

Bemessung von Einzelpfahlgründungen für Lärmschutzwände an Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken unter Berücksichtigung dynamisch-zyklischer Beanspruchungen

Dr.-Ing. Lutz Vogt, BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

Bei Lärmschutzwänden entlang der Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken werden infolge der hohen Druck-Sog-Wirkung der vorbeifahrenden Züge sowohl die aufgehende Wand als auch deren Gründung dynamisch und zyklisch beansprucht. Im Los Nord und im Bauabschnitt 1.2 der NBS Nürnberg – Ingolstadt wurden für die dynamischen Berechnungen der Gründung mit vertikalen Einzelpfählen wirklichkeitsnahe Bettungsverteilungen auf der Grundlage von 2- und 3-dimensionale Finite-Elemente-Berechnungen festgelegt, die anhand von Ergebnissen zyklischer Probelastungen im Los Nord kalibriert und mit Messungen an den Lärmschutzwänden während des Fahrbetriebes überprüft wurden. Weiterhin wurden Vorgaben für die quasi-statische Gründungsberechnungen vorgeschlagen, die den zyklischen Charakter der Belastung berücksichtigen. Im Rahmen der Sanierung der Lärmschutzwände an der NBS Köln – Rhein/Main wurde die Bemessung der Gründung geotechnisch begleitet. Es kamen unterschiedliche Gründungsvarianten, teilweise unter Nutzung der Bestandsgründung, zur Ausführung.

1. Einleitung

Lärmschutzwände entlang von Verkehrswegen werden in der Regel mit vertikalen Bohrpfählen gegründet. Die Beanspruchung der Wände setzt sich aus Einwirkungen infolge Windwirkung und infolge Druck-Sog-Wirkung der vorbeifahrenden Fahrzeuge zusammen. Je geringer der Abstand zwischen den Lärmschutzwänden und den vorbeifahrenden Fahrzeugen und je schneller die Fahrgeschwindigkeit, desto größer ist der Anteil der Druck-Sog-Wirkung an der Gesamtbeanspruchung. Daneben spielen noch Größe und Form der Fahrzeuge eine Rolle.

An Bahnstrecken ist der Abstand der Lärmschutzwände vom Gleis oft gering, um die Schallausbreitung möglichst wirkungsvoll abuschirmen. Messungen haben gezeigt, dass bei hohen Geschwindigkeiten die Druck-Sog-Wirkung infolge der vorbeifahrenden Züge die Beanspruchung der Wände infolge Winds deutlich übersteigen kann. Die aufgehende Wandkonstruktion ist dann auf Resonanzerscheinungen zu überprüfen. Wegen der hohen Zugabfolge ist außerdem nachzuweisen, dass die Lärmschutz-

wandkonstruktion die zu erwartenden Lastspiele bis zum Ende der geplanten Lebensdauer schadlos aufnehmen kann.



Bild 1: Lärmschutzwand an der NBS Nürnberg – Ingolstadt

Dynamische Berechnungen sind für die Bemessung von Lärmschutzwänden entlang der Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken Stand der Technik. Hierfür muss die Bodenreaktion in Form von Bettungsmoduln vorgegeben werden. Aus

den dynamischen Berechnungen ergibt sich die maßgebende Beanspruchung, für die nachzuweisen ist, dass die Standsicherheit der Gründung auch am Ende der geplanten Lebensdauer gegeben ist.

Auf der Grundlage von Messungen wurden Lastbilder für die Druck-Sog-Wirkung der vorbeifahrenden Züge entwickelt. Mit dem Lastbild erhält man aus den dynamischen Berechnungen die Eigenfrequenzen der Wand.

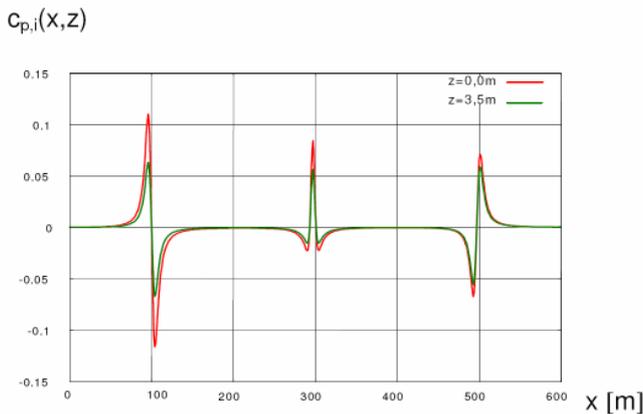


Bild 2: Beispiel für ein analytisches Lastbild (Druckbeiwerte) aus der Ril 804.5501

Je nachdem, ob die maßgebenden Eigenfrequenzen niedriger oder höher als der Resonanzbereich im Antwortspektrum der Lärmschutzwandkonstruktion sind, unterscheidet man *tief* und *hoch* abgestimmte Systeme. Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Lärmschutzwand ist erforderlich, um die maßgebenden Werte aus dem erwarteten Schwankungsbereich der Bettungsmoduln auswählen zu können. Während für *tief* abgestimmte Lärmschutzwandkonstruktionen der *obere Grenzwert* der möglichen Bettungsmoduln maßgebend ist, ist für *hoch* abgestimmte Lärmschutzwandkonstruktionen der *untere Grenzwert* maßgebend.

BAUGRUND DRESDEN war und ist als geotechnischer Berater des Bauherrn an der Entwicklung bzw. Beurteilung der geotechnischen Planungsgrundlagen und an der fachtechnischen Prüfung der Ausführungsplanung für die Lärmschutzwände an der NBS Nürnberg – Ingolstadt und der NBS Köln – Rhein/Main maßgeblich beteiligt.

2. Erarbeitung der geotechnischen Grundlagen für die Bemessung der Lärmschutzwände im Los Nord und im BA 1.2 der NBS Nürnberg – Ingolstadt

Für den Neubau der Lärmschutzwände im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt waren Vorgaben für die Größe, die Verteilung sowie die zeitliche Veränderung der Bettungsmoduln als Grundlage für die dynamische Berechnungen der Lärmschutzwandkonstruktion zu erarbeiten. Zusätzlich musste überprüft werden, ob und unter welchen Voraussetzungen die gebräuchliche quasi-statische Bemessung der Gründungspfähle anwendbar ist. Für die geotechnischen Nachweise der Lärmschutzwandgründung musste zudem ein Sicherheitskonzept entwickelt werden.

Auf der Grundlage von Messungen an Lärmschutzwänden der NBS Köln – Rhein/Main während Zugvorbeifahrten waren die Lastannahmen für die Lärmschutzwände der NBS Nürnberg – Ingolstadt vorgegeben worden. Mit diesem Lastansatz waren dynamische Berechnungen durchzuführen. Die dafür gebräuchlichen Berechnungsprogramme bilden die Bodenreaktion mittels Bettungsfedern und Dämpfungselementen ab. Da jedoch hierzu für die Bedingungen unter Hochgeschwindigkeitsverkehr keine allgemeingültigen Erfahrungen vorlagen, wurde die Größe der Pfahlbettung im Rahmen der Planung so lange variiert, bis das Maximum der Schnittkräfte am Pfahlkopf erhalten wurde. Ausgangspunkt für diese Untersuchungen war ein Vorschlag für die Lärmschutzwände der NBS Köln – Rhein/Main mit einer von Null beginnenden und bis in eine Tiefe von 3 m linear verlaufende Bettungsmodulverteilung, die unterhalb dieser Tiefe konstant bleibt.

Im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt wurden zyklische Pfahlprobelastungen zum Nachweis des erforderlichen Sicherheitsniveaus für die Pfahlbemessung durchgeführt. Somit bot sich die Möglichkeit, die Spannungsverteilung im Boden um den Gründungspfahl sowie die dazu gehörigen Pfahlverformungen wirklichkeitsnah zu berechnen und anhand der Ergebnisse der Pfahlprobelastungen zu kalibrieren.



Bild 3: Pfahlprobelastungen mit zyklischer horizontaler Beanspruchung

Zur Ermittlung der Spannungsverteilung im Boden unter der rechnerischen Gebrauchslast infolge Zugvorbeifahrt wurden von BAUGRUND DRESDEN zuerst Voruntersuchungen an einem 2D-Finite-Elemente-Modell angestellt und darauf aufbauend ein geeignetes 3D-Finite-Elemente-Modell entwickelt. Dieses Berechnungsmodell wurde schließlich anhand der Ergebnisse der zyklischen Pfahlprobelastungen im Los Nord kalibriert.

Da die rechnerischen Untersuchungen für Gebrauchszustände durchgeführt wurden, kam der möglichst wirklichkeitsnahen Abbildung der Randbedingungen der Pfahlprobelastungen eine große Bedeutung zu. Zur Vorbereitung der eigentlichen Pfahlprobelastungen waren ergänzende Untersuchungen zu den Bodenverhältnissen an den beiden Untersuchungsstandorten vorgenommen worden. Die direkte Ermittlung der Scherfestigkeit anhand von ergänzenden Laborversuchen ergab Werte, die teilweise deutlich über den in den statischen Berechnungen zur Standsicherheit der Erdbauwerke angenommenen Werten lagen.

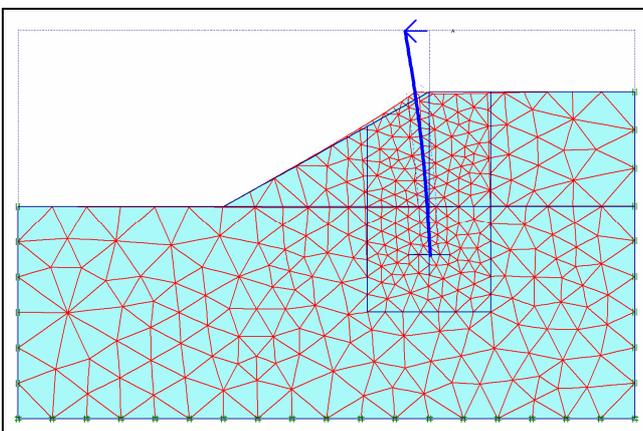


Bild 4: 2D-Modell mit verformtem Netz

Für die zuerst von BAUGRUND DRESDEN durchgeführten rechnerischen Untersuchungen mit einem 2D-FE-Modell wurde das Programmsystem 2D PLAXIS, Version 8.2 verwendet. Es wurden Sensitivitätsanalysen bezüglich der Vernetzungsart, der Interface-Eigenschaften und der Bodeneigenschaften durchgeführt. In den Parameterstudien zeigte sich, dass die Größe der angesetzten Scherfestigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die berechnete Pfahlkopfverschiebung hat. Dieser Einfluss ist besonders stark bei Dammlage ausgeprägt.

Danach wurde der Gründungspfahl mit dem 3D-FE-Programm 3D PLAXIS Tunnel maßgetreu mit Kontinuumselementen mit einem äquivalenten quadratischen Querschnitt modelliert, so dass die Biegesteifigkeit des quadratischen Modellpfahls der Biegesteifigkeit des runden Gründungspfahls entspricht. In der Pfahlachse wurde zusätzlich ein Plattenelement als „Auswertungsdocht“ eingefügt. Dessen Biege- und Längssteifigkeit war der Steifigkeit des quadratischen Modellpfahls äquivalent, jedoch um den Faktor 10^{-6} abgemindert. Dadurch konnten die Schnittgrößen (Biegemomente, Querkräfte) ausgewertet werden, ohne dass die Pfahlsteifigkeit verfälscht wurde (Die Multiplikation der Ergebnisdaten mit dem Faktor 10^6 war erforderlich). Analog der 2D-Berechnungen galt linear elastisches Verhalten für den Pfahlbeton C25/30. Für den Boden wurde das elastisch-plastische Hardening-Soil-Modell verwendet. Zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes wurden die Symmetrieeigenschaften ausgenutzt und somit in Dammlängsrichtung nur der halbe Pfahl modelliert.

Als Kalibriergröße wurde die horizontale Pfahlverschiebung an der Geländeoberfläche gewählt. Die Bodensteifigkeit wurde so lange variiert, bis die berechneten horizontalen Pfahlkopfverschiebungen mit den im Rahmen der Pfahlprobelastungen gemessenen Werten übereinstimmten. Es ist dabei zu beachten, dass die kalibrierten Werte für die Bodensteifigkeit nur für die konkret untersuchten Bodenverhältnisse mit den aufgeführten Scherfestigkeiten und eine Lastfrequenz von 2 Hz gelten.

Im Ergebnis der 3D-FE-Berechnungen wurden der Verlauf der horizontalen Pfahl-Boden-Kontaktspannungen sowie die Pfahlbiegeline ermittelt. Durch abschnittsweise Division der Horizontalspannungen am Pfahl durch die zur jeweiligen Tiefe gehörige Horizontalverschiebung des Pfahls wurde eine rechnerische Bettungsverteilung erhalten. Es ist zu beachten, dass nach dieser Berechnungsmethode der Bettungs-

modul im Bereich des Nulldurchganges der Spannungen und Horizontalverschiebungen unbestimmt ist.

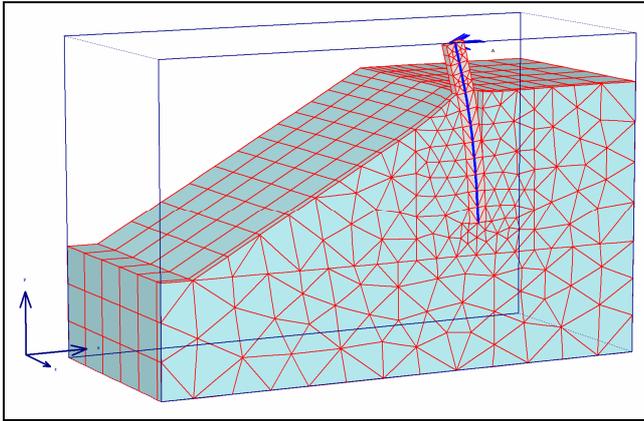


Bild 5: 3D-Modell mit verformtem Netz

Die so erhaltene Bettungsverteilung wurde im Weiteren durch eine einfache geometrische Figur angenähert. Die Ordinaten für den Bettungsmodul wurden dann geringfügig so angepasst, dass eine Berechnung mit dem Baugrubenberechnungsprogramm QWALLS und der gewählten Bettungsmodulverteilung die gleiche Pfahlkopfverschiebung ergab, wie sie in den 3D-FE-Berechnungen ausgewiesen wurden. Im Zuge der Berechnungen zeigte sich, dass ein von Null beginnender linearer Anstieg der Bettungsmoduln bis zur Tiefe von 4 m und darunter ein konstanter Verlauf der Bettungsmoduln die Ergebnisse der 3D-FE-Berechnung am besten widerspiegeln.

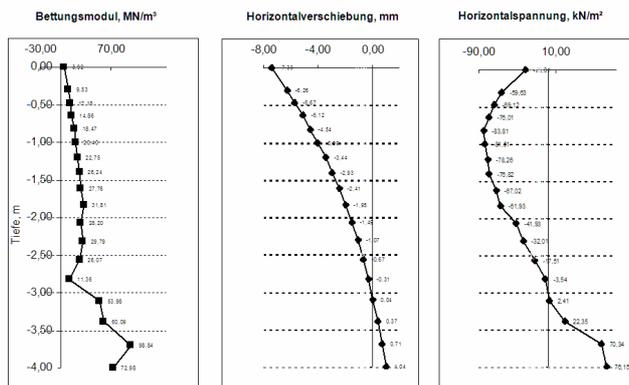


Bild 6: Beispiel für die Ermittlung der Bettungsmodulverteilung aus der 3D-FE-Berechnung

Nachdem die Plausibilität dieser Annahme für ausgewählte Berechnungsvarianten, die das gesamte untersuchte Spektrum der Pfahllängen und Horizontalkräfte H_{zykl} berücksichtigten, belegt werden konnte, wurde dieser qualitative Bettungsmodulverlauf im Weiteren vorausgesetzt und der Berechnungslauf für die restlichen Be-

rechnungsvarianten vereinfacht. Es wurde nur noch die Bettungsmodulwerte für Tiefen ≥ 4 m in der Berechnung mit dem Baugrubenberechnungsprogramm QWALLS so angepasst, dass die berechnete Kopfverschiebung mit dem Ergebnis der 3D-FE-Berechnung übereinstimmte.

Es ist festzustellen, dass die erhaltenen Bettungsmodulverteilungen lastabhängig sind, wobei die Lastabhängigkeit vor allem im Dammbereich stark ausgebildet ist. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das horizontale Verformungsverhalten von der Ausnutzung der Scherfestigkeit abhängig ist.

Die Berechnungsergebnisse haben weiterhin gezeigt, dass sich die Gründungspfähle unterhalb einer Tiefe von ca. 6 m nicht mehr wie kurze starre Pfähle verhalten. Der untere Teil der langen Pfähle ist nur noch untergeordnet an der Lastabtragung beteiligt. Die Verformungsbegrenzung für den Pfahlkopf, die eine wichtige Voraussetzung für ein dauerhaftes Bauwerk ist, kann bei gleicher Grenzlast mit kurzen starren Pfählen besser als mit langen schlanken Pfählen erreicht werden.

Mit den Ergebnissen der Pfahlprobebelastungen für Lärmschutzwände im Los Nord der Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt, die vom Ingenieurbüro Prof. Kempfert und Partner durchgeführt und ausgewertet worden waren, wurde das Nachweiskonzept für die Gründung der Lärmschutzwände überprüft. In Anlehnung an die gebräuchliche Nachweisführung erfolgte die Bemessung der Gründungspfähle für eine quasi-statische Belastung. Dabei wurden kurze starre Pfähle betrachtet, deren Tragfähigkeit mit einem Erddruckansatz nachgewiesen wurde. Eine wesentliche Verschlechterung des seitlichen Erdauf-lagers infolge der zyklischen Belastung sollte durch eine Begrenzung der Pfahlverformungen, die weitgehend elastisches Bodenverhalten sichern soll, verhindert werden. Die Begrenzung der Pfahlverformungen infolge der zyklischen Belastung wurde durch einen gegenüber dem Globalsicherheitsbeiwert bei statischer Belastung erhöhten Globalsicherheitsbeiwert, mit dem die zyklischen Beanspruchungen beaufschlagt wurden, erreicht. Der Sicherheitsbeiwert für zyklischen Einwirkungen (Druck-Sog-Wirkung infolge Zugvorbeifahrt) betrug $\eta_{\text{zykl}} = 4,0$, der Sicherheitsbeiwert für die quasistatischen Einwirkungen (Wind) betrug $\eta_{\text{stat}} = 2,0$.

Die im Rahmen der Pfahlprobebelastungen gemessenen Pfahlkopfverformungen ergaben bei halblogarithmischer Darstellung annähernd eine Gerade. In dieser Darstellung ist eine geradlinige

Extrapolation bis auf 10^6 Lastwechsel möglich. Es zeigte sich, dass die so prognostizierten maximalen Pfahlkopfverdrehungen bis ca. $0,15^\circ$ betragen. Dieser Wert ist sehr klein im Vergleich zu den Pfahlkopfverdrehungen von 1° bzw. 2° , die bei der Ermittlung der statischen Grenzlast von Vertikalpfählen gewöhnlich zugrunde gelegt werden. Pfahlkopfverschiebungen dieser Größe sind unschädlich. Die zusätzlich durchgeführten zyklischen Triaxialversuche mit 10^6 Lastwechseln sind ein weiteres Indiz dafür, dass die extrapolierten Pfahlkopfverformungen auf der sicheren Seite liegen. Dazu kommt, dass die tatsächliche Belastung der Lärmschutzwände bei Zugvorbeifahrt wesentlich stoßartiger als in den Versuchen eingetragen wird. Erfahrungsgemäß sind dadurch ein steiferes Verhalten des Bodens und geringere Verformungen als die im Rahmen der Pfahlprobebelastungen gemessenen Verformungen zu erwarten.

Zur Einschätzung des Sicherheitsniveaus der im Los Nord bereits hergestellten Lärmschutzwandgründungen waren die rechnerischen Grenzlasten, die mit den Bemessungswerten für die Scherparameter berechnet worden waren, den in den Versuchen eingetragenen Laststufen gegenüber gestellt worden. Es konnte gezeigt werden, dass mit den Lasten, die den mit einem Sicherheitsbeiwert $\eta_{\text{zykl}} = 4,0$ belegten Bruchlasten gemäß Nachweisführung mit Erddruckansatz entsprechen, im Versuch nur sehr kleine Pfahlkopfverdrehungen und Pfahlkopfverschiebungen erhalten wurden. Damit wurde bestätigt, dass die für die Lärmschutzwandgründungen im Los Nord vorab festgelegten Bemessungsansätze für das äußere Tragverhalten in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ausreichend sicher sind.

Für die bereits fertig gestellten Lärmschutzwände im BA 1.2 der NBS Nürnberg – Ingolstadt war nachzuweisen, dass die Gründung ausreichend dimensioniert war. Zusätzlich sollten Bettungsmoduln als Eingangswert für die dynamischen Berechnungen vorgegeben bzw. überprüft werden. Da die Bodenverhältnisse im BA 1.2 mit den im Los Nord untersuchten Bodenverhältnissen weitgehend übereinstimmten, wurden die Berechnungsmodelle des Loses Nord übernommen.

Die Größe und die Verteilung der Bettungsmoduln wurden für das vom Planer abgeschätzte Lastniveau angegeben. Mit den dann vom Planer aus den dynamischen Berechnungen erhaltenen Schnittgrößen am Pfahlkopf wurden die rechnerisch erforderlichen Pfahllängen ermittelt und den

vorhandenen gegenüber gestellt. Dazu musste der Globalsicherheitsbeiwert für zyklische Lasten festgelegt werden.

Die Extrapolation der Pfahlkopfverschiebungen für die vorgegebene Lebensdauer von 50 Jahren aus den Ergebnissen der zyklischen Pfahlprobebelastungen im Los Nord hat gezeigt, dass eine Erhöhung der Kurzzeitverformungen nicht ausgeschlossen werden kann. Deswegen sollte eine Begrenzung der Pfahlverformungen gegenüber dem statischen Bemessungsfall zur Sicherung eines weitgehend elastischen Bodenverhaltens vorgenommen werden. Von BAUGRUND DRESDEN wurde vorgeschlagen, den Globalsicherheitsbeiwert für zyklische Lasten mit $\eta_{\text{zykl}} = 3,0$ anzusetzen. Mit diesem Vorschlag, der mit den Prüfinstanzen abgestimmt wurde, konnte gezeigt werden, dass die rechnerisch erforderlichen Pfahllängen im Bereich der EÜ Weissensesterasse gleich bzw. geringfügig kleiner waren als die vorhandenen Pfahllängen und damit die äußere Tragfähigkeit gegeben war.

Da jedoch die Ermüdungsnachweise für die Bewehrung am Pfahlkopf eine rechnerische Unterschreitung der angestrebten Lebensdauer ergaben, wurden die Gründungen teilweise ertüchtigt.



Bild 7: Ertüchtigte Gründung für die Lärmschutzwände im BA 1.2 der NBS Nürnberg – Ingolstadt

An den fertig gestellten Lärmschutzwänden im BA 1.2 sowie im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt wurden nach der Inbetriebnahme der Strecke Messungen durchgeführt. Bei Zugvorbeifahrten wurde unter anderem auch die Pfahlkopfauslenkung gemessen. Es zeigte sich, dass an den Lärmschutzwänden mit vertikalen Einzelpfahlgründungen Pfahlkopfauslenkungen im Bereich der Messgenauigkeit ($0,2 \text{ mm}$) auftraten. Damit

wurde messtechnisch belegt, dass die geotechnischen Annahmen und Vorgaben für die Bemessung der Lärmschutzwandgründung im BA 1.2 sowie im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt auf der sicheren Seite gewählt worden waren.

Die Tatsache, dass die Messwerte für die Pfahlkopfauslenkungen bei Zugvorbeifahrten deutlich kleiner als die Messwerte aus den zyklischen Pfahlprobelastungen sind, erklärt sich durch die unterschiedliche Form der Belastung. Bei Zugvorbeifahrt werden die Belastungen wesentlich schneller aufgebracht und die Einwirkungsdauer je Lastzyklus ist auch deutlich kürzer. Dadurch verhält sich der den Pfahl umgebende Boden bei Zugvorbeifahrt steifer als in den zyklischen Pfahlprobelastungen. Für die dynamischen Berechnungen müssen deshalb dynamische Bettungsmoduln angenommen werden.

3. Geotechnische Beratung bei der Sanierung der Schutzwände an der NBS Köln – Rhein/Main

Für die Sanierung der Schutzwände an der NBS Köln – Rhein/Main wurden von BAUGRUND DRESDEN ebenso Vorgaben für den Ansatz der Bettungsmoduln als Eingangswert für die dynamischen Berechnungen gegeben. Aufbauend auf den Erkenntnissen an der NBS Nürnberg – Ingolstadt und den Ergebnissen von Parameterstudien der Planer wurden ein linearer Anstieg des dynamischen Bettungsmoduls bis zur Tiefe von 3 m und darunter ein konstanter Verlauf verwendet. Die Größe des dynamischen Bettungsmoduls wurde aus dem Quotienten aus dem dynamischen Steifemodul des Bodens und dem Pfahldurchmesser bestimmt. In Ermangelung einer direkten Bestimmung wurde der dynamische Steifemodul des Bodens mit Erhöhungsfaktoren von 2 bis 10, die auf der Basis von Erfahrungswerten festgelegt wurden, aus dem statischen Steifemodul ermittelt. Bei der Auswahl der maßgebenden Werte aus dem Schwankungsbereich der Bettungsmoduln wurde auf der sicheren Seite liegend für tief abgestimmte Lärmschutzwandkonstruktionen der obere Grenzwert der möglichen Bettungsmoduln und für hoch abgestimmte Lärmschutzwandkonstruktionen der untere Grenzwert angesetzt.

