

Optimierung von Edelstahl-Fassadenankern mit geometrisch / werkstofflich nichtlinearem Verhalten mittels Finite-Element-Analysen und Näherungsverfahren

KEY-Words:

Trag-Anker in Fassaden
– Normative Forderungen – Kosteneinsparung
– Dehnungsverhalten – Tragsicherheit von Edelstahlanke-
ren – nichtlineares Verformungs- und Spannungsproblem

Problemstellung

Vorgehängte hinterlüftete Fassadenplatten aus Naturwerkstein nach DIN 18516 T3 werden aus Kostengründen nach wie vor bevorzugt mit eingemörtelten Anker aus Edelstahl am Rohbau befestigt.

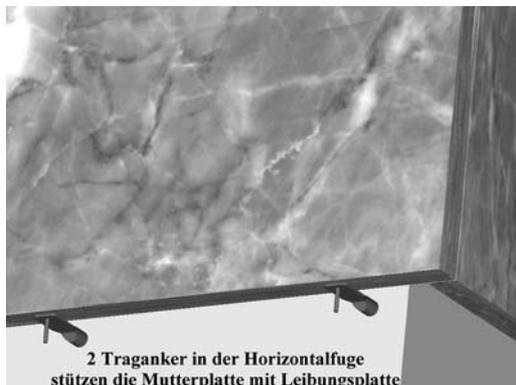
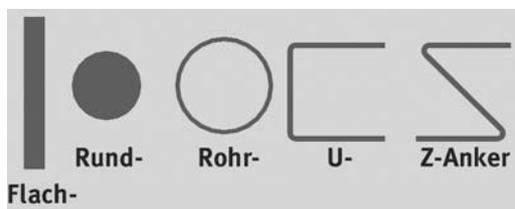


Bild 1:
Mutter- + Leibungsplatte mit 2 Tragankern

Diese Befestigungsweise ist auf der Baustelle flexibel und wirtschaftlich einsetzbar. Die normativen Forderungen, Wärmebrücken, die durch die Anker entstehen, zu berücksichtigen und die Bohrlöcher für die Anker im Verankerungsgrund des Rohbaues auf 50 mm Durchmesser zu begrenzen, sowie der Zwang zur Kosteneinsparung eröffnen ein weites Feld für Optimierungsüberlegungen, die vom gestaltenden Fassadenentwurf bezüglich Plattenraster und Fugenbild über die Wärmdämmschichtwahl bis hin zur Ausbildung des Ankerquerschnittes reichen.

Bild 2:
Typische Trag-Ankerquerschnitte



Die wirtschaftliche Bedeutung solcher Überlegungen folgt aus den Marktdaten: In Deutschland werden jährlich etwa 2 Mio. m² vorgehängte, hinterlüftete Fassaden aus Naturwerkstein er-

richtet. Bei durchschnittlicher Fassadenplatten-größe von ca. 0,5 m², 2 Anker pro Platte und durchschnittlichen Ankerkosten von ca. 6 € / Stück ergibt sich ein Marktvolumen von etwa 50 Mio. € für Planung, Lieferung u. Baustellenmontage der eigentlichen Anker, d.h. ohne die Kosten für die Platten selbst, Gerüste etc. Die Planung, Herstellung und Montage der Anker erfolgt bisher weitgehend handwerklich orientiert, sodass hier noch ein erhebliches Rationalisierungspotential besteht. Der optimale Ankerquerschnitt steht im vorgestellten F&E-Vorhaben im Vordergrund.

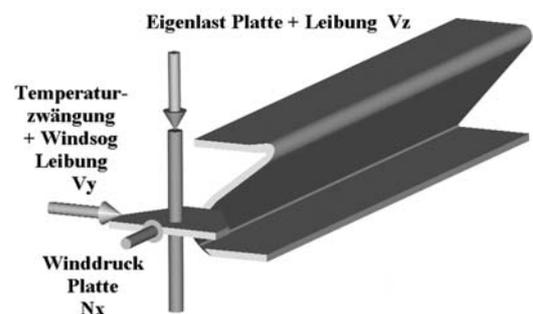


Bild 3: Z-Anker mit Dorn u. Lasten

Normungssituation für Edelstahl

Die unzugänglich eingebauten Anker sind mäßiger Chlorid- u. Schwefelbelastung ausgesetzt und müssen deshalb aus austenitischem Chrom-Nickelstahl bestehen. Üblicherweise wird in Deutschland die Stahlsorte 1.4571 / X6CrNiMoTi 17-12-2 mit $R_{p0,2} = 275 \text{ N/mm}^2$ eingesetzt. Edelstähle weisen im Gegensatz zu den Baustählen ein ausgeprägt nichtlineares Spannungs-Dehnungsverhalten auf, wodurch hohe Spannungsausnutzungen mit größeren Dehnungen und damit bisweilen größeren Verformungen einhergehen.

