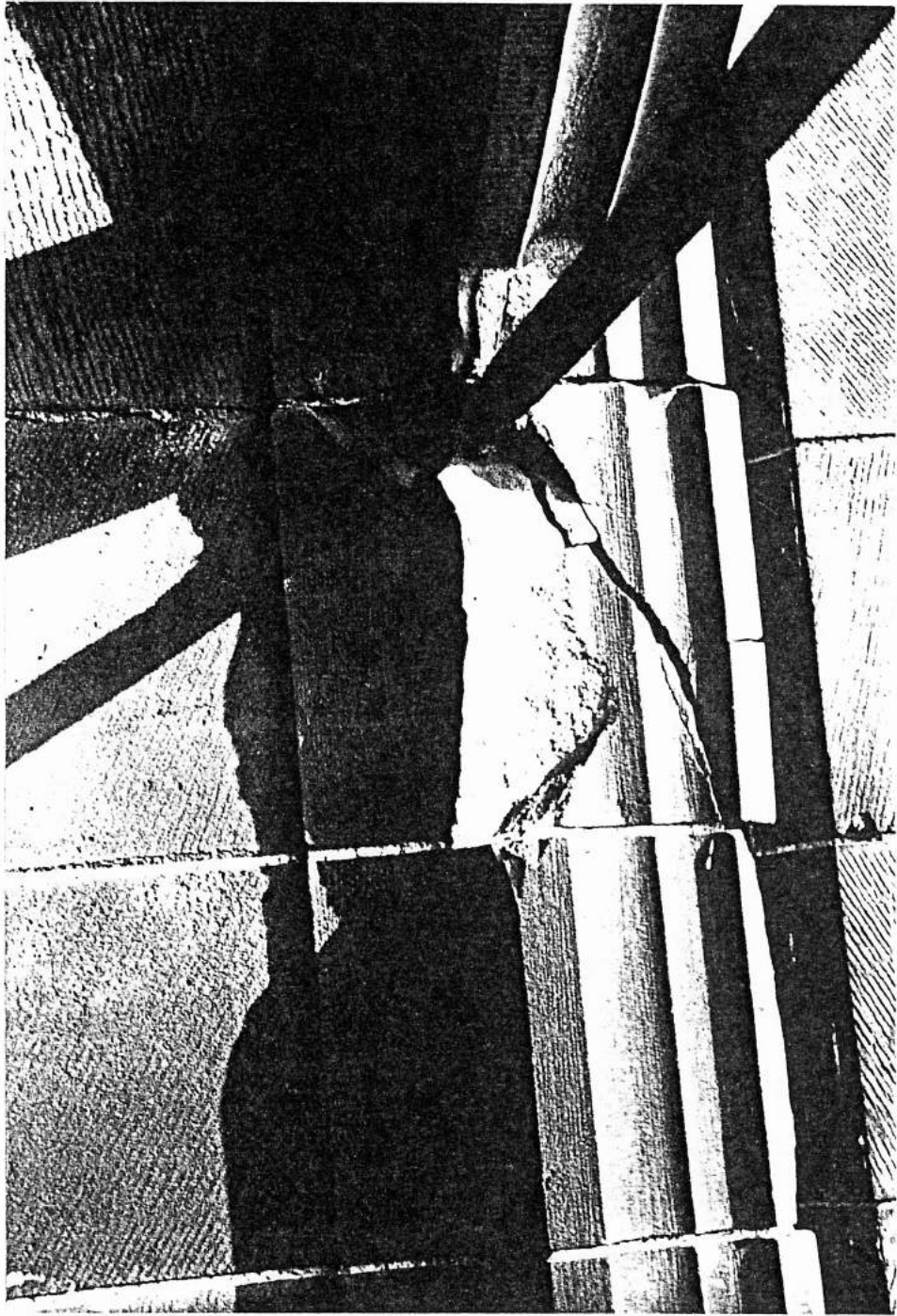
111

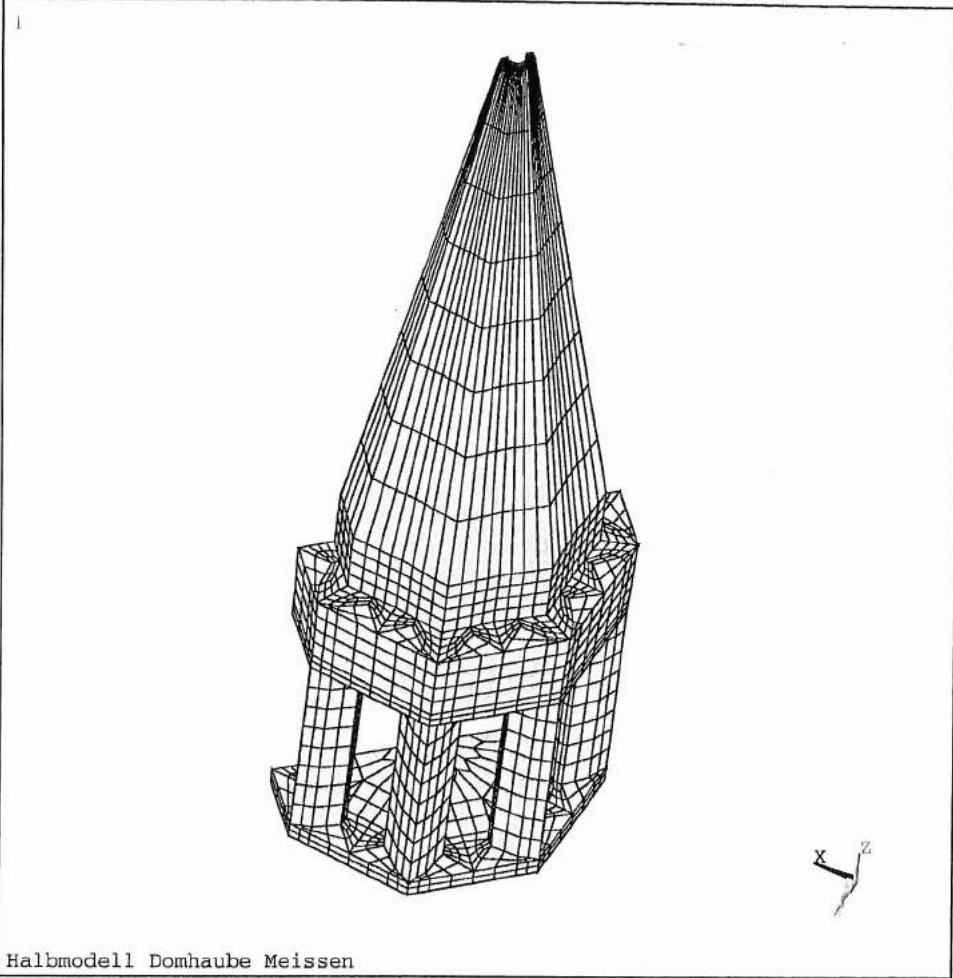


1

Zugspannungen am Saeulenfuess

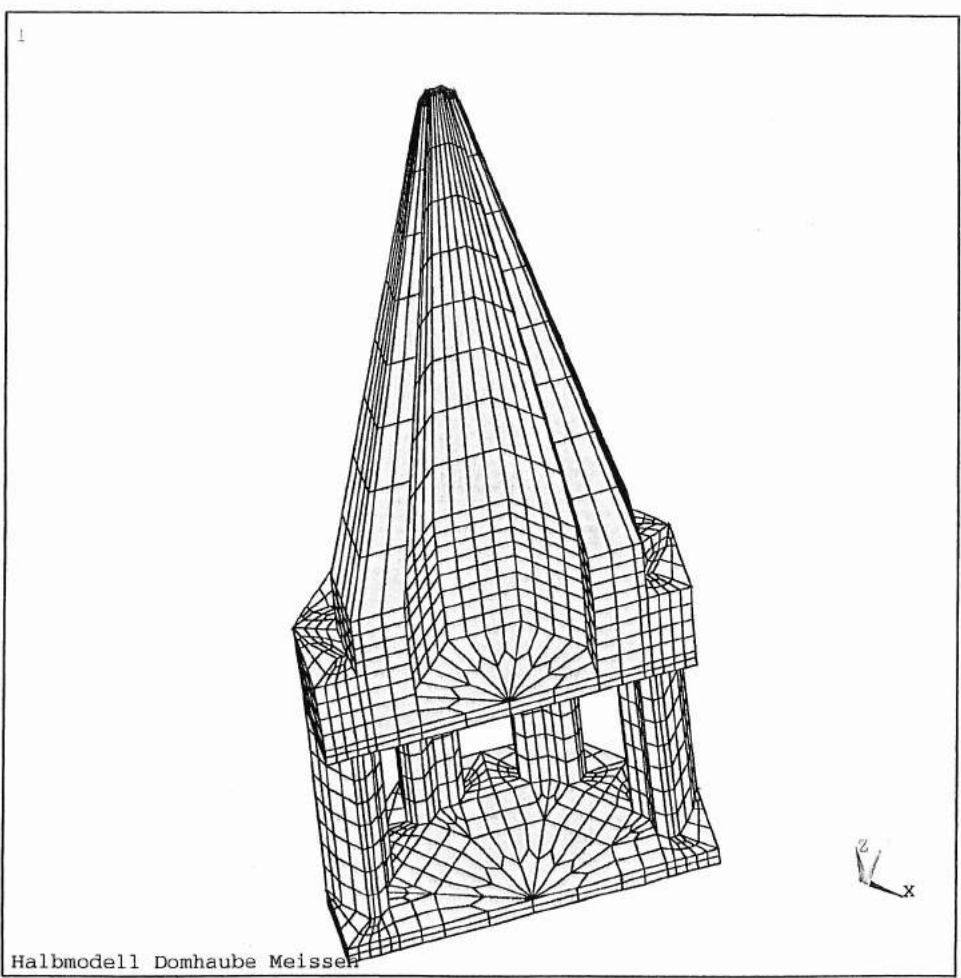
Abb107





ANSYS 5.4
 OCT 2 1998
 15:59:00
 PLOT NO. 2
 ELEMENTS
 PowerGraphics
 EFACET=1

XV =-.224619
 YV =.5678
 ZV =.791886
 *DIST=12.501
 *XF =-1.04
 *YF =-1.611
 *ZF =12.999
 A-ZS=146.402
 PRECISE HIDDEN



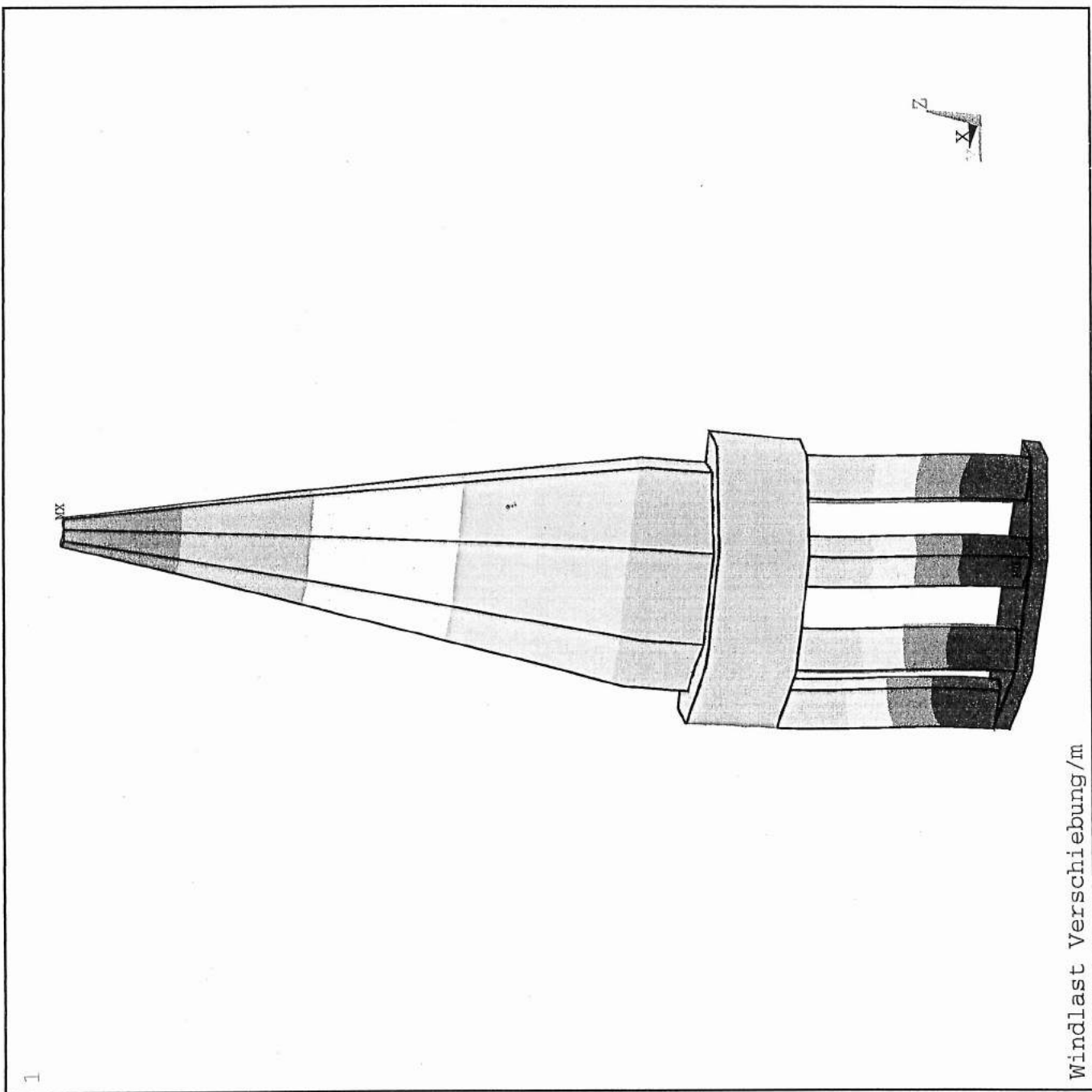
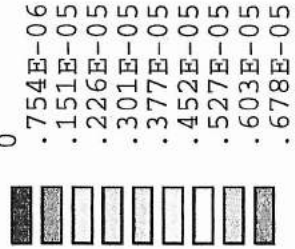
ANSYS 5.4
 OCT 2 1998
 15:58:00
 PLOT NO. 1
 ELEMENTS
 PowerGraphics
 EFACET=1

XV =.3314
 YV =-.5153
 ZV =.7903
 *DIST=10.674
 *XF =-.393858
 *YF =-2.708
 *ZF =13.969
 A-ZS=-32.107
 PRECISE HIDDEN

(16)

VGA

ANSYS 5.4
 OCT 5 1998
 16:41:17
 PLOT NO. 3
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX = .678E-05
 SMX = .678E-05