Es wurden unterschiedliche Varianten zur Sanierung der Gründung der Schutzwände untersucht. Sowohl Varianten unter Nutzung der bestehenden Gründung als auch Neubauvarianten wurden vorgeschlagen. Eine wichtige Randbe-

dingung dabei ist, dass der Betrieb der NBS Köln – Rhein/Main nicht beeinträchtigt werden darf. Außer der Festlegung der dynamischen Bettungsmoduln waren noch folgende geotechnische Aufgabenstellungen zu bearbeiten:

- Beurteilung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Bahnanlagen bei der Herstellung von Baubehelfen für die Herstellung bzw. Sanierung der Schutzwände (z. B. Anschüttungen an die NBS-Dämme)
- Gründungsberechnungen für flach gegründete Schutzwände und Beurteilung der Randbedingungen
- Ermittlung von Bodenkennwerten anhand von Altunterlagen unter Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse zur Steifigkeit der bindemittelverbesserten Dämme
- Beeinflussung der neuen Pfahlgründung durch die vorhandene Pfahlgründung der abzubrechenden Schutzwand
- Begleitung und Bewertung einer zyklischen Pfahlprobelastung für axial belastete Kleinbohrpfähle
- Geotechnische Stellungnahme zum Antrag auf unternehmensinterne Genehmigung der DB AG und Prüfung der geotechnischen Berechnungsgrundlagen im Rahmen der Ausführungsplanung für Schutzwände mit vertikaler Einzelpfahlgründung im Raster von 7,5 m.

Die Schallschutzwände „Staffel“ und „Elz“ (K 32) sollten ursprünglich durch einen Neubau mit Gründung auf vertikalen Einzelpfählen ersetzt werden. Die betroffenen Schallschutzwände befinden sich in Dammlage. Es war zu klären, ob und wie eine Beeinflussung der neu herzustellen Bohrpfähle durch die vorhandene Pfahlgründung zu beachten ist. Eine solche Beeinflussung kann einerseits durch eine Behinderung bei der Herstellung (Anbohren) und andererseits durch eine Veränderung der seitlichen Bettungseigenschaften der neuen Pfähle eintreten. Aus der Analogie zur Gruppenwirkung seitlich beanspruchter Pfähle nach DIN 1054 (2005), Anhang E wurden Mindestabstände vorgegeben. Diese Mindestabstände, die bei der Planung eingehalten wurden, waren ausreichend, so dass keine gesonderten Untersuchungen erforderlich wurden.

Nach einem Sondervorschlag der ausführenden Firma wurden die Schallschutzwände „Staffel“ und „Elz“ (K 32) dann als Gabionenwand mit Betonkern unter Nutzung der vorhandenen Pfahlgründung hergestellt. Die Bohrpfähle der zuvor abgebrochenen bestehenden Schallschutzwände wurden durch daneben angeordnete vertikale

Kleinbohrpfähle mit einem Durchmesser von 300 mm ergänzt und mit diesen durch ein Betonjoch verbunden. Die Kleinbohrpfähle sollten im Wesentlichen axial beansprucht werden. Horizontallasten wurden den Bestandspfählen zugeordnet. Für hohe Wandabschnitte waren zusätzlich noch schräge Kleinbohrpfähle für die Ableitung der Horizontallasten vorgesehen.

Für die Bemessung der Gründung wurde im Rahmen der Planung für die dynamischen Berechnungen der plausible Ansatz gewählt, das bindemittelverbesserte Dammmaterial mit dem aus den dynamischen Schubmoduln abgeleiteten dynamischen E-Moduln zu modellieren. Dazu waren an vergleichbarem Material die dynamischen Schubmoduln aus RC-Versuchen ermittelt worden.

Die Kleinbohrpfähle wurden durch Federn modelliert, deren Steifigkeit aus dem Quotient aus der Normalkraft und der Pfahlaxialverschiebung ermittelt werden wurde. Die bei der Ermittlung der Federsteifigkeit verwendeten Verformungen wurden durch eine zyklische axiale Pfahlprobebelastung überprüft. Zudem war in den Fällen, in denen die Kleinbohrpfähle die Kräfte im Wesentlichen über Mantelreibung in das Dammmaterial einleiten (z. B. in flachen Dammbereichen bei denen die Pfahlunterfläche in die quartären Lehme hineinreicht, und bei Zugbeanspruchung) zu überprüfen, ob infolge der hohen Lastwechselanzahl mit relevanten Veränderungen an der Grenzfläche zwischen dem Pfahlbeton und dem zu erwartenden glatten Bohrloch zu rechnen ist.