Diese Tatsache ist Anlass für die Forderung der deutschen Edelstahlzulassung Z-30.3-6 vom 25.9.1998, dass in Tragsicherheitsnachweisen, bei denen die Bauteilverformung einen erheblichen Einfluss auf das (Momenten-)Gleichgewicht hat

KONTAKT:

Prof. Dr.-Ing.
Wilfried Zwanzig
Fachbereich
Bauingenieurwesen
Finkenherd 4
56075 Koblenz
T 0261 9528-211
zwanzig@fh-koblenz.de

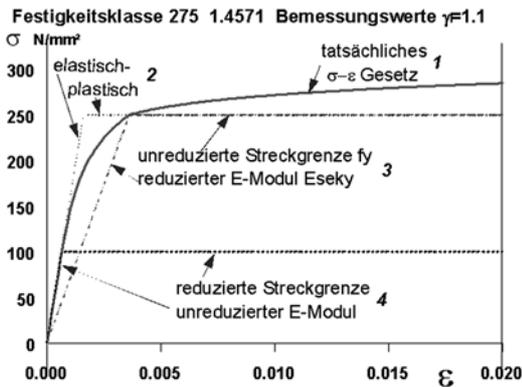


Bild 4: σ - ϵ Beziehungen, tatsächlich / vereinfacht

(Stabilitätsnachweis nach Theorie II. Ordnung – Knicken, Biegedrillknicken, Beulen), das nichtlineare σ - ϵ Verhalten zu berücksichtigen ist.

Dies ist relevant für Flachanker bei Längsdruck und Biegung um die schwache Achse und bei U-Ankern, bei denen verformungsbedingte Biegetorsionseffekte zu berücksichtigen sind, sowie für die Gurtbeulung. Die Edelstahlzulassung bietet hierzu – neben einer nichtlinearen Rechnung mit Kurve 1 – vereinfachend eine Rechenmethode an, die mit einem in Abhängigkeit von der gewählten Streckgrenze reduzierten E-Modul (Sekantenmodul E_{seky} E_{sek} Kurven 3, 4) die üblichen Formelsätze der Baustahlnorm DIN 18800 für elastisch-plastische Nachweise mit der Streckgrenze des unverfestigten Werkstoffs verwendet. In Fällen ohne Stabilitätsgefahr darf elastisch-plastisch ohne Abminderung nach Kurve 2 gerechnet werden.

Diese zunächst bestechend einfache Methode hat jedoch den Nachteil, dass die auf den spannungsmäßig stärksten beanspruchten Punkt bezogene, pauschale E-Modul-Reduktion auch die spannungsmäßig nur schwach ausgenutzten Bauteilbereiche ungerechtfertigt benachteiligt und so oft zu unwirtschaftlichen Lösungen, Wettbewerbsnachteilen und unnötigem Materialverbrauch führt. Diesen Nachteil für die Bemessungspraxis durch differenziertere Verfahren zu beseitigen, ist das Ziel des vorliegenden F&E-Vorhabens.

