

Ludwig Viezens
Beratender Ingenieur

Statik u. Konstruktion
im Holzbau und
restaurativen
Bauwesen

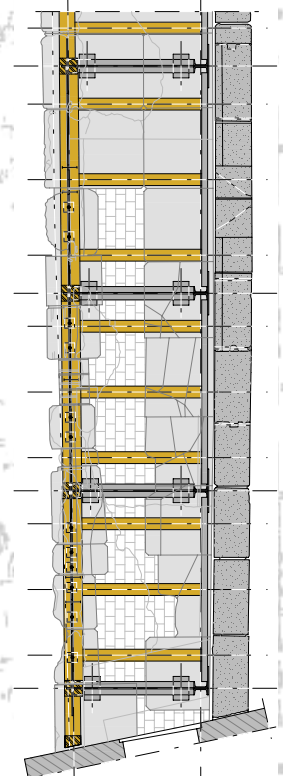
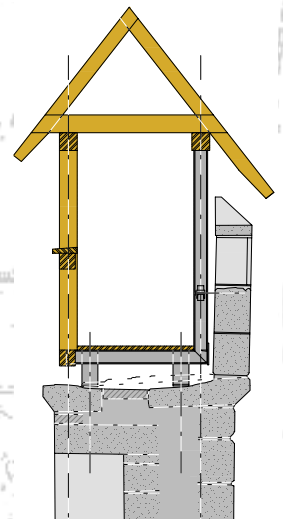
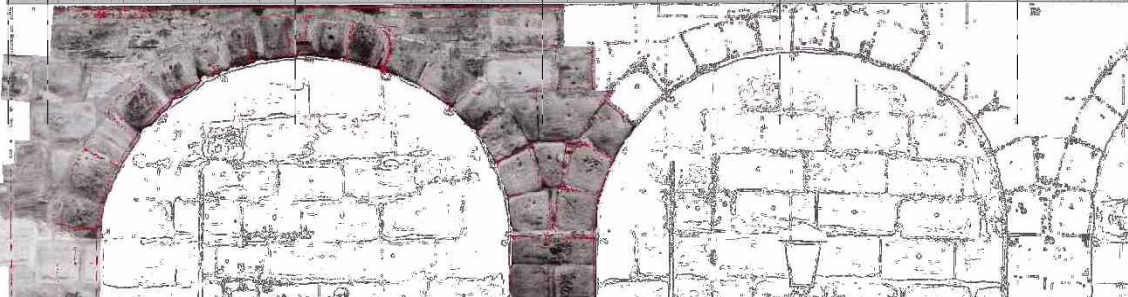
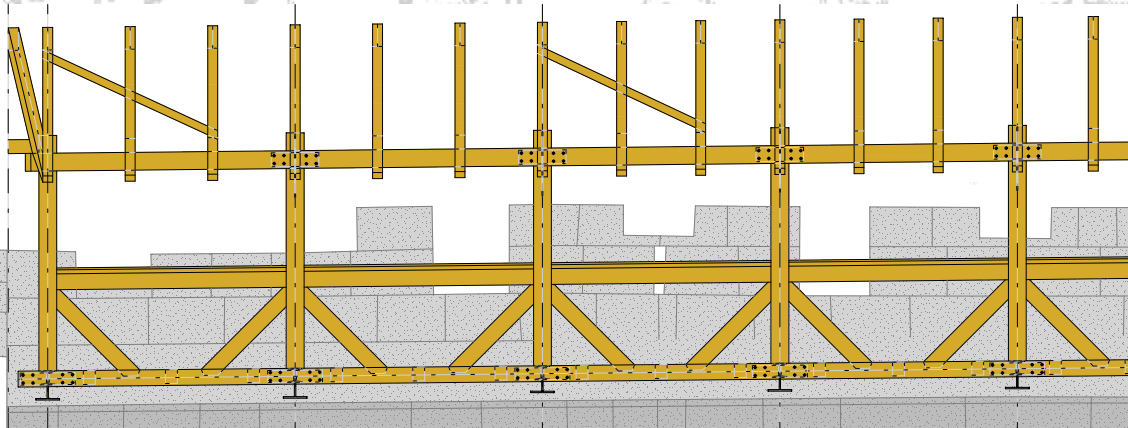
Tel. 0911 / 95 67- 0
Fax / 95 67 - 111
statik@viezens.de
www.denking.de

Ing.-Büro für
Tragwerksplanung
Burgweg 31
90542 Eckental
Tel. 09126 / 2 95 99 - 0
Fax / 2 95 99 - 11

Restaurierung Maxtormauer Nürnberg

im Abschnitt zwischen den Stadtmauertürmen 9 u. 17
2. BA, 1. u. 2. Abschnitt – Bereich Küblerzwinger

1



Statisch-konstruktive Maßnahmen Schlussbericht

- Tragwerkserfassung
- Sofortsicherungsmaßnahmen
- Instandsetzung des Mauerwerksgefüges
- Statische Sicherung der Wehrmauer
- Tragwerksplanung Schutzdachkonstruktion

Die Vervielfältigung und Übertragung auch einzelner Textabschnitte oder Details der vorliegenden Ausarbeitung sowie die Weitergabe an Dritte ist nur gestattet, wenn dieses vorher mit dem Verfasser schriftlich vereinbart wurde.



Situation

Die aus Sandstein errichtete Maxtormauer in Nürnberg ist durch Umwelteinflüsse erheblich geschädigt. Um drohenden Verlusten an noch erhaltenen, baugeschichtlich wertvollen Befunden entgegen zu wirken, sollten innerhalb eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Modellvorhabens, geeignete Maßnahmen zur Restaurierung und dauerhaften Sicherung des Mauerabschnittes zwischen den Stadtmauertürmen Nr. 9 ('Schwarz K') und 17 ('Schwarz M') erarbeitet und durchgeführt werden.

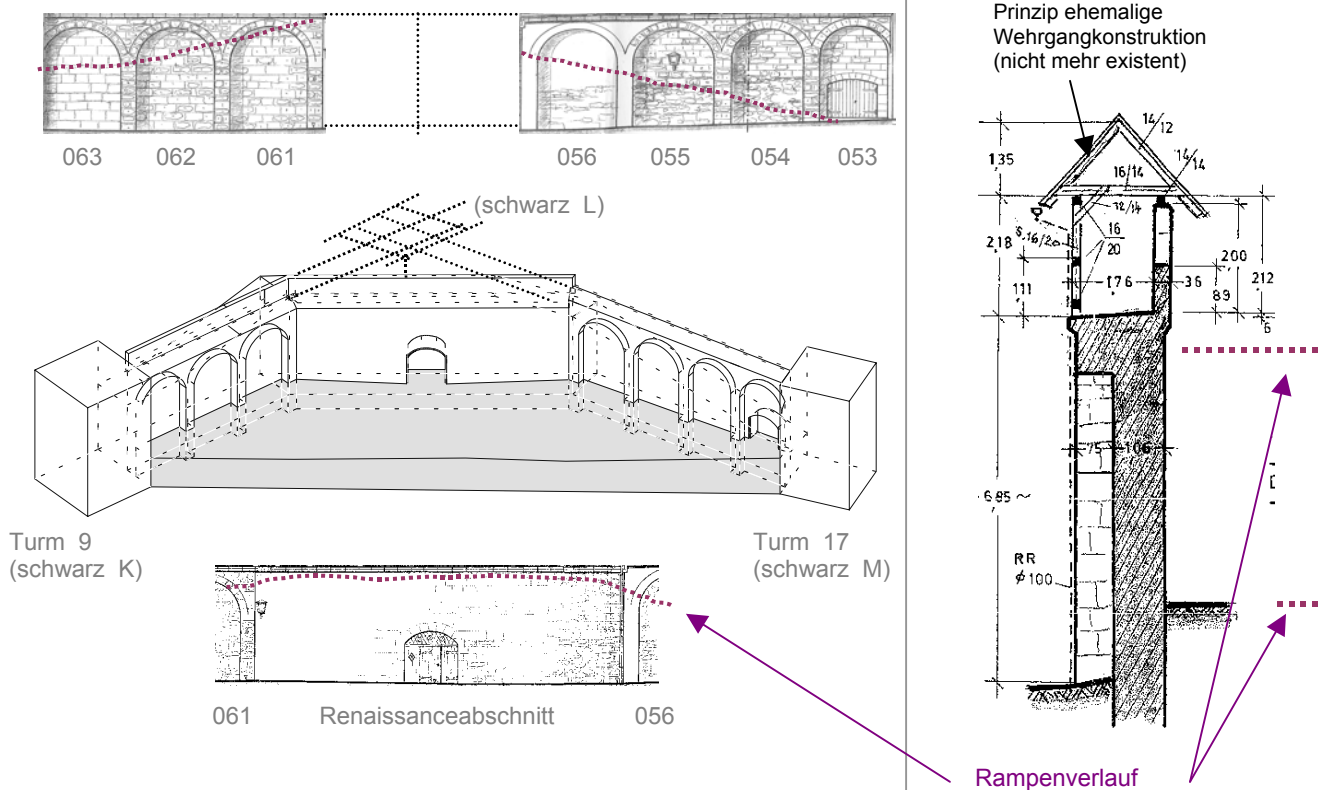
Im Rahmen der Maßnahmenplanung zur konservatorischen Instandsetzung des durch Schadsalzeinwirkungen belasteten Mauerabschnittes, war es in Hinblick auf die Nachhaltigkeit der auf eine weitestgehende Erhaltung der Originaloberflächen abzielenden Steinfestigungen sowie die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit dringend geboten, das Tragwerksgefüge der Wehrmauer und der aufstehenden Schildwände sowohl hinsichtlich lokaler, auf die Tragsicherheit Einfluss nehmender Schwachstellen als auch die globale Standsicherheit betreffend einer Untersuchung zu unterziehen.

Um hier Wechselwirkungen berücksichtigen zu können und zu einem ganzheitlichen statischen Instandsetzungskonzept zu gelangen, war die in Anlehnung an das historische Vorbild zum Schutz der Wehrmauerkrone und der Schildmauern neu zu konzipierende Überdachungskonstruktion von vorne herein in die Überlegungen mit einzu-
beziehen.

Nach einer ersten Inspektion des Tragwerksgefüges und dem Austausch mit den übrigen an der Planung fachlich Beteiligten stellte sich die Situation in statisch-konstruktiver Hinsicht dar wie folgt:

In der ersten Hälfte des 16. Jh. wurde der mittelalterliche Stadtmauerverlauf im Zuge der Errichtung einer Rundbastei verändert. Dabei wurde eine, vormals vermutlich einen weiteren Turm (Alt-Schwarz L) einschließende feldseitig ausspringende Ecke aufgegeben und, zur Stadtseite hin eingerückt, die bereits im späten 14. Jh. erhöhte Wehrmauer durch Einfügen eines die beiden Abbruchkanten verbindenden bogenlosen Zwischenstücks zum heutigen Polygonzug ergänzt.





Im Zuge einer Erhöhung der Bastei im Jahre 1552 wurden die der Erschließung dienenden Rampen schließlich nochmals erhöht, so dass der zur Feldseite ehemals freiliegende Mauerabschnitt seitdem auch als Stützbauwerk dienen muss.

Bezogen auf den Mauerfuß - das Niveau der ehemaligen Grabensohle - beträgt die Anschütthöhe beinahe 8 m, wodurch sich den Eigengewichtslasten der Mauer Erddrucklasten in erheblicher Größe überlagern. So war zu prüfen, ob die sich hieraus ergebenden Beanspruchungen von dem tiefreichend entfestigten, in weiten Bereichen starke Gefügestörungen aufweisenden Mauerwerk aufgenommen werden können, ohne dass mit einem lokalen Versagen oder einem Verlust der Standfestigkeit gerechnet werden muss.

Als kritisch musste auch der Zustand der baugeschichtlich äußerst wertvolle Befunde aufweisenden Reste der auf der Wehrmauer frei aufstehenden Schildmauern eingestuft werden. Hier waren neben massiven Substanzverlusten infolge Entfestigung des Steinmaterials enorme Schiefstellungen festzustellen, die Sofortmaßnahmen erforderten, um einem drohenden Teileinsturz wirksam vorzu





beugen und die Voraussetzungen für eine gefahrlose Durchführung der notwendigen Reparatur- und Austauscharbeiten zu schaffen.

Die Begleitende Betreuung der Maßnahme in statisch-konstruktiver Hinsicht, die in interaktiver Zusammenarbeit mit den übrigen an der Erkundung der Substanz, der Planung und der Durchführung der Maßnahmen fachlich Beteiligten erfolgte, lässt sich grob in nachfolgende Themenbereiche gliedern:

- **Tragwerkserfassung**
- **Sofortsicherungsmaßnahmen**
- **Instandsetzung des Mauerwerksgefüges**
- **Statische Sicherung der Wehrmauer**
- **Tragwerksplanung Schutzdachkonstruktion**

Tragwerkserfassung

Im Zuge der Tragwerkserfassung wurden die wesentlichen Schadensbereiche erfasst und dokumentiert, exemplarisch die jeweiligen statischen Auswirkungen erläutert und die zur statischen Ertüchtigung grundsätzlich in Betracht kommenden Maßnahmen aufgezeigt sowie auf erforderliche Sofortsicherungsmaßnahmen hingewiesen (*vgl. hierzu Zwischenbericht 1*).

Darüber hinaus wurden zur weiteren Erkundung des Mauerwerksgefüges (Verband, Schaligkeit, Bauwerksfugen /-nähte) Kernbohrungen ausgeführt. An Hand des gewonnenen Probenmaterials konnten auch die für eine erste rechnerische Beurteilung der Tragsicherheit und Standsicherheit der Wehr- und Schildmauern benötigten Materialkennwerte (Rohdichte, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, E-Moduli, etc.) bestimmt werden. (*siehe hierzu Aufstellung der Materialfestigkeiten , Labor Dr. Wendler*)

Um Aufschluss über die Bodenverhältnisse im Gründungs- und Auffüllungsbereich zu erhalten, wurden Baugrunderkundungen sowie in Ergänzung hierzu Sondierungen zur Erkundung des Verlaufes der überschütteten Reste der mittelalterlichen Stadtmauer veranlasst.

(*vgl. Gutachten der Baugrundgutachten LGA*)

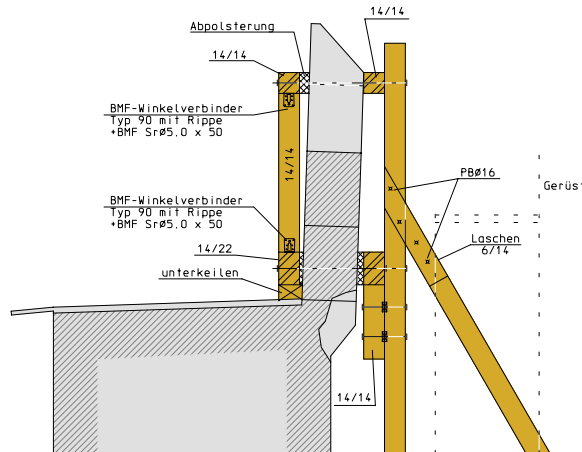




Sofortsicherungsmaßnahmen

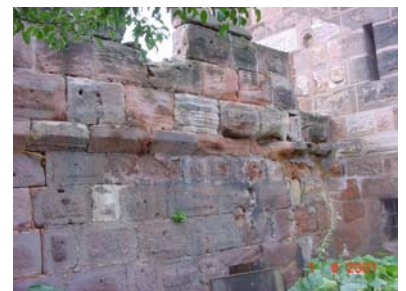
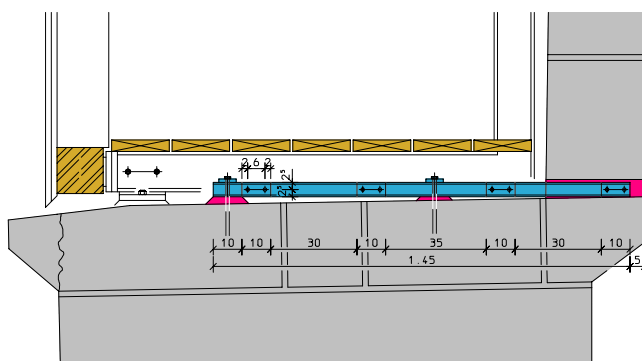
Im Bereich des Segmentes 01 drohte die auf den nur noch rudimentär vorhandenen Kragsteinen keinen ausreichenden Halt mehr findende Schildwand zur Feldseite hin abzukippen und musste notgesichert werden. Hierzu kam eine die Schildmauer beklemmende und in Lage sichernde Korsettkonstruktion zum Einbau, die so konzipiert worden war, dass sie als Baubehelf für den späteren abschnittsweisen Austausch der zerstörten überragenden Enden der Kragsteine dienen konnte. (Vgl. Zwischenbericht 2 sowie Plan Nr. BZ-01)

Vorschlag
Sofortsicherung Mauerbereich 01
M_z 1:20



Instandsetzung des Mauerwerksgefüges

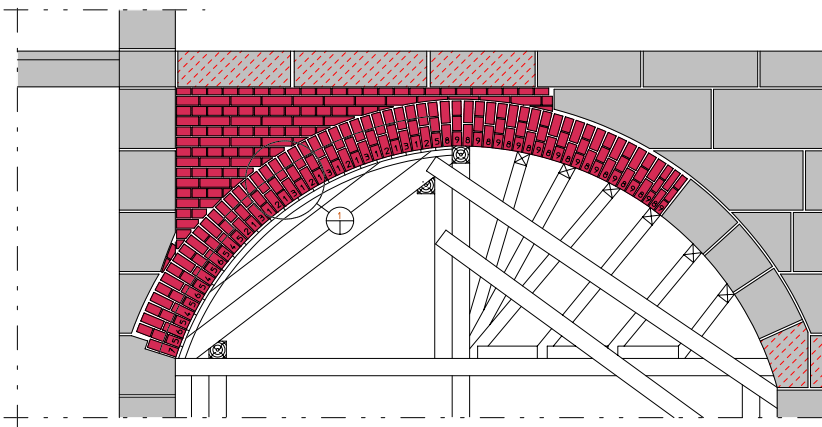
Auf einen Komplettaustausch der bis etwa zur Mitte der Wehgangkronen einragenden, an den zur Feldseite hin ausragenden Enden erheblich zerstörten Kragsteine im Bereich von Segment 01 sollte verzichtet werden. Ein biegesteifes Anstücken der Kragsteine z.B. mittels eingeleimter Gewindestangen schied wegen der benötigten Einklebelängen, der hierfür zu kleinen Bauteilabmessungen und der zu geringen Steifigkeiten aus.





Um die Erneuerung der Kragsteine des Segments 01 dennoch auf den unmittelbar zerstörten, über die Wehrmauerkrone überragenden Bereich beschränken zu können, wurden auf der Wehrgangkrone Träger aus Edelstahl verlegt und in der Mauerkrone verankert. Die Träger kragen unter die Schildmauer ein und fangen diese ab. Die neuen Kragsteinenden erhalten somit aus der aufgehenden Schildmauer keine planmäßige Biegebeanspruchung und konnten handwerklich eingefügt werden. (vgl. Plan Nr. K01)

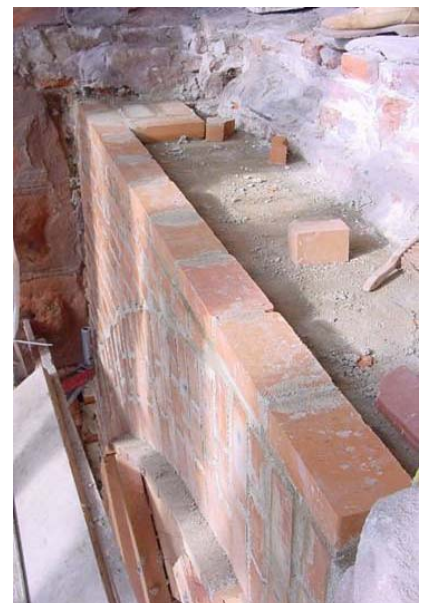
Schwierig gestaltete sich auch die Instandsetzung des bereits partiell mit Ziegelmauerwerk ausgeflickten Bogens im Segment 63. Hier sollten die stark zermürbten Ziegel und die ebenfalls tiefreichend entfestigten Sandsteinzonen durch ein in der Tiefe abgestuftes Bogenmauerwerk aus Ziegeln ersetzt werden.



