

# **ZYKLAX – Ein praxistaugliches Berechnungsmodell für zyklisch axial belastete Pfähle?**

**Dr.-Ing. Sebastian Thomas**

Kempfert + Partner Geotechnik, Würzburg

**Prof. (em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert**

Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik

## **1 Einleitung**

Die Erfahrung zeigt, dass zyklisch axiale Einwirkungen das Tragverhalten einer Pfahlgründung beeinträchtigen können, da sie zur Verformungsakkumulation von Pfahl und Boden, zur Porenwasserdruckakkumulation und zur Abnahme der Pfahltragfähigkeit führen und damit sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch die Tragfähigkeit der Pfahlgründung gefährden können.

In DIN 1054:2010-12 wird daher gefordert, bei erheblichen zyklischen Einwirkungen die zyklischen Phänomene ggf. gezielt zu untersuchen. Somit muss der Ingenieur in der Praxis insbesondere die folgenden Fragen beantworten:

- Wird der Pfahl durch eine erhebliche zyklische Einwirkung im Sinne der DIN 1054:2010-12 beansprucht? Sind besondere Betrachtungen zum zyklischen Pfahltragverhalten erforderlich?
- Wie kann der charakteristische post-zyklische (statische) Pfahlwiderstand ermittelt werden? Wie kann die charakteristische plastische Verschiebung des Pfahls ermittelt werden?
- Wie können die Standsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) eines zyklisch axial belasteten Pfahls nachgewiesen werden?

Im Allgemeinen ist bei erheblichen zyklischen Einwirkungen nach DIN 1054:2010-12 zunächst zu überprüfen, ob diese durch statische Ersatzlasten berücksichtigt werden

können oder ob besondere Untersuchungen zur Erfassung von Trägheits- und Entfestigungseffekten sowie von Verformungs- und Porenwasserdruckakkumulation notwendig sind. Bei zyklisch belasteten Pfahlgründungen im Speziellen sollte zunächst das zyklische Lastniveau – die zyklische Lastamplitude bezogen auf den statischen Pfahlwiderstand im Bruchzustand – überprüft werden. Sofern das Lastniveau größer als 10 % ist, muss die Auswirkung auf das Pfahltragverhalten gezielt untersucht werden. In diesem Fall ist es empfehlenswert, die Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls und die Änderung der Pfahltragfähigkeit zu prognostizieren, um das zyklische und post-zyklische Tragverhalten bewerten zu können.

Die Prognose der unter zyklischen Einwirkungen auftretenden Phänomene bereitet in der Praxis jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Zum einen existieren bisher nur wenige Ansätze zur rechnerischen Ermittlung der Verformungsakkumulation und der Entfestigungseffekte.<sup>1</sup> Zum anderen liegen aber auch nur sehr wenige abgesicherte Erfahrungswerte zum zyklischen Tragverhalten vor, wie z. B. zulässige zyklische Lastspannen.

Dieser Beitrag stellt daher ein neues Berechnungsmodell (ZYKLAX) vor, mit dem zyklische Phänomene, insbesondere die Akkumulation der plastischen Verschiebung und die Änderung der Tragfähigkeit des Pfahls, näherungsweise ermittelt werden können. Das Berechnungsmodell wurde im Rahmen einