Gründungsertüchtigung der über 600 Jahre alten Nördlinger Stadtmauer

Dr.-Ing. Marc Raithel, Dipl.-Ing. Merle Wethkamp-Reitmann
Kempfert Geotechnik GmbH, Würzburg

Dipl.-Ing. Mark Böttges
Barthel & Maus Beratende Ingenieure, München

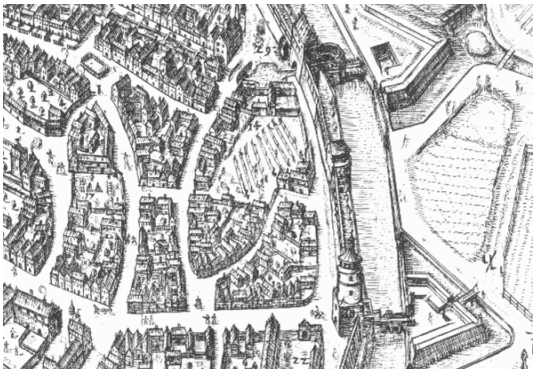
1 Historische Stadtmauer Nördlingen

Die Nördlinger Stadtmauer ist die einzige Stadtmauer Deutschlands, die einen vollständig erhaltenen, rundum begehbaren und überdachten Wehrgang besitzt. Sie hat eine Länge von 2,6 Kilometern und umschließt noch heute die komplette mittelalterliche Altstadt von Nördlingen (s. Bild 1). Zur Stadtmauer gehören fünf Tore mit Tortürmen, elf weitere Türme und eine Bastion.

Bild 1 Übersicht über die Nördlinger Stadtmauer

Der Bau der Stadtmauer begann Mitte des 14. Jahrhunderts. Der Wehrgang wurde im späten Mittelalter sukzessive ausgebaut und die Türme wurden im 16. und 17. Jahrhundert - den fortschreitenden fortifikatorischen Ansprüchen entsprechend - ergänzt. Feldseitig war der eigentlichen Stadtmauer ein Zwinger mit einer Breite von ca. drei bis vier Metern vorgesetzt (s. Bild 2a). Der Zwinger war durch die Zwingermauer geschützt, welche nach historischen Darstellungen (vgl. Kessler 1982) eine Höhe von ca. zwei bis drei Metern über dem Geländeniveau im Zwinger erreichte. Unterhalb der Zwingermauer schloss der etwa zwanzig bis dreißig Meter breite, mit Wasser gefüllte und durch das Flüsschen Eger gespeiste Stadtgraben an.

Nach dem Verlust der reichsstädtischen Unabhängigkeit durch die Mediatisierung 1802 wurden die äußeren Abschnitte der Wehranlagen sukzessive abgerissen. Der Stadtgraben wurde in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts trockengelegt und verfüllt und bis ca. 1820 wurde auch die Zwingermauer zurückgebaut. Anstelle der abgestuften, durch die Mauer gestützten Terrassierung von Graben und Zwinger wurde eine einfache Erdböschung angelegt. Auch der nach seiner charakteristischen Form benannte „Backofenturm“ in der Mitte des nachfolgend behandelten Stadtmauerabschnittes wurde im 19. Jahrhundert bis auf die in den Mauerverlauf einbezogene Rückwand abgebrochen.



a)

b)

Bild 2 a) Löpsinger Mauer auf dem Vogelschauplan von Andreas Zeidler, 1651. Gut erkennbar sind Stadtgraben und Zwingermauer.
b) Ansicht der Löpsinger Mauer, Blick vom Wasserturm auf das Löpsinger Tor kurz vor Abbruch des „Backofenturms“, Aquarell von Johannes Müller, um 1820. Der Stadtgraben ist trockengelegt, die Zwingermauer abgebrochen.

2 Problemstellung

In dem ca. 200 m langen Stadtmauerabschnitt „Löpsinger Mauer“ zwischen dem Löpsinger Tor und dem sogenannten „Unteren Wasserturm“ mit dem Durchfluss der Eger wurden im Zuge von geodätischen Verformungsmessungen in den Jahren 2004 starke Deformationen der bis zu ca. 9,5 m hohen und ca. 1,9 m starken Mauer festge-

stellt, vgl. Bild 3. Die maximale Schrägstellung der Mauer von ca. 90 cm wurde im Bereich des ehemaligen „Backofenturms“, d.h. ca. in der Mitte des betreffenden Mauerabschnittes festgestellt, wobei die Verformung zu den beiden begrenzenden Turm- bzw. Torbauten hin abnahm. Als Sofortmaßnahme wurde der am stärksten betroffene Bereich auf einer Länge von ca. 40 m im Jahr 2005 durch 4 feldseitige Strebepfeiler, welche auf Mikropfählen gegründet wurden, gesichert. Gleichzeitig wurde die Stadtmauer in diesem Bereich neu verfugt und verputzt.

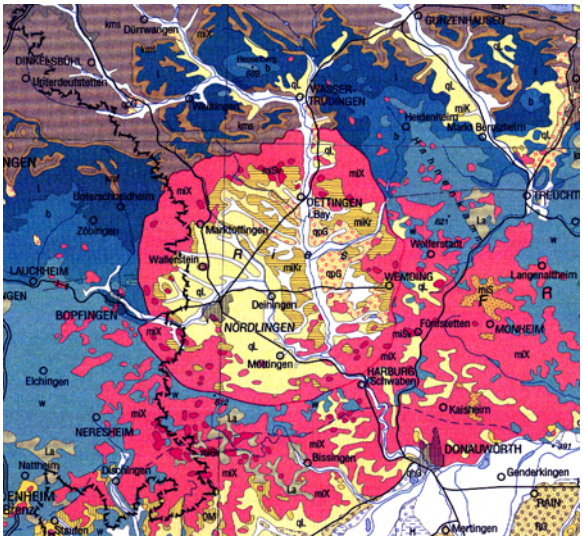
Im darauffolgenden Jahr wurden in den an die Sanierung anschließenden Mauerbereichen neue Risse sichtbar, woraufhin im Dezember 2006 eine Nachvermessung des Stadtmauerabschnittes erfolgte. Dabei wurde eine Zunahme der Horizontalverformungen festgestellt. Zur Beurteilung der Verformungen bzw. der Verformungsgeschwindigkeit wurde daraufhin in insgesamt 39 Messquerschnitten eine fortlaufende messtechnische Überwachung der Mauer mittels speziell angebrachter Messmarken veranlasst.

Bild 3 Schiefstellungen und Rissbildungen der Stadtmauer vor der Sanierung

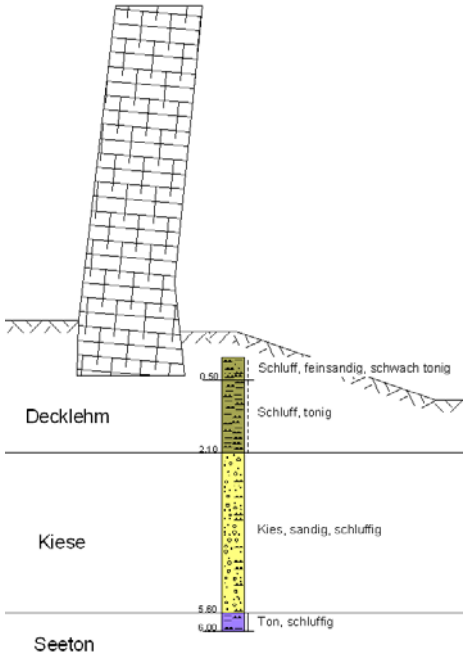
Aufgrund der eingetretenen Situation mit fortschreitender Deformation und Schiefstellung der Mauer war eine sofortige Sperrung des sonst rundum begehbaren Wehrganges im betreffenden Stadtmauerabschnitt sowie eine kurzfristige Analyse der Schadensursachen und Durchführung einer zielgerichteten Sicherung und Ertüchtigung erforderlich.

3 Baugrunderkundungen und besondere Geologische Situation

Vor 15 Millionen Jahren ist das Nördlinger Ries (s. Bild 4 a) durch den Einschlag eines Großmeteoriten mit einem Durchmesser von ca. 1 km entstanden. Der Meteoritenkrater (ca. 25 km Durchmesser) füllte sich zunächst mit Wasser und dann nach und nach mit Seeablagerungen (Riesseeton). Etwa zwei Jahrhunderte lang glaubte man, dass die Entstehung des Ries-Kraters vulkanischen Ursprungs sei. Erst 1961 wurden Mineralumwandlungen entdeckt, die ausschließlich beim Einschlag von großen Meteoriten entstanden sein können.



a)



b)

Bild 4 a) Auszug aus der geologischen Karte (Bay. GLA 1996)
b) Querschnitt mit Baugrundprofil

Im betreffenden Stadtmauerbereich konnte bei umfangreichen Erkundungen der für den Nördlinger Bereich bekannte Baugrundaufbau bestätigt werden. Demnach steht unterhalb von Auffüllungen der Decklehm in unterschiedlichen Mächtigkeiten von bis zu ca. 3 m an, welcher eine weich bis steife Konsistenz aufweist. Unterhalb der Decklehme folgt eine gut tragfähige Schicht aus mitteldicht gelagerten Kiesen, die im betreffenden Stadtmauerabschnitt Mächtigkeiten zwischen ca. 2,5 bis ca. 4,5 m aufweisen. Der Kies wird vom Riesseeton (z.T. auch als Tertiärton bezeichnet) in generell steif bis halbfester Konsistenz mit Lagen aus schluffigerem Material oder Mergel, unterlagert. Der Riesseeton steht im Nördlinger Bereich erfahrungsgemäß in Mächtigkeiten von ca. 300 m an.

Die Stadtmauer ist bei geringen Einbindetiefen von ca. 0,3 bis 1,0 m im Decklehm gegründet. Ein Fundament im heutigen Sinne wurde bei den durchgeführten Erkundungsschürfen nicht angetroffen. Vielmehr zeigte sich ein unzureichend verfugtes Bruchsteinmauerwerk ohne Überstand in Bezug auf die aufgehende Mauer, vgl. Bild 4 b). Der

Grundwasserspiegel liegt jahreszeitlich schwankend in einem Tiefenbereich ca. 0,7 bis 2,5 m unter der in Schürfen erkundeten Unterkante der Stadtmauer, wobei die Kiesschicht den grundwasserführenden Aquifer darstellt, welcher im Wesentlichen mit der Eger korrespondiert.

4 Verformungs- und Schadensanalysen

4.1 Verformungen der Mauer

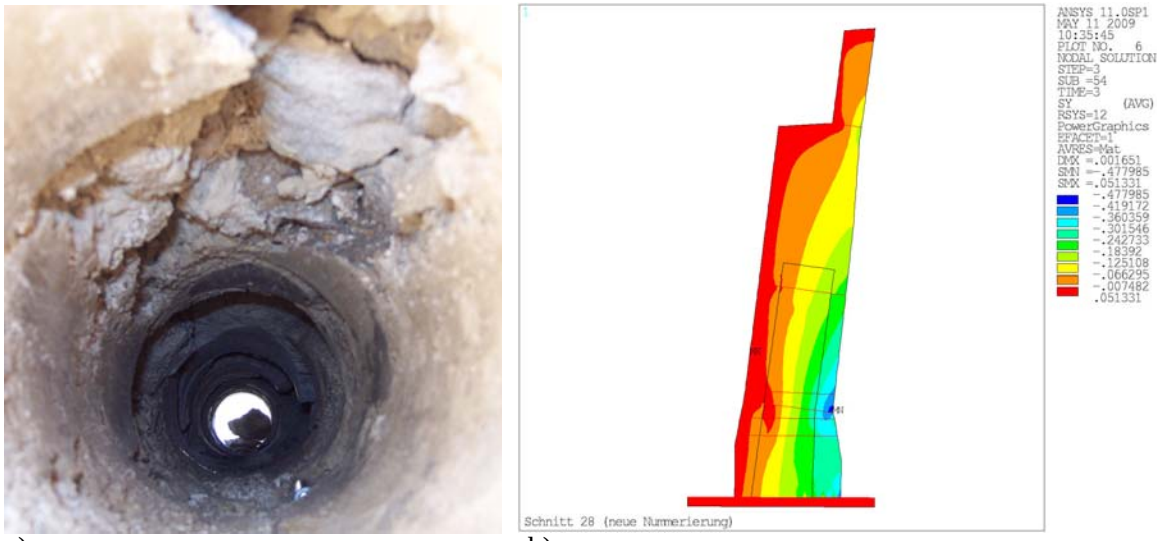
Davon ausgehend, dass die Schiefstellung gemäß den im Folgenden beschrieben geotechnischen Berechnungen ihre Ursache in der um 1820 vorgenommenen Neumodellierung des Geländes des ehemaligen Stadtgrabens hat, beträgt die mittlere Verformungsgeschwindigkeit in der Zeit zwischen 1820 und 2006 maximal ca. 5 mm/Jahr. Im Zuge des Messprogramms, das seit 2007 durchgeführt wird, wurde festgestellt, dass sich die Mauer bereits in den ersten 9 Monaten das Jahres 2007 um weitere bis zu ca. 10 mm geneigt hat. Dies bedeutet eine Verformungsgeschwindigkeit von ca. 13 mm/Jahr und somit eine progressive Verformungszunahme.

4.2 Mauerzustand

Zur Untersuchung des inneren Zustandes der Stadtmauer wurden im betreffenden Abschnitt insgesamt 5 Kernbohrungen mit anschließender Kamerabefahrung mittels Endoskop durchgeführt. Wie zu erwarten zeigte sich, dass der Mauerkern wesentlich weniger kompakt ausgeführt wurde als die Außenbereiche. Vor allem hier war das Gefüge der Mauer durch Hohlräume, Mörtelfehlstellen, Spalten und offene Klaffungen gestört. Eine ausgeprägte Mehrschaligkeit wurde nicht festgestellt.

Statische Berechnungen zeigten, dass bei den derzeitigen Verformungen die Anforderungen der für Mauerwerk gültigen Norm an klaffende Fugen und Mauerwerkspressungen gerade noch erfüllt sind. Schon geringe weitere Verformungen würden zu unzulässigen Exzentrizitäten der Kraftresultierenden im Mauerquerschnitt führen. Also waren eine Verfüllung der Hohlräume mittels Injektion und eine Vernadelung des Mauerwerks zur Aufnahme der Querzugspannungen am Mauerfuß erforderlich.

Die statischen Berechnungen zum Nachweis der Instandsetzungsmaßnahmen wurden mittels der Finite-Element-Methode durchgeführt. Hierbei wurden die Außenschalen mit einem linear-elastischen Materialmodell modelliert wobei Zugspannungen ausgeschaltet wurden. Für den Kern wurde ein elastisch-plastisches Materialverhalten mit dem Materialmodell von Drucker-Prager berücksichtigt. Die Nadelanker wurden als Stabelemente nachgebildet, so dass die von den Ankern aufzunehmenden Spaltzugkräfte in Abhängigkeit von der Schiefstellung der Mauer ermittelt werden konnten.



a) b)

Bild 5 Zustand des Mauerwerkes vor der Instandsetzung
a) Endoskopische Untersuchung des Mauerwerks.
b) Vertikalspannungen im Mauerquerschnitt unter Berücksichtigung der Rissbildung und eines geschwächten Mauerkerns.

4.3 Geotechnische Analyse

Um zu klären warum nunmehr bei der jahrhundertelang bestehenden Stadtmauer gerade in den letzten Jahren solch rasche Verformungszunahmen und nachhaltige Schäden auftraten, wurden neben den Verformungsmessungen und Analysen des Mauerzustandes auch geotechnische Standsicherheitsuntersuchungen durchgeführt. Die Durchführung von analytischen Standsicherheitsberechnungen erwies sich hierbei als nicht zielführend, da aufgrund der geringen Einbindetiefe, der hohen Lasten sowie der Geländegeometrie hinsichtlich Grundbruch, Kippen und Gleiten ohnehin keine rechnerische Standsicherheit gegeben war. Daher wurde die Analyse der Verformungs- und Schadensursachen mittels numerischer Berechnungen durchgeführt.