Bild 8: Zyklische axiale Pfahlprobebelastung (Quelle: ARCADIS)

Die Ergebnisse der Pfahlprobebelastung zeigten sehr geringe Verformungen und Kriechmaße unter Gebrauchslast. Selbst bei der 3,5-fachen Gebrauchslast versagte der Probepfahl nicht unter der Druckbeanspruchung. Bis zu einer Zyklen-

zahl von $N = 2000$ waren praktisch keine Veränderungen der Verschiebungen zu erkennen. Die Versuchsergebnisse belegten ein sehr steifes Verhalten der Pfähle unter der erwarteten Belastung. Es ist deshalb für die vorgesehene Belastung keine wesentliche Verschlechterung der Auflagerbedingungen im Boden während der geplanten Nutzungsdauer zu erwarten.

In den meisten Bereichen der NBS Köln – Rhein/Main werden die Schutzwände durch einen kompletten Neubau ersetzt. Dabei kommt auf Erdbauwerken das System Züblin mit Stahlposten und Betonausfachung zur Anwendung. Diese Schutzwände werden mit vertikalen Einzelpfählen $\varnothing 78$ cm tief gegründet. Das Besondere daran ist der Achsabstand von 7,5 m, der von der Regelkonstruktion mit einem Achsabstand von 5 m abweicht. Aus diesem Grund wurde eine unternehmensinterne Genehmigung der DB AG erforderlich.



Bild 9: Lärmschutzwand System Züblin mit Pfahlabstand von 7,5 m (Quelle: Züblin)

Die für die Bemessung der Gründung maßgebenden Schnittkräfte werden ebenfalls durch dynamische Berechnungen ermittelt. Dafür wurden dynamischen Bettungsmoduln aus Erfahrungswerten für die dynamischen Steifemoduln des Bodens ermittelt und ein linearer Anstieg des dynamischen Bettungsmoduls bis zur Tiefe von 3 m mit darunter konstantem Verlauf vorgegeben. Für Ermittlung der erforderlichen Pfahllängen gilt der Erddruckansatz für kurze starre Pfähle. Da keine zyklischen Pfahlprobebelastungen durchgeführt wurden, sind die zyklischen Einwirkungen (Druck-Sog-Wirkung infolge Zugvorbeifahrt) mit dem Sicherheitsbeiwert $\eta_{\text{zykl}} = 4,0$ und die quasistatischen Einwirkungen (Wind) mit dem Sicherheitsbeiwert $\eta_{\text{stat}} = 2,0$ beaufschlagt worden.

Interessant ist, dass durch den vergrößerten Achsabstand von 7,5 m der Anteil der Windlast an der Gesamtbeanspruchung steigt. Damit sinkt aber auch der Anteil der zyklischen Belastung und somit die Gefahr einer relevanten Verschlechterung des seitlichen Erdaufagers im Laufe der Lebensdauer.

Quellennachweis

1. FGSV-Merkblatt: *Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen für Bohrpfahlgründungen und Stahlpfosten von Lärmschutzwänden an Straßen*; Ausgabe 1997
2. P. Schwarz: *Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter zyklischer Belastung*; Heft 33 der Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München 2002
3. DB Systemtechnik: *Prüfbericht: Messung der Drucklasten und der Auslenkungen an Schallschutzwänden der NBS Köln-Rhein/Main bei Zugvorbeifahrt*; unveröffentlicht, 2003
4. DB Systemtechnik: *Prüfbericht – Messung der aerodynamischen Lasten und Reaktionen an Schallschutzwänden der Neubaustrecken Nürnberg - Ingolstadt*; unveröffentlicht, 2006.
5. Raithel, M.; Leusink, E.; Kempfert, H.-G: *Zyklische und statische horizontale Pfahlprobebelastungen für Lärmschutzwände der Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt*; Proc. Band 2, XIII. Donau-Europäische Konferenz für Geotechnik 2006
6. DB Netz AG: *Ril 804.0505 Lärmschutzwände*; 2007