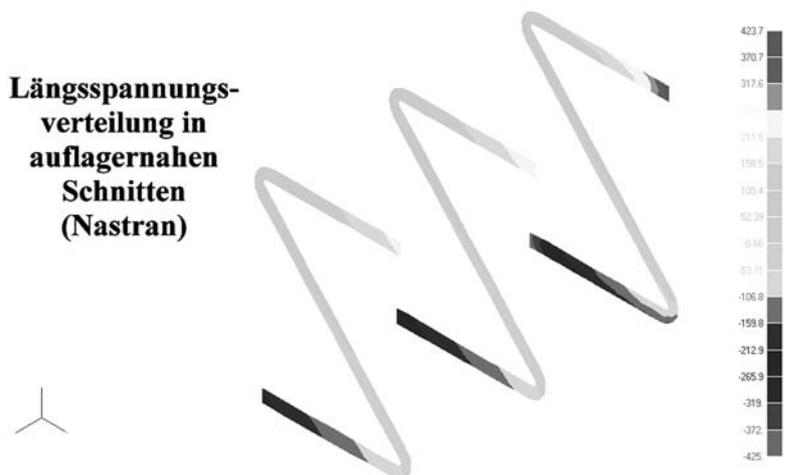
Lösungsansatz

Für die Bemessung von standardisierten oder in einer Fassade mit großer Stückzahl vorkommenden Ankern ist es deshalb oft wirtschaftlicher, das tatsächliche, nichtlineare σ - ϵ Verhalten zugrunde zu legen. Da die übliche Baustatik-Software einen nichtlinearen Materialgesetz-Typ nicht unterstützt, wird in dieser Untersuchung das nichtlineare Verformungs- u. Spannungsproblem mit Mathcad-Software in Form einer Dehnungsiteration mit Tangentenmodul u. schrittweiser Laststeigerung modelliert und mit INCA2 und allgemeiner FEM-Software / MSC-Nastran for Windows 2002 gegengerechnet. Die Modellierung der Anker-geometrie erfolgt mit AutoCAD, die Übergabe an Nastran geschieht über die ACIS-Schnittstelle. Die Ergebnisse der nichtlinearen FEM-Analyse sind Kontrollbasis für Näherungslösungen.

Welche Regeln und Randbedingungen zur wirtschaftlichen Ankeroptimierung sind wesentlich? Die Herstellkosten einer Verankerung – im Werk und auf der Baustelle – sind stark unternehmensabhängig und kalkulatorisch oft nicht klar erfasst u. abgegrenzt.

Bild 5: Spannungsverteilung σ_x am Z-Anker (Nastran)

Längsspannungsverteilung in auflagenahen Schnitten (Nastran)



Den hier durchgeführten Optimierungen liegen deshalb Kostenmittelwerte zugrunde. Hierin sind generell neben den Gemeinkosten auch die

Werkzeugkostenkosten enthalten. Die Bohrzeiten im Rohbau sind nur schwach von Lochdurchmesser u. -länge abhängig.

Tabelle 1:
Kalkulationsbasis-
daten - Mittelwerte

Edelstahl-1.4571 Blechmaterial	3,0 €/kg
Edelstahl-1.4571 Rundmaterial	3,5 €/kg
Edelstahl-1.4571 geschweißtes Rohr	4,5 €/kg
Fertigungseckwerte Ankerlänge 300 mm	
Flachanker h/s 25/3 mm mit Dorn 5 mm	1,0 €/Stk
Rundanker Ø 15mm mit Dorn 5 mm	0,85 €/Stk
Rohranker Ø/s 20/2 mm mit Dorn 5 mm	1,1 €/Stk
U-Anker h/b/s 40/15/3 mit Dorn 5 mm	1,5 €/Stk
Bohrzeit Eckwert B25 Ø / L 30 / 85 mm	5 min
Mittellohnkosten Baustelle	38 €/h

Ergebnisse

Ein vorläufiges, unvollständiges Ergebnisbündel der Optimierungen wird pauschalierend zusammengefasst: Die Konstruktionsfläche für den Ankerquerschnitt bei einem normativ maximalen Bohrlochdurchmesser von 50mm bei Beachtung von baupraktisch unvermeidlichen Ankerschiefstellungen ist ein Kreis von ca. 45 mm Durchmesser. Zugrunde liegt eine Fassade mit großer Dämmschicht- /Luftzwischenraumdicke (Auskrägung 270 mm) im Höhenbereich zwischen 20 u. 100 m mit entsprechenden Kräften aus Eigenlast, Wind u. Temperaturzwängung und Platten mit Lei-

bungen befestigt mit 2 Tragankern in der Horizontalfuge pro Platte. Die Variation der Platten- + Leibsungsfläche von 0,4 m² bis 1,6 m² ergibt die Kurven für Kosten / m² (linke Achse) nach Bild 6 für optimierte Flach-, Kreis, Rohr und U- Querschnitte. Die Optimierung von Z-Ankern ist in Bearbeitung.

Am kalkulatorisch günstigsten sind U- u. Rohranker, die trotz dünner Wandung hohe Biegesteifigkeit für jede Lastrichtung haben und ein nur kleines Bohrloch erfordern. Kritisch wird der Rohranker, wenn er beim Einbau in ein nicht passendes Loch mit dem Hammer angepasst wird und dabei seine Form verliert Der Flachanker, der bei Monteuren beliebt ist, weil er an die oft ungeplante Einbausituation relativ leicht anpassbar ist, erweist sich bei kleinen Platten auch als kalkulatorisch akzeptabel. Am ungünstigsten ist der runde Vollquerschnitt. Beim U-Anker erfolgt durch entsprechende Kopfausbildung die Lasteinleitung in der Nähe des Schubmittelpunktes, um die Torsion klein zu halten. Hinsichtlich der Kostenstruktur (rechte Achse, nur Flachanker dargestellt) fällt der große Anteil von 45–55% für das Ankerlochbohren auf. Bild 7 zeigt entsprechende Ergebnisse für Platten ohne Leibung mit kleiner Auskrägung (150 mm). Es entfallen die seitlichen Windsogkräfte, sodass die Biegung um die vertikale Ankerachse klein ist.

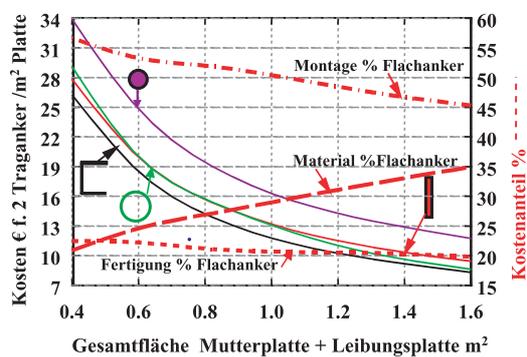


Bild 6: bezogene Ankerkosten für Mutter- u. Leibungsplatte €/m²

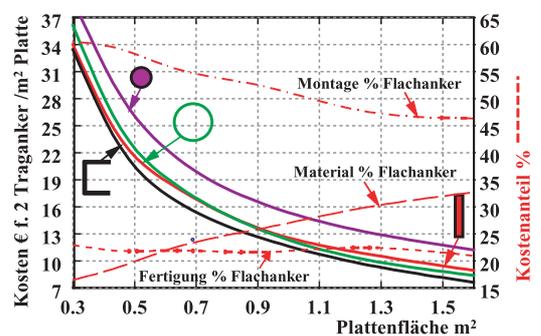


Bild 7: bezogene Ankerkosten für Platten ohne Leibungen €/m²

Ausblick

Der praktische Einsatz anspruchsvoller Optimierungswerkzeuge auch in Kleinunternehmen ohne EDV/ FEM-Experten wird einfacher handhabbar, wenn der Prozess von Modellierung, Analyse, Auswertung und prüfbarer Dokumentation durch eine handliche Nutzeroberfläche – etwa mit Visual-Basic – gesteuert wird. Eine alternative Möglichkeit, die nichtlineare, wirtschaftliche Ankerbemessung zu nutzen, besteht darin, für häufig vorkommende Kombinationen von Ankerquerschnitt / Auskragung / Last Bemessungsdiagramme zu erstellen oder Näherungsverfahren zu entwickeln. Diese schon teilweise realisierte Zielsetzung wird weiter verfolgt.

Danksagungen

Der Verfasser dankt dem MWWFK-Rheinland-Pfalz für die Mittel zum Kauf der FEM-Software, dem Projektpartner Ingenieurbüro für Befestigungstechnik/Niederzissen, Herren Dipl.-Ing. Kirchesch/Nielsen, u. den Firmen ANKER TEC, Natursteinwerk Villmar und Euro-INOX für die vielfältige Unterstützung.

Literatur

- [1] Euro-INOX Nickel Development Institute: Design Manual for Structural Stainless Steel, 1994
- [2] R. Schardt u. U. Staak, Zum Stabilitätsnachweis für Bauteile aus austenitischen nichtrostenden Stählen, Bauingenieur 1990, S. 153-161
- [3] H. Saal u. G. Steidl, Nichtrostende Stähle im Bauwesen, Stahlbau-Kalender 2001, Ernst & Sohn
- [4] A. Stein, Fassaden aus Natur- und Betonwerkstein, Callwey 2000
- [5] DIN 18516-3 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet 12/99
- [6] Edelstahlzulassung Z-30.3-6 9/98
- [7] EuroCode 3 ENV1993-1-4 Ergänzende Regeln z. Anwendung v. nichtrost. Stahl, Vornorm 5/2002