1

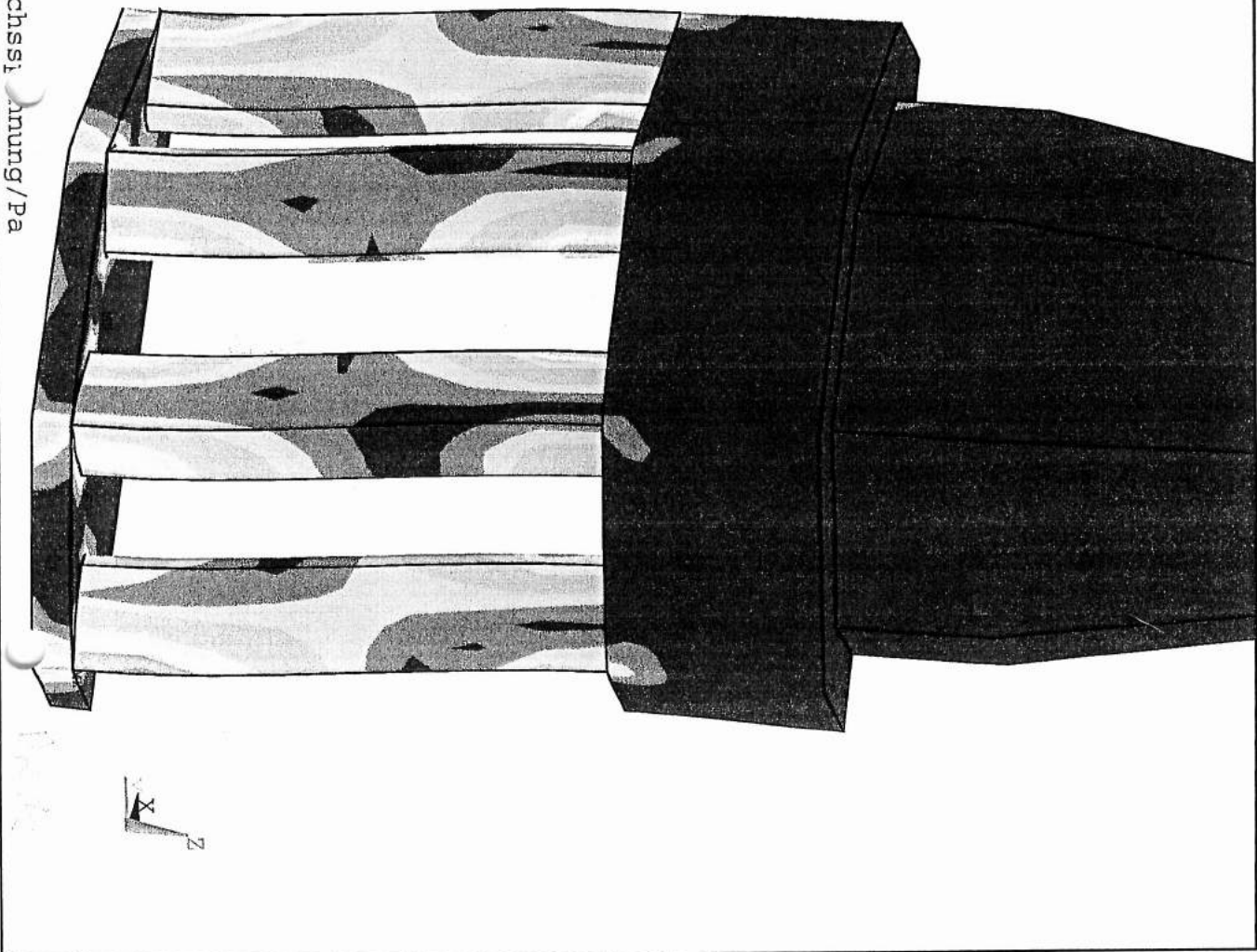
Windlast Verschiebung/m

(17)