Zur Bewerkstellung dieses Vorhabens musste eine Stütz- und Lehenkonstruktion eingebaut und die auf dem Bogen aufruhenden, teilweise zu erneuernden Kragplatten abgenommen werden.



(vgl. auch Zwischenberichte 2 u. 3 sowie Plan. Nr. BZ 2 u. K02a)





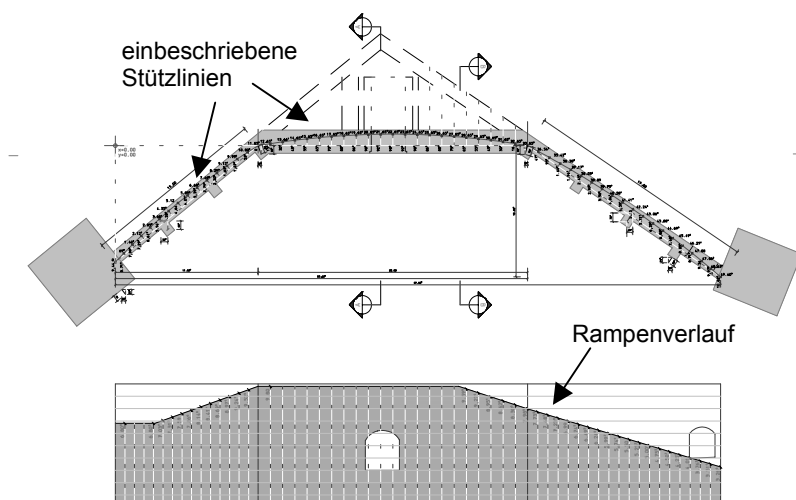
Statische Sicherung Wehrmauer

Wie eine unter Ansatz der ermittelten Stein- und Mörtelfestigkeiten festigkeiten und Berücksichtigung der Ergebnissen der Bodenuntersuchungen durchgeführte überschlägige rechnerische Untersuchung des interessierenden Stadtmauerabschnitts in zwei als repräsentativ anzusehenden Schnitten aufzeigte, war eine hinreichende Standsicherheit in Frage zu stellen (vgl. auch Zwischenbericht 2).

Mit dem Ziel, statische Maßnahmen und die hiermit verbundenen Eingriffe in den historisch wertvollen Tragwerksbestand so gering als möglich halten zu können, wurde schließlich der Versuch unternommen an Hand von das Stützbauwerk in seiner Gesamttragwirkung genauer beschreibender mechanischer Strukturen den Nachweis für dessen hinreichende Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu erbringen.

Um das Tragverhalten des Stützbauwerks möglichst wirklichkeitsgetreu zu erfassen, wurde der im Grundriss einen dreiständigen Polygonzug bildende Mauerwerksabschnitt als eine ab dem stadtseitigen Geländeniveau elastisch eingespannte, nach oben hin auskragende Flächentragwerksstruktur modelliert. Über die Höhe der vertikalen Strukturelemente wurden dabei horizontale, in die Mauerwerksquerschnitte

einschreibbare, den möglichen Stützlinien des Mauerwerkspolygons affine Bogentragelemente definiert, um bei dem in der Aufsicht einem Sprengwerk ähnlichen Tragwerk auch die horizontale Gewölbetragswirkungen der einzelnen Wandabschnitte als stützende Komponenten berücksichtigen zu können.

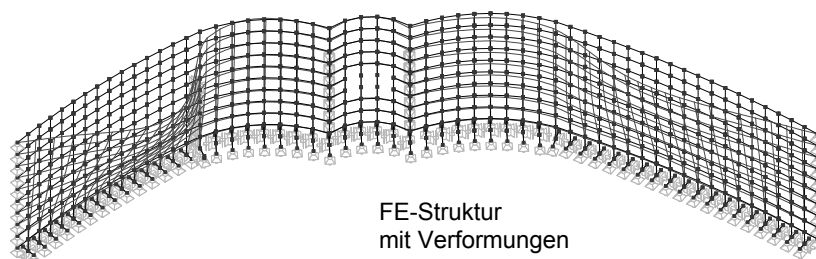






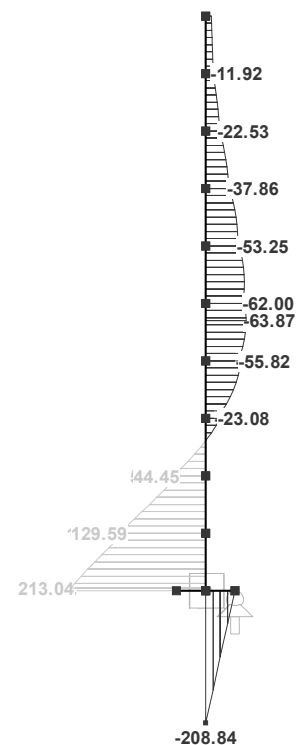
Die Ergebnisse der unter Berücksichtigung der stadtseitigen Mauerwerkslisenen (Pfeilervorlagen) durchgeführten Finite-Elemente-Berechnungen bestätigten schließlich auch den zu vernachlässigenden Einfluss dieser nur als vorgelagert anzusehenden, nicht im kontinuierlichen Verband mit dem Flächenmauerwerk stehenden Querschnittselemente.

Sie machten aber auch deutlich, dass von der im Grundriss abgewinkelten, in den drei Wandabschnitten zur rampenartig angeschütteten Feldseite hin als Gewölbe wirksamen Tragstruktur nennenswerte, der reinen Biegebeanspruchung des Mauerwerksgefüges aus Erddruck entlastend entgegen gerichtete Stützwirkungen ausgehen, welche die im Bauteil bei Annahme eines sich nur einachsig als Schwerkemauer abtragenden Gefüges auftretenden Bauteilspannungen reduzieren helfen.



Dabei entsprachen die sich an der untersuchten Tragstruktur unter Ansatz der Erddrucklasten errechneten Verformungsfiguren in ihrem Verlauf insbesondere im Mauerwerksabschnitt Segment 063 bis 061 gut der aus dem analytischen Aufmaß (Büro Albert & Reinecke) ablesbaren, sich real eingestellten Verformungen, was als Bestätigung für eine hinreichend genaue Modellierung des Rechenmodells angesehen werden konnte.

Nachdem sich mit den am Finite-Elemente-Modell errechneten Schnittgrößen und den für die verschiedenen Steinvarietäten durch eine statistische Auswertung gewonnenen mittleren Rechenfestigkeiten in allen drei Teilabschnitten der zu untersuchenden Wehrmauer noch immer unzulässig hohe Beanspruchungen errechneten, wurden weiterführende Untersuchungen am Objekt veranlasst. Insbesondere



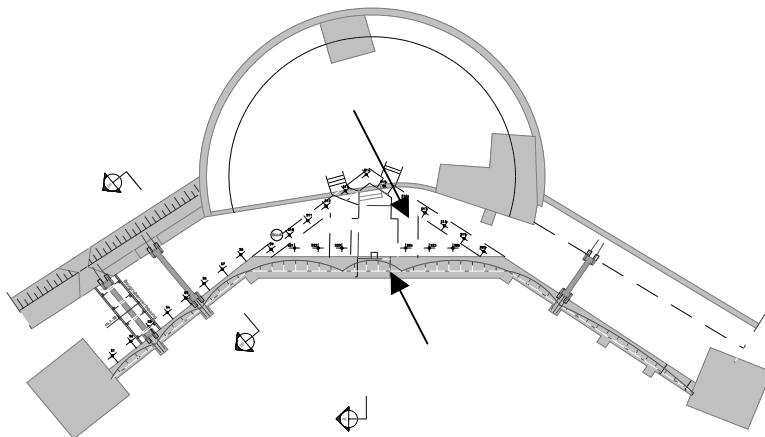
Momentenverlauf [kNm/m]
Systemschnitt Segment 61



wurden feldseitig entlang des vermuteten mittelalterlichen Verlaufs der Stadtmauer Sondierungen vorgenommen sowie im Gewölberaum des renaissance Mauerabschnitts das Mauerwerksgefüge genauer erkundet.

Auf Grund der Untersuchungsergebnisse konnten schließlich sowohl beidseitig des Gewölberaumes als auch in Verlängerung der beiden mittelalterlichen Mauerwerksabschnitte feldseitig rückhaltende, bzw. die Einwirkungen aus Erddruck reduzierende Mauerwerksschotte in das Rechenmodell eingeführt und die Druckbögen an die neuen Spannweitenverhältnisse angepasst werden.

Obgleich die auch an Probenmaterial tieferliegender Querschnittsbe-
reiche ermittelten geringen Steifigkeiten und die sich lediglich auf
oberflächennahe Zonen erstreckende Steinkonservierung durch che-
mische Festigung eine generelle Erhöhung der Rechenfestigkeiten



nicht zuließen, gelang es auf diese Weise zumindest für den ungegliederten Mittelteil des hier zu untersuchenden Teils der Stadtmauer (Renaissanceabschnitt) den rechnerischen Nachweis einer hinreichenden Standsicherheit auch ohne statisch-konstruktive Ertüchtigungsmaßnahmen zu erbringen.

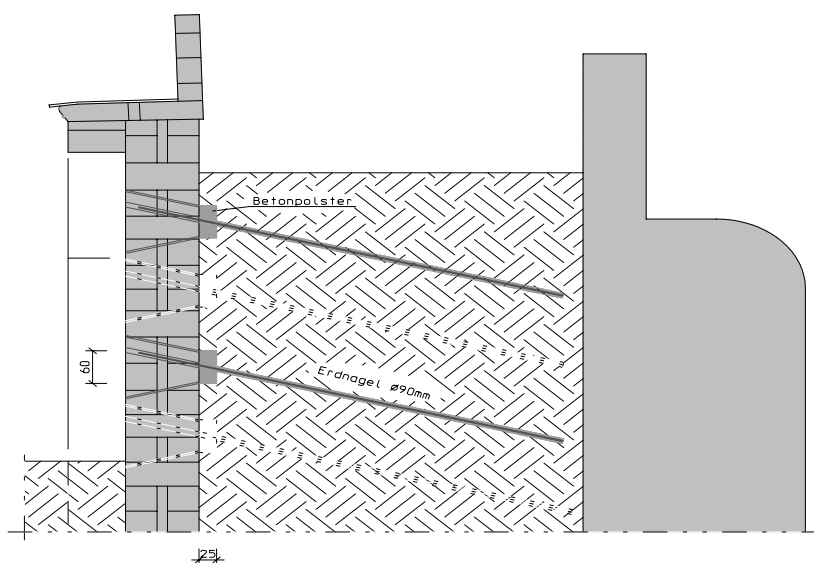
Bei den beidseitig anschließenden, mittelalterlichen Mauerabschnitten ergaben sich unter den, bezogen auf den Polygonzug asymmetrisch einwirkenden Erddrucklasten jedoch auch unter Berücksichtigung der vorbeschriebenen stabilisierenden Querschotte noch immer unzulässig große Exzentrizitäten und Bauteilspannungen nahe den für das



Mauerwerk anzunehmenden Bruchfestigkeiten, so dass hier noch kein als ausreichend zu erachtender Sicherheitsabstand gegenüber dem rechnerisch theoretischen Versagenszustand nachgewiesen werden konnte und für deren Entlastung schließlich Hilfskonstruktionen gefunden werden mussten.

Eine Freilegung der Wehrmauer auf der Feldseite und die Errichtung additiver Stützbauwerke war angesichts der hohen Anschüttung und des sich hieraus ergebenden Verbauaufwandes, aber auch in Hinblick auf den Erhalt der schützenswerten Rollierungsschicht und die Vermeidung von Eingriffen in darunter anstehende Kulturschichten, trotz der sich hierbei bietenden Möglichkeit, den Feuchteintrag in die Sandsteinmauer nachhaltig zu reduzieren, nicht weiter zu verfolgen.

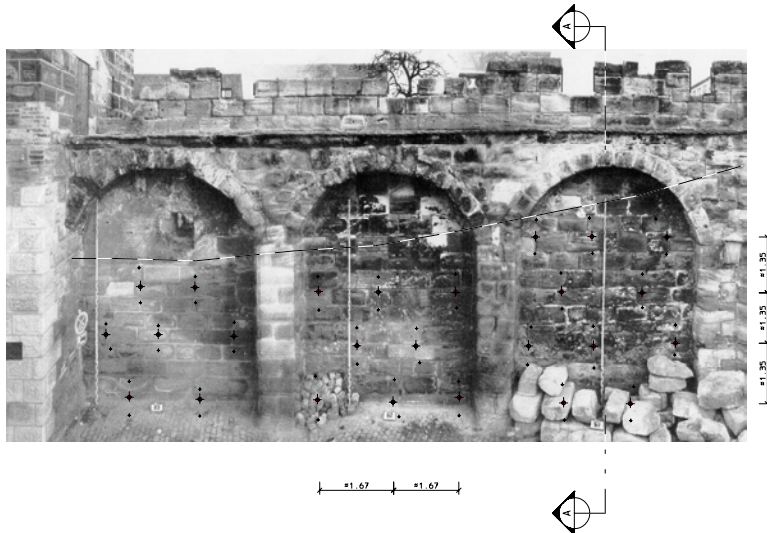
Nach Prüfung verschiedener, für eine Rückhaltung der versagensgefährdeten Stützwandabschnitte infrage kommender Tragwerkslösungen hinsichtlich deren baupraktischer Durchführbarkeit, Denkmalverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit entschied man sich schließlich - auch wenn verfahrensbedingt mit einem unvermeidbaren kurzfristigen Feuchtigkeitsanfall an der Mauerrückseite verbunden, für die sogenannte "Selbstragende Erdvernagelung" als substanzschonendste und zugleich kostengünstigste Lösung (vgl. *Zwischenbericht 3 sowie Plan Nr. V03*).



Vorschlag:
Selbstragende Erdvernagelung



Segmentbogen Nr. 61 bis 63



Lage der Bohrungen
Segment 61 bis 63

Segmentbogen Nr. 53 bis 56



Lage der Bohrungen
Segment 53 bis 56

Diese Sicherungsmethode bot den großen Vorteil, dass die Wehr-
mauer selbst keinen Lastumlagerungen infolge Veränderungen am
Tragwerksgefüge ausgesetzt wird und zum Einbringen von Ankerele-
menten, welche den auf die gefährdeten Mauerabschnitte einwirken-
den Erddruck reduzieren, lediglich kleinflächig durchdrungen werden
musste.

Die Erdvernagelungen wurden dabei so ausgelegt, dass der auf die
Wehrmauer noch einwirkende Resterddruck nicht mehr zu kritischen
Beanspruchungen des nur gering tragfähigen Mauerwerks führt und
insbesondere auch in dem zwar weniger hoch angeschütteten Ab-
schnitt 2 (Segmente 053 bis 056), in den maßgeblichen Bereichen
jedoch lediglich aus gegenüber Quadermauerwerk weniger tragfähi



gen Bruchsteinmauerwerk errichteten Mauerabschnitt wieder eine ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden konnte.

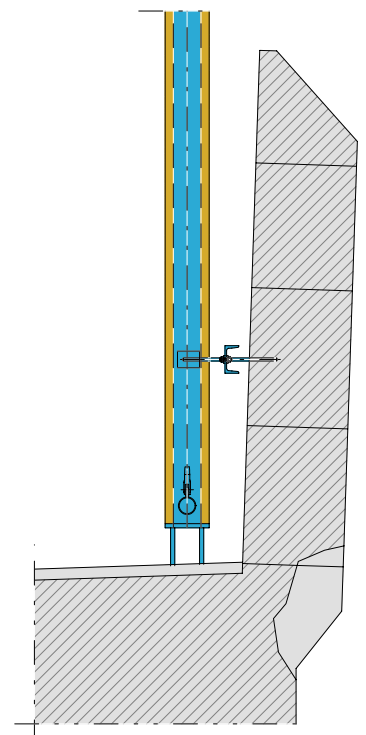
(vgl. auch Zwischenbericht 3)

Tragwerksplanung Schutzdachkonstruktion

Um ein einheitliches Bild zu erreichen, sollte sich die zum Schutz der Mauer vor Witterungseinflüssen vorgesehene Überdachungskonstruktion in ihrem Erscheinungsbild an die historischen Wehgänge anlehnen.



Angesichts der nur geringen Festigkeit der Sandsteinquader und der in Teilabschnitten erheblichen Schiefstellung der Schildmauern war von einer Auflagerung von Pfettenbauteilen auf das Mauerwerk wie bei dem historischen Vorbild abzusehen. Vielmehr galt es die Schutzdachkonstruktion so zu gestalten, dass die als freistehend zu betrachtenden und damit Windkräften ausgesetzten Schildmauern eine horizontale Stützung erfahren können.





Hierzu war es erforderlich, die das Sparrendach stützende Unterkonstruktion in Querrichtung so steif auszubilden, dass unter horizontaler Lasteinwirkung keine für die zu sichernden Mauern unverträglich große Verformungen auftreten.

Nachdem stadtseitig eine Holzkonstruktion gewünscht war, sich aber zur Schildmauer hin eine Stahlkonstruktion nicht nur als materialverträglicher mit dem Sandstein sondern auch als anschlussfreundlicher erwies, wurde eine Rahmenwerk aus Holz - und Stahl konzipiert.

Die dem Verlauf der Mauerkrone angepassten Rahmen ständern über Stahlfüße auf der Wehgangkrone auf und sind dort zur Aufnahme der aus dem Kippmoment resultierenden abhebenden Lastkomponenten mittels eingeleimter Gewindestangen zugfest in die Mauerkrone verankert.

Restaurierung Maxtormauer 2.BA, 1. u. 2. Abschnitt

Statisch-konstruktive Maßnahmen
Schlussbericht

Seite 15 (14)



Die Sicherung der Schildmauer erfolgt über Gewindestangen aus Edelstahl, die in das Sandsteinquadermauerwerk mittels Epoxidharz eingeleimt und an die Rahmenstiele und die zwischenmontierten Brüstungsriegel mittels Beilagscheiben und Muttern zurückverhangen werden. Die jeweils zweiteiligen Tragstäbe sind mittels Futterblechen auf Abstand gehalten, was eine variable Durchführung der erforderlichen Verankerungselemente unter größtmöglicher Rücksichtnahme auf schützenswerte Tabuzonen ermöglichte.

Die Längsaussteifung der holzsichtig ausgeführten stadtseitigen Konstruktion erfolgt über zwischen den Pfosten und den unteren Riegeln angeordnete Fußbänder, auf der Feldseite über den biegesteifen Zusammenschluss der Stützenprofile mit den stählernen Fußriegeln.
(vgl. Tragwerksplanung Pl. Nr. W-K01 - W-K05 und W-D01 - W-D03)



Eckental, den 01.03.2004

Ludwig Viezens
Beratender Ingenieur

Die Vervielfältigung und Übertragung auch einzelner Textabschnitte oder Details der vorliegenden Ausarbeitung sowie die Weitergabe an Dritte ist nur gestattet, wenn dieses vorher mit dem Verfasser schriftlich vereinbart wurde.