

# Zyklische und statische horizontale Pfahlprobelastungen für Lärmschutzwände der Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt

Dr.-Ing. M. Raithel, Dipl.-Ing. E. Leusink  
*Kempfert + Partner Geotechnik, Würzburg, Deutschland*

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert  
*Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel, Deutschland*

## ABSTRACT

Die Lärmschutzwände im Los Nord der NBS Nürnberg-Ingolstadt werden auf Bohrpfählen mit einem Durchmesser von  $D = 60$  cm gegründet. Die Schutzwände und somit die Gründungspfähle werden durch Wind und bei Zugvorbeifahrten durch eine Druck-Sog-Welle horizontal belastet.

Im Beitrag werden nach der Darstellung der Belastungsrandbedingungen die Konzeption und Durchführung von zyklischen und statischen horizontalen Pfahlprobelastungen erläutert und wesentliche Messergebnisse dargestellt. Durch einen Vergleich der aufgetretenen Verformungen bei verschiedenen Ausnutzungsgraden (Verhältnis der jeweils aufgetragenen zyklischen Belastung zur rechnerischen Bruchlast) werden die auf Grundlage der Pfahlprobelastungsergebnisse extrapolierten Verformungen bei unterschiedlichen Sicherheitsniveaus erläutert.

*Keywords:* Hochgeschwindigkeitsverkehr, Schutzwände, zyklische Belastungen

## 1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Lärm- und Windschutzwände an Verkehrswegen werden in der Regel auf kurzen, in den Baugrund eingespannten Pfählen gegründet, die aufgrund der geringen Schlankheit (Verhältnis der Einbindelänge zum Pfahldurchmesser) bei Belastung nur vernachlässigbare Eigenverformungen aufweisen und somit als nahezu „starr“ bezeichnet werden können, vgl. Kempfert (1985) und (1987). Daneben hat sich das Bemessungsverfahren nach Vogt etabliert, welches auch in FGSV (1997) enthalten ist.

Neben der näherungsweise gleichmäßig über die Wandfläche wirkenden und vorwiegend ruhend anzusetzenden Windbelastung ist bei Schutzwänden an schienengebundenen Hochgeschwindigkeitsstrecken als maßgebende Belastung die Druck-/Sogwelle bei Zugvorbeifahrt zu berücksichtigen. Hinsichtlich der für die Bemessung maßgebenden Belastung wird im zur Zeit gültigen Regelwerk der Deutschen Bahn AG (DS 804 bzw. Richtlinie 800.2001 und DIN Fachbericht 101) eine statische Ersatzlast vorgegeben.

Aufgrund von aufgetretenen Schadensfällen wurden in jüngerer Zeit Messungen an ausgeführ-

ten Schutzwänden durchgeführt, auf deren Grundlage gefolgert werden musste, dass die o.g. Angaben für die hohen Zuggeschwindigkeiten der Neubaustrecken ( $v_e = 300$  km/h) nicht für eine realitätsnahe und sichere Bemessung der Schutzwände ausreichen.

Daher wurden von Seiten der DB AG neue Bemessungsgrundlagen für die Schutzwände der NBS Nürnberg - Ingolstadt vorgegeben, verbunden mit der Anforderung, auch eine sichere Gründung unter Berücksichtigung der auftretenden zyklisch/dynamischen Druck-/Sogbelastung zu erstellen.

Da kein allgemein anerkanntes Bemessungsverfahren bzw. Sicherheitskonzept zur rechnerischen Dimensionierung der derartig beanspruchten Gründungspfähle vorliegt, wurde für die Bemessung der Schutzwände der NBS Nürnberg-Ingolstadt ein Nachweisverfahren konzipiert, welches zunächst eine Bemessung mit den vorliegenden Berechnungsverfahren unter Zugrundelegung der statischen Grenzlaster und eines „auf der sicheren Seite liegenden“ globalen Sicherheitsbeiwertes von  $\eta = 4$  auf die zu erwartenden zyklisch/dynamischen Belastungen sowie insbesondere eine Überprüfung der gewählten Ansätze durch zyklische, horizontale Pfahlprobelastungen vorsah.

## 2 ZYKLISCHE PFAHLPROBEBELASTUNGEN

### 2.1 Allgemeines

Insgesamt wurden an 5 Probepfählen mit einem Durchmesser von  $D = 65$  cm und einer Einbindetiefe zwischen ca. 3,0 und ca. 6,0 m unter GOK Probepbelastungen in Dammlage (Standort D) und in Geländegleichlage (Standort G) durchgeführt.

Die horizontalen Druck- und Zuglasten wurden mit einer hydraulischen Druck-/Zug-Presse kraftgesteuert in die Probepfähle eingeleitet. Als Belastungswiderlager für die Pressenlasten wurde ein Container mit einem Gesamtgewicht von ca. 85 t verwendet. Der lichte Abstand zwischen den Probepfählen und dem Container betrug insgesamt mindestens ca. 4 m. Ein Überblick über die Versuchseinrichtung ist in Bild 1 und die Lasteinleitung in den Pfahl ist in Bild 2 dargestellt.



Bild 1: Überblick über die Pfahlprobepbelastung



Bild 2: Stahlkonstruktion und Lasteinleitung in den Pfahl

### 2.2 Belastung

Zunächst wurden für die folgenden möglichen Wandsysteme und für alle auftretenden Wandhöhen ( $h = 1,5, 2,5$  und  $3,0$  m) dynamische Berechnungen der aufgehenden Konstruktion vorgenommen um so die in situ zu erwartenden Belastungen zu definieren.

Im Hinblick auf die Beeinflussung des Trag- und Verformungsverhaltens der Gründungspfähle unter wiederholten horizontalen zyklischen Lasten wurden zunächst Wechselbelastungen zur Simulation der Druck-Sog-Wellen infolge Zugverkehr aufgebracht, wobei die Amplitude der Druck- und Zuglast in 3 Stufen (Mehrstufigentechnik) auf ca. 150 - 200% der maximal zu erwartenden Lastamplitude infolge Zugverkehr gesteigert wurde. Die Lastwechselanzahl wurde je Belastungssequenz zwischen ca.  $N = 1.000$  bis  $N = 10.000$  Lastwechseln bei einer Frequenz von i.d.R. ca. 1 Hz gewählt. Nach Durchführung der Wechselbelastungen wurde anschließend an allen Pfählen eine statische horizontale Probepbelastung zur Ermittlung der statischen horizontalen Bruchlast durchgeführt.

**Tabelle 1.** Übersicht über die Probepfähle und die durchgeführten Belastungssequenzen

Pfahl	Einbindetiefe [m unter GOK]	Lasteinleitung [m über GOK]	Belastungssequenzen		
			$\Delta H$ 1. Stufe [kN]	$\Delta H$ 2. Stufe [kN]	$\Delta H$ 3. Stufe [kN]
D1	ca. 4,0	ca. 1,5	+/- 10	+/- 20	+/- 40
D2	ca. 5,0	ca. 2,5	+/- 20	+/- 40	+/- 60
D3	ca. 6,0	ca. 2,5	+/- 20	+/- 40	+/- 60
G1	ca. 3,0	ca. 1,8	+/- 10	+/- 20	+/- 40
G2	ca. 4,0	ca. 2,5	+/- 20	+/- 40	+/- 60

### 2.3 Baugrund

Im Bereich des gewählten Standorts D (Damm) binden die Pfähle in den geschütteten Dammkörper ein. Nach den Kornverteilungen und der visuellen Ansprache handelt es sich beim Dammschüttmaterial um einen schwach kiesigen, schluffigen/tonigen bis stark schluffigen/tonigen Sand. Nach den Ergebnissen der schweren Rammsondierungen ist der Sand bzw. das Dammschüttmaterial i.d.R. dicht bis sehr dicht gelagert. Hinsichtlich der Scherparameter konnte unter Wertung aller vorliegenden Versuchsergebnisse von in situ tatsächlich vorliegenden Scherparamete-

tern von  $\phi' = 42,5^\circ$  und  $c' = 5 \text{ kN/m}^2$  ausgegangen werden.

Am Standort G (Geländegleichlage) binden beide Probepfähle vollständig in quartäre bindige Böden ein. Dabei handelt es sich vorwiegend um leichtplastisch und mittelplastische quartäre Schluffe und Tone mit wechselnden Beimengungen von Feinsand und vereinzelt auch Kies. Lokal sind dünne schluffige Feinsandlagen eingelagert. Nach den Laborversuchen und der Ansprache des Bohrgutes weisen die Schluffe und Tone i.d.R. eine weiche bis steife Konsistenz auf, im Tiefenbereich der lokal eingelagerten organischen Beimengungen auch eine breiige bis weiche Konsistenz. Im Hinblick auf die Scherparameter wurde unter Wertung aller vorliegenden Versuchsergebnisse von  $\phi' = 25^\circ$  und  $c' = 5 \text{ kN/m}^2$  ausgegangen. Das Grundwasser liegt in den quartären bindigen Böden (qt) vorwiegend in Form eines geringen bis sehr geringen Schichtenwasserstroms in Tiefen von rd. 3 bis 5 m unter GOK vor.

#### 2.4 Ergebnisse bei zyklischer Belastung

Bei allen Pfählen und in allen Laststufen war i.d.R. eine gleichmäßige Steigerung der Pfahlkopfverschiebung in Druckrichtung mit zunehmender Versuchsdauer bzw. Lastwechselanzahl zu ersehen. Eine schlagartige starke Zunahme der Pfahlkopfverschiebungen wurde nicht beobachtet. Allerdings konnten deutliche zyklische Bewegungswellen in den Böschungen und Hohllagen bzw. Rissbildungen im Bereich der Einspannstelle verbunden mit einem Materialtransport augenscheinlich festgestellt werden, vgl. Bild 3.



Bild 3: Rissbildungen nach zyklischer Belastung

Im Rahmen einer umfassenden Auswertung der Messergebnisse wurden zunächst die gemessenen Verschiebungen sowie Verdrehungen in Druck- und Zugrichtung sowie die Gesamtauslenkungen

der Pfahlköpfe (Summe der Verschiebungen in Druck- und Zugrichtung) ausgewertet. In Bild 4 ist exemplarisch die Auswertung am Beispiel des Probepfahles D2 dargestellt.

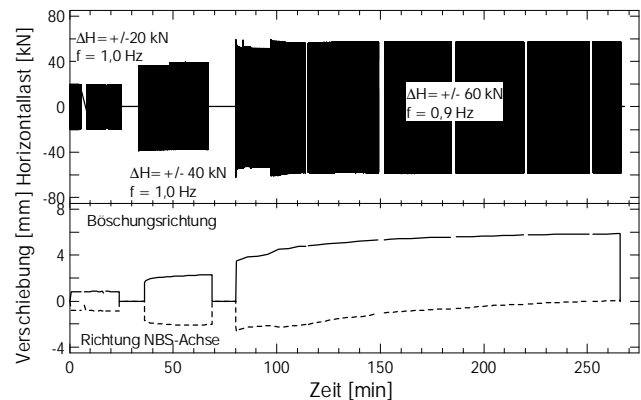


Bild 4: Gemessene Pfahlkopfverschiebung bei zykl. Belastung, exemplarisch für Pfahl D2

Tabelle 2 enthält die gemessenen Pfahlkopfverformungen nach 1000 Lastwechseln.

Tabelle 2. Gemessene Verschiebung nach 1000 Lastwechseln

Probepfahl	Pfahlkopfverschiebung in Druckrichtung [mm]/ Zugrichtung [mm]			
	$\Delta H = \pm 10 \text{ kN}$	$\Delta H = \pm 20 \text{ kN}$	$\Delta H = \pm 40 \text{ kN}$	$\Delta H = \pm 60 \text{ kN}$
D1	0,43 -0,08	0,86 -0,44	1,84 -1,58	-
D2	-	0,86 -0,84	2,17 -2,08	4,04 -2,08
D3	-	0,72 -0,68	1,80 -1,40	2,60 -1,68
G1	0,24 -0,19	0,65 -0,53	3,76 -2,62	-
G2	-	0,74 -0,48	2,41 -1,80	5,81 -3,40

Die Auswertungen zeigen grundsätzlich, dass die Pfahlkopfverschiebungen am Standort D in Böschungs- bzw. Druckrichtung, wie erwartet, i.d.R. größer als in Richtung der NBS-Achse bzw. Zugrichtung sind.

Bei halblogarithmischer Auftragung der Pfahlkopfverschiebungen inkl. der Gesamtauslenkung und Pfahlkopfverdrehungen ergibt sich i.d.R. näherungsweise eine Gerade, die eine Extrapolation der Messwerte für höhere Lastwechselanzahlen ermöglicht.

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Extrapolation ist exemplarisch in Bild 5 für den Probepfahl D1 dargestellt.

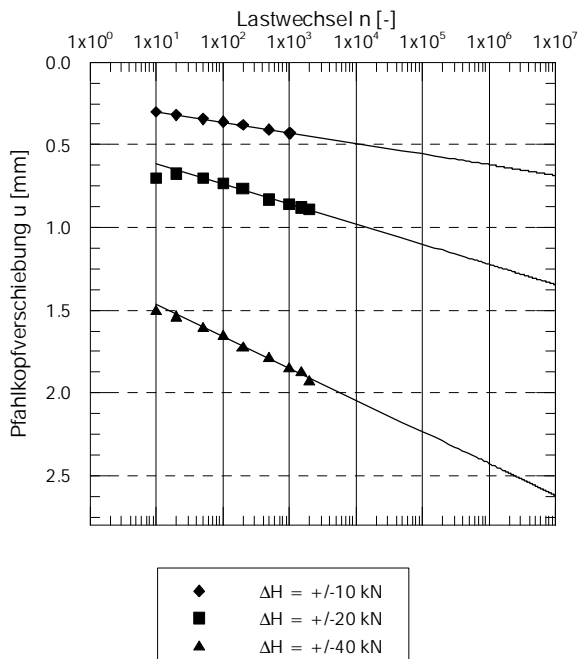


Bild 5: Extrapolierte Pfahlkopfverschiebung bei zykl. Belastung, exemplarisch für Pfahl D1

Es ist allerdings festzustellen, dass bei mehreren Belastungssequenzen die Messwerte nicht eindeutig extrapoliert werden konnten, da die erforderliche Konstanz der Lastwechselamplitude oder der Pfahlkopfverschiebungen zum Schluss der Laststufe nicht gegeben war. Grundsätzlich wurde versucht eine Extrapolation der Verformungen auf 10.000.000 Lastwechsel vorzunehmen, vgl. Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Extrapolierte Verschiebung und Verdrehungen nach 10 Mio. Lastwechseln (in Druckrichtung)

Probepfahl	Extrapolierte Pfahlkopfverschiebung und Extrapolierte Pfahlkopfverdrehung			
	+/-10 kN	+/-20 kN	+/-40 kN	+/-60 kN
D1	0,7 mm / 0,02°	1,4 mm / 0,045°	2,6 mm / 0,15°	-
D2	-	0,9 mm / 1)	3,4 mm / 0,093°	9,4 / 0,24°
D3	-	0,9 mm / 0,055°	2,3 mm / 0,115°	1)
G1	1)	0,8 mm / 1)	9,1 mm / 0,228°	1)
G2	-	1,2 mm / 0,09°	4,8 mm / 0,18°	7,9 mm / 1)

1) Extrapolation nicht möglich

Es ist zu erkennen, dass bei weiterer Steigerung der Wechselbelastung auf ca. 150 bzw. 200% von  $\Delta H_{\text{Zugverkehr}}$  (auf +/-40 kN bzw. auf +/-60 kN) ge-

nerell eine überproportionale Verschiebungszunahme auftrat.

Bei den höheren Wechselbelastungen wurden im Vergleich zum Standort D am Standort G erheblich größere Pfahlkopfverschiebungen bei gleicher Lastwechselanzahl festgestellt, was mit der starken Annäherung an den statischen Grenzzustand bzw. Auslastung der Tragfähigkeit am Standort G begründet werden kann. Des Weiteren kann somit bestätigt werden, dass bei geringeren Scherfestigkeiten im Untergrund deutlich größere Verformungen bei ansonsten gleichen Randbedingungen hervorgerufen werden.

### 2.5 Ergebnisse bei statischer Belastung

Im Anschluss an die zyklischen Belastungen wurde das Lastniveau in statischen Laststufen bis zum Erreichen der horizontalen Bruchlast bzw. bis zur maximalen Presskraft erhöht. Bild 6 enthält exemplarisch die gemessene Verdrehung und die Definition der Grenzlast für den Pfahl G1.

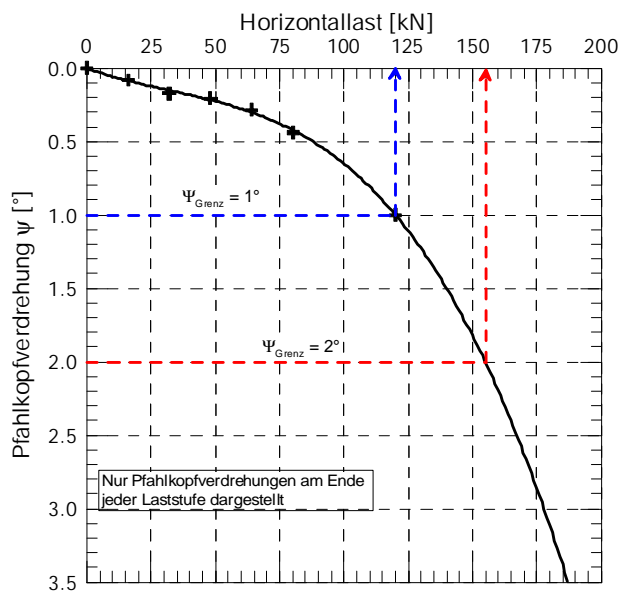


Bild 6: Auswertung der statischen Pfahlprobebelastung und Definition der Grenzlast, exemplarisch für Pfahl G1

Im Hinblick auf die Festlegung der horizontalen Grenzlast ist zu beachten, dass diese nicht eindeutig definiert ist. In *Kempfert (1985)* wird die (fiktive) Grenzlast für eine Belastung in einer Richtung bei einer Pfahlkopfverdrehung von  $\psi = 2^\circ$  (ca.  $\tan \psi = 0,035$ ) festgelegt.

Da im vorliegenden Fall Wechselbelastungen auftreten, wurde näherungsweise auch eine Grenzlast bei einer Pfahlkopfverdrehung von  $\psi = 1^\circ$  (ca.  $\tan \psi = 0,0175$ ) dargestellt.

In Bild 7 sind zudem die theoretischen nach Vogt (1988) ermittelten Grenzlasten dargestellt, die sich unter Ansatz der in situ zu folgernden Scherparameter ergeben (vgl. Abschnitt 2.3).

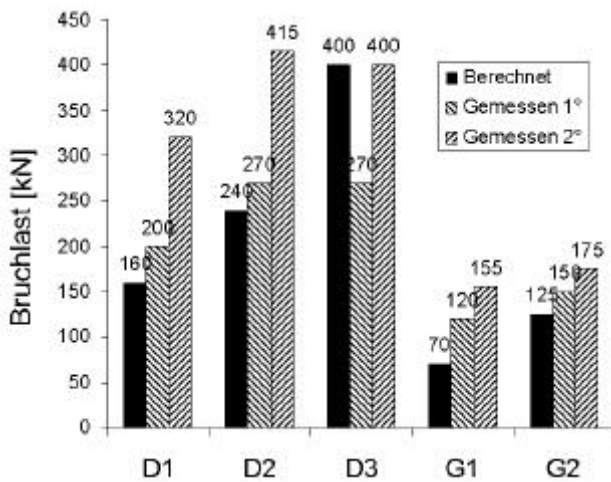


Bild 7: Zusammenstellung der horizontalen statischen Grenzlasten der Probepfähle

Es zeigt sich, dass die rechnerisch unter Annahme von wahrscheinlich in situ vorliegenden Scherparametern ermittelten Grenzlasten i.d.R. näherungsweise mit den fiktiven Grenzlasten bei einer gemessenen Pfahlkopfverdrehung von ca.  $\psi = 1^\circ$  übereinstimmen bzw. diese unterschätzt werden. Eine Ausnahme stellt hierbei der Pfahl D3 dar. Da der Pfahl D3 die größte Einbindetiefe aufweist, ist zu folgern, dass die Steigerung der Bruchlasten bei einer Vergrößerung der Einbindetiefe im Berechnungsmodell nach Vogt etwas überschätzt wird.

### 3 ZUSAMMENFASSENDER AUSWERTUNG UND FOLGERUNGEN FÜR DIE BEMESSUNG

Um zu einer abschließenden Bewertung des gewählten Sicherheitsniveaus zu gelangen und um weitere Folgerungen im Hinblick auf die zukünftige Bemessung von Schutzwandgründungen zu ermöglichen, wurden die extrapolierten Verformungen jeweils in Abhängigkeit des Verhältnisses der nach Vogt (1988) berechneten statischen Grenzlast  $H_g$  zu jeweiligen zyklischen Amplitude  $\Delta H_{zyk}$  ausgewertet, siehe Bild 8. Die Berechnungen wurden dabei unter Verwendung der für die spätere Bemessung der Schutzwandgründungen auf der sicheren Seite vorgegebenen Scherparameter (Standort D:  $\varphi' = 35^\circ$ ;  $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ ; Standort G:  $\varphi' = 22,5^\circ$ ;  $c' = 3 \text{ kN/m}^2$ ) durchgeführt.

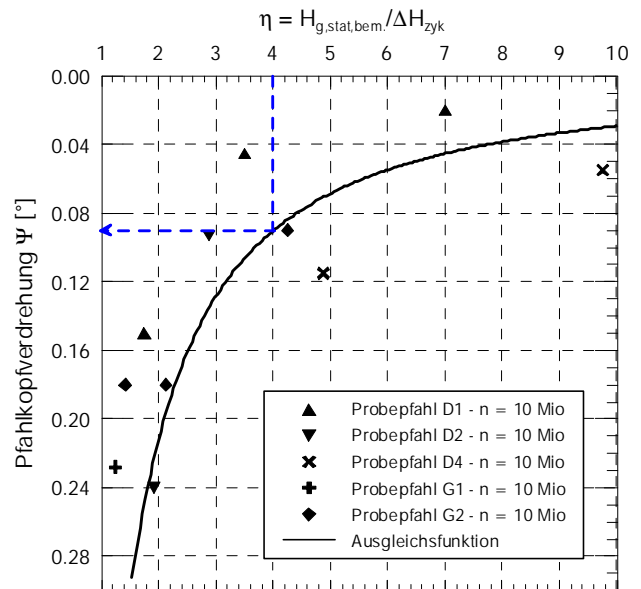


Bild 8: Zusammenfassende Gegenüberstellung des Belastungsverhältnisses zur auftretenden Pfahlverdrehung

Das Verhältnis zwischen rechnerischer Bemessungsbruchlast zur tatsächlich auftretenden zyklisch/dynamischen Belastung kann dabei als wirksame Globalsicherheit  $\eta$  zur pauschalen Abdeckung des zyklischen Tragverhaltens definiert werden.

Unter Ansatz der Sicherheit von  $\eta = 4$  konnte eine wahrscheinliche mittlere Pfahlkopfverdrehung von ca.  $\psi = 0,09^\circ$  für den längerfristigen Gebrauchszustand abgeleitet werden. Im betreffenden Fall wurden diese zu erwartenden Verformungen der hergestellten Schutzwandgründungen innerhalb der gesamten Lebensdauer als zulässig bewertet.

Allerdings ist festzustellen, dass seitens der Deutschen Bahn bis dato keine allgemeinen Anforderungen hinsichtlich der einzuhaltenden Verformungen vorliegen und dass weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf im Zusammenhang mit der theoretischen Erfassung und Prognose des Verformungsverhaltens von kurzen, starren Pfählen unter zyklisch/dynamischen Belastungen besteht. Dies und die vorhandenen Streuungen der Ergebnisse sowie die Problematik der Übertragbarkeit der Pfahlprobebelastungsergebnisse auf andere bautechnische Randbedingungen sind bei der Wahl eines vorläufigen Sicherheitsniveaus zu berücksichtigen.

Für weitere Bemessungen von Schutzwandgründungen wird vorläufig empfohlen, die in Bild 9 dargestellten vorsichtigen Sicherheitsniveaus  $\eta_p$  für zyklisch/dynamische Belastungen in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit nicht zu unter-

schreiten (für näherungsweise ruhende Belastungen, wie z.B. auf die Schutzwände einwirkende Windlasten kann  $\eta_{p,stat} = 2$  angesetzt werden).

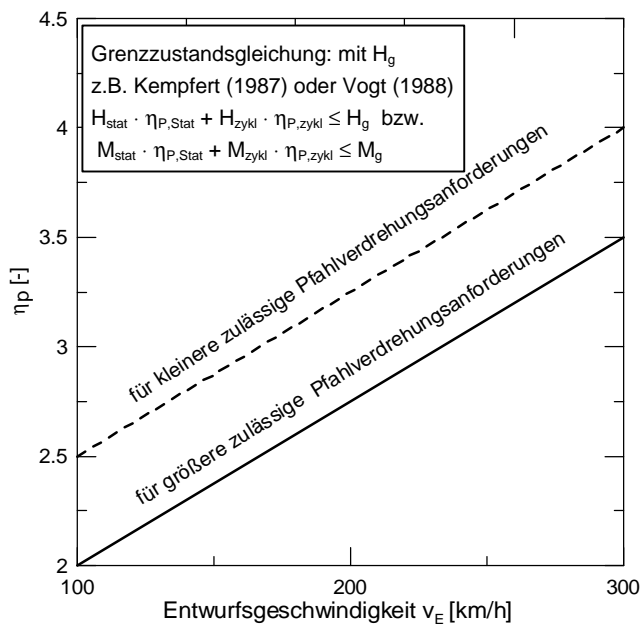


Bild 9: Vorschlag für ein vorläufiges globales Sicherheitsniveau  $\eta_p$  bei zyklisch/dynamischen Belastungen

#### 4 LITERATUR

- DB AG: DS 804 – Anlage 28 Druck-Sog-Einwirkungen auf Bauwerke in Gleisnähe - Aerodynamische Einwirkungen, 1996.
- DB AG: Richtlinie 800.2001: Netzinfrastruktur Technik entwerfen; Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, 2000.
- DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken, 2003.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV: Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen für Bohrpfahlgründungen und Stahlpfosten von Lärmschutzwänden an Straßen. Merkblatt Ausgabe 1997.
- Hertle, R. / Näßl, A.: Aerodynamische Anregung von Schutzwandkonstruktionen an schienengebundenen Hochgeschwindigkeitsstrecken. Bauingenieur Band 80, S. 151 – 161, 2005.
- Kempfert, H.-G.: Lärmschutzwände auf Pfählen. Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau, TIS Heft 2/1985.
- Kempfert, H.-G.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von im Baugrund eingespannten, nahezu starren Gründungskörpern bei ebener oder geneigter Geländeoberfläche. Schriftenreihe des Fachgebietes Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund, Heft 1, 1987.
- Kempfert, H.-G.: Dimensionierung kurzer, horizontal belasteter Pfähle. Bauingenieur Band 64, S. 201 – 207, 1989.
- Vogt, N.: Vorschlag für die Bemessung der Gründung von Lärmschutzwänden. Geotechnik 11, Heft 4, Seite 210-214, 1988.