Den zweidimensionalen Finite-Elemente-Berechnungen wurde ein schematischer Querschnitt der Stadtmauer angrenzend an den mit den Strebepfeilern sanierten Bereich zugrundegelegt. Die Einbindetiefe des Mauerfußes wurde mit 50 cm angenommen und die Schichtung des Untergrundes entsprechend der Aufschlüsse angesetzt. Das Mauerwerk wurde vereinfachend als linear-elastisches Material berücksichtigt, wohingegen zur Modellierung der Decklehmeigenschaften das sogenannte Soft-Soil-Model und zur Modellierung des Verhaltens der Kies- und Seetonschichten das sogenannte Hardening-Soil-Model verwendet wurde.

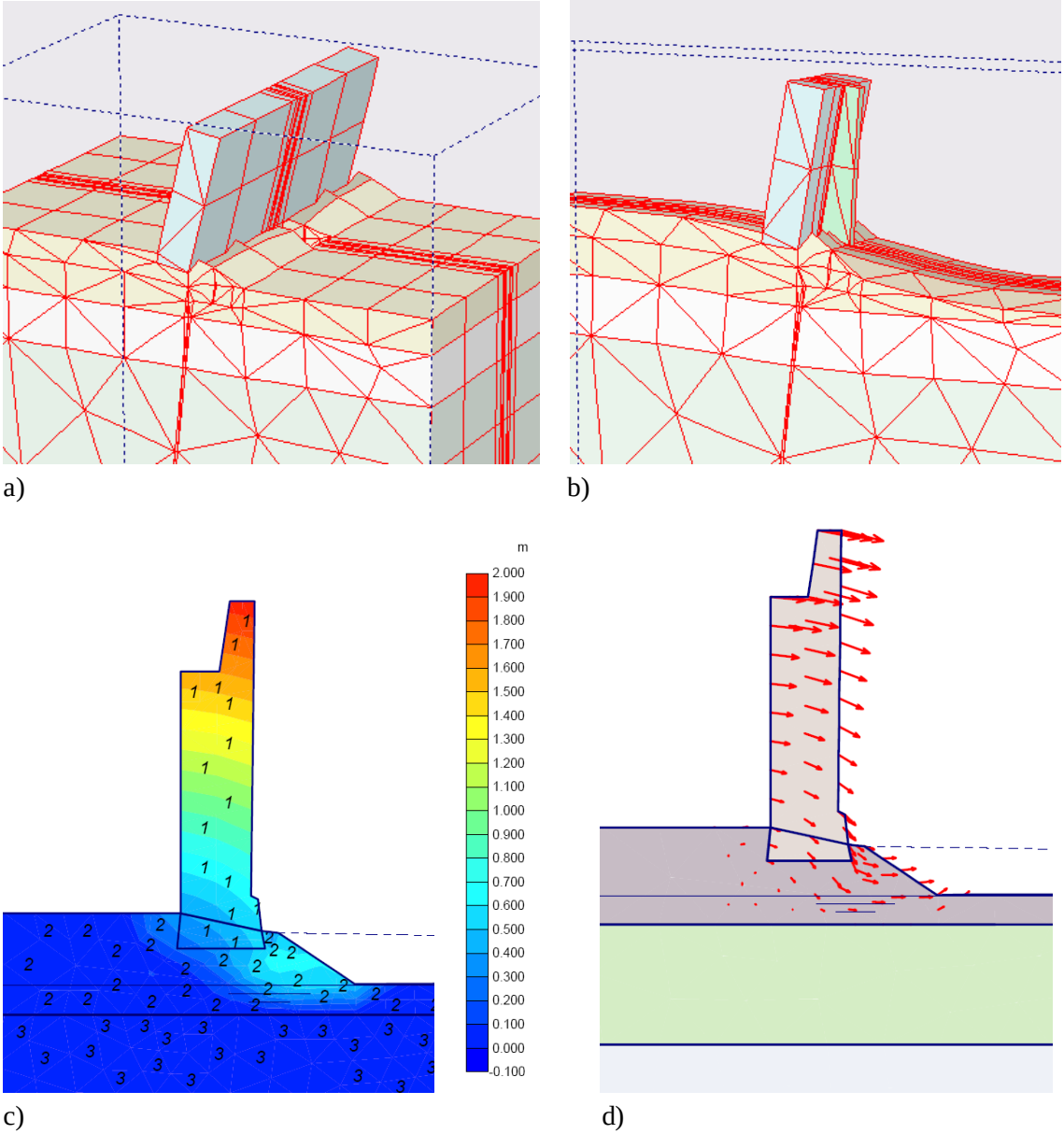


Bild 6 Ergebnisse der numerischen Analysen bei Variation der Bodenkennwerte des Decklehms
a) Modellausschnitt ohne Strebepfeiler
b) Modellausschnitt mit Strebepfeiler
c) Verformungsgrößen
d) Verformungsrichtungen

Zuerst wurde der wahrscheinlich um 1820 vorhandene Zustand nach Abriss des Zwingers und des „Backofenturms“ mit teilaufgefülltem Graben untersucht, ohne hierbei die jetzige Geländegeometrie mit der sich an die Mauer anschließenden Böschung zu berücksichtigen. Hier ergab sich auch bei Variation des Grundwasserstandes keine maßgebende Schiefstellung des Stadtmauerquerschnittes. Die Herstellung einer Böschung vor dem feldseitigen Fuß der Mauer in den ehemaligen Stadtgraben hinein, wie sie wahrscheinlich gleichzeitig oder schon kurze Zeit später durchgeführt wurde, hat hinge-

gen einen erheblichen Einfluss auf die Verformungen und Standsicherheit der Mauer, was in den Berechnungen durch eine erhebliche rechnerische Schiefstellung der Stadtmauer gezeigt wurde.

Eine darüber hinaus durchgeführte Parameterstudie hinsichtlich der Bodenkennwerte des Decklehms zeigte außerdem, dass das Berechnungsmodell relativ sensibel auf Veränderungen der Bodenparameter des Decklehms reagiert. Bereits bei einer geringen Reduzierung der Scher- und Steifigkeitsparameter von $\varphi' = 27{,}5°$ auf 25°, von $c' = 5$ kN/m² auf 3 kN/m² und $E_s = 4$ MN/m² auf 3 MN/m², was durchaus im realistischen Schwankungsbereich für einen weichen bindigen Boden liegt, nehmen die berechneten Verformungen überproportional zu und die Standsicherheit deutlich ab.

Die Ergebnisse zeigten, dass die grundsätzliche Verformungscharakteristik („Kippen der Wand nach Außen“) anhand der FEM-Berechnungen nachgebildet werden konnte. Aufgrund der in den letzten Jahren gemessenen Zunahme der Verformungsgeschwindigkeiten ist anzunehmen, dass nach Abriss des Zwingers und des „Backofenturms“ zunächst nur geringe Setzungen im Bereich der außenseitigen Mauer aufgetreten sind. Erst mit Herstellung der Böschungen und der damit verbundenen zunehmenden Exzentrizität der Lasten bzw. Erhöhung der Sohlspannungen auf der Außenseite der Mauer setzte die kontinuierliche Geschwindigkeitszunahme bei den Setzungen sowie der Verkippung ein.

Auf Grundlage aller Untersuchungsergebnisse wurde ein Sanierungskonzept erstellt, welches im betreffenden Mauerabschnitt die Unterfangung mittels Düsenstrahlverfahren und zuvor die Ertüchtigung des Mauerwerks vorsah.

5 Planung und Ausführung der Sanierung

5.1 Ertüchtigung des Mauerwerks

Nachdem die Stadtmauer in den stark verformten Bereichen stadtseitig durch eine temporäre Abspannungskonstruktion gesichert wurde, wurde zunächst das Mauerwerk instandgesetzt. Die Ertüchtigung des Mauerwerkes war erforderlich, da bei dem angetroffenen Mauergefüge und dem großen Hohlraumgehalt nicht gewährleistet werden konnte, dass es die Scher-, Querzug und Druckbeanspruchungen aus der bereits eingetretenen Schiefstellung und die nicht unerhebliche lokale Mehrbeanspruchung des Mauerwerkes während der Unterfangung mittels Düsenstrahlverfahren mit ausreichender Sicherheit aufnehmen kann. Die Instandsetzungsmaßnahmen sahen eine Injektion des Bruchsteinmauerwerkes mit Trasskalkmörtel, eine Vernadelung des Mauerwerkes mit Edelstahlgewindestangen und eine Tiefenverfugung der Wandflächen vor. Die Intensität dieser Maßnahmen wurde je nach angetroffenem Schadensbild und Größe der Schiefstellung auf Grundlage der statischen Berechnungen abgestuft.

5.2 Untergrundertüchtigung

Da die notwendige Sanierung aus ästhetischen und denkmalpflegerischen Aspekten den Anblick der Stadtmauer möglichst nicht verändern sollte, kamen nur Sanierungen unterhalb der Geländeoberkante in Frage. Eine Sicherung mittels tiefgegründeter, außen an die Mauer angebrachter Stahlbetonstützen, ähnlich wie die Strebepfeiler, die lokal bereits im Bereich des ehemaligen „Backofenturms“ ausgeführt wurden, wäre durchaus wirksam gewesen, wie durch 3-dimensionale FEM-Berechnungen belegt werden konnte (vgl. Bild 6 b), durfte aber aus optischen Gründen nicht ausgeführt werden. Daher wurde eine Untergrundertüchtigung gewählt und mit FEM-Berechnungen nachgewiesen, die eine Unterfangung der historischen Stadtmauer mittels Düsenstrahlverfahren vorsah und die die Lasten der Stadtmauer - vor allem auf der Maueraußenseite - in den tragfähigen Kieshorizont abträgt.

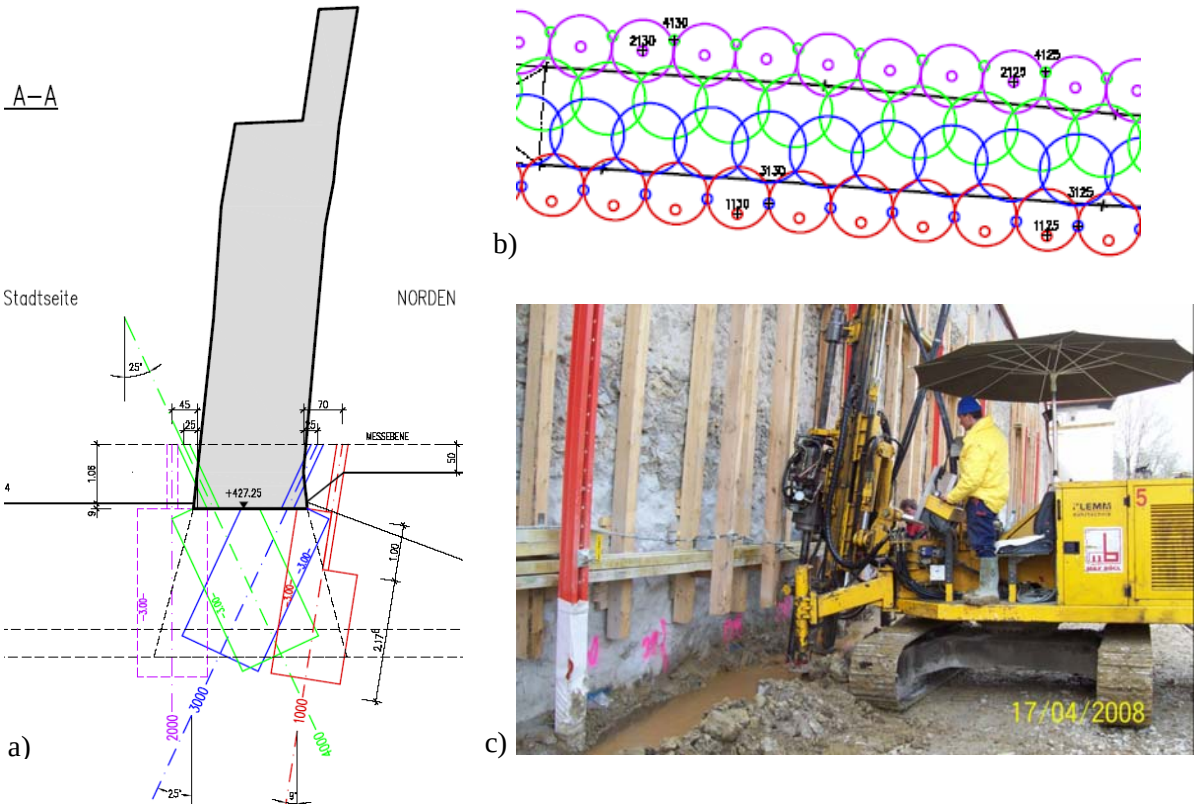


Bild 7 Untergrundertüchtigung
a) Querschnitt
b) Säulenanordnung im Grundriss
c) Säulenherstellung

Das Sanierungskonzept sah vor auf dem gesamten ca. 200 m langen Mauerabschnitt 4 Säulenreihen herzustellen, die sich gegenseitig überschneiden, damit ein kompakter Fundamentkörper entsteht, der außerdem breiter ist als der bisherige Mauersockel, vgl. Bild 7. Um die gewählten Düsparameter der geplanten Säulendurchmesser von 1,25 bzw. 1,50 m zu überprüfen, wurden im Vorwege Probesäulen im Decklehm ausgeführt.

Bei der Ausführung der Unterfangung war entscheidend, dass der Düsenstrahlgründungskörper mindestens 50 cm in die anstehende Kiesschicht einbindet und dass an der unebenen und aus unverfugtem Bruchstein bestehenden Unterkante der Mauer ein kraftschlüssiger Verbund entsteht. Letzteres wurde nach Herstellung und Aushärtung stichprobenartig an mehreren Stellen des sanierten Mauerabschnitts mittels Baggerschürfen nachgewiesen.

Dass die Sanierung des Abschnitts „Löpsinger Mauer“ der Nördlinger Stadtmauer erfolgreich war, konnte nach Fertigstellung sämtlicher Maßnahmen Anfang Oktober 2008 anhand der geodätischen Messungen sowie anhand von 3 installierten Inklinometern gezeigt werden, da keine Verformungen der Mauer bzw. des Untergrundes mehr gemessen wurden, vgl. Bild 8.

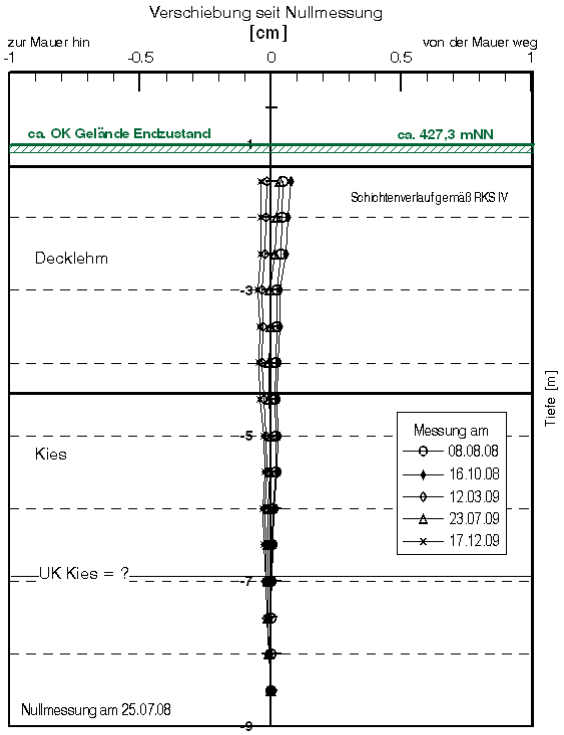


Bild 8 Inklinometermessungen nach der Sanierung

Literatur

Kessler, H. (1982)
Die Stadtmauer der freien Reichsstadt Nördlingen. Schriftenreihe des Historischen Vereins für Schwaben, Band 12

Bayerisches Geologisches Landesamt (1996)
Geologische Karte Bayern 1:500 000. 4. Auflage, München