17

1

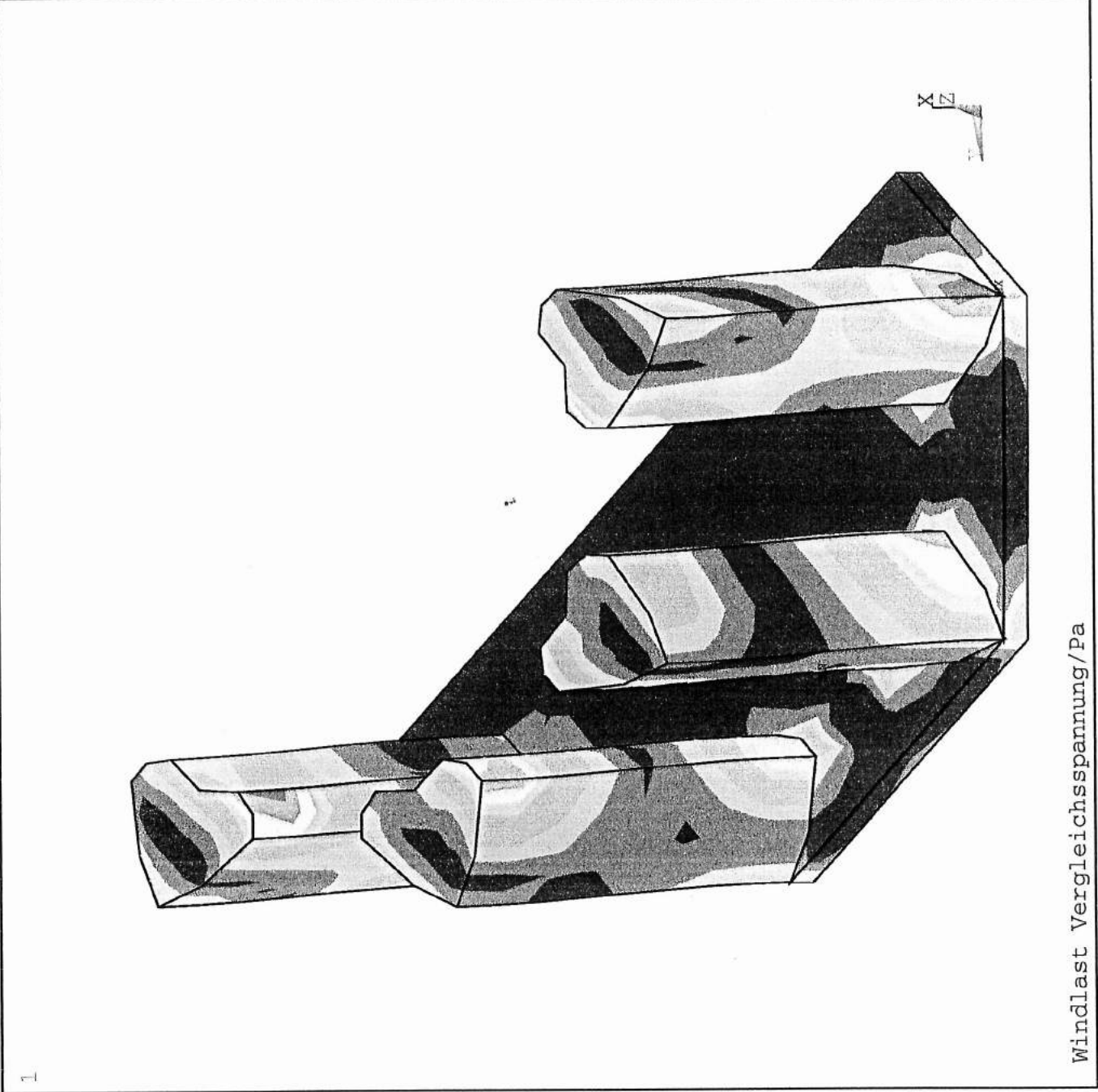
Windlast Vergleichsspannung/Pa



ANSYS 5.4
 OCT 5 1998
 16:45:38
 PLOT NO. 4
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.678E-05
 SMN =4.582
 SMX =6921
 4.582
 773.092
 1542
 2310
 3079
 3847
 4616
 5384
 6153
 6921

18
10
5

ANSYS 5.4
 OCT 5 1998
 16:54:35
 PLOT NO. 5
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SEQV (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX =.312E-05
 SMN =4.582
 SMX =6921
 4.582
 773.092
 1542
 2310
 3079
 3847
 4616
 5384
 6153
 6921



Windlast Vergleichsspannung/Pa

1

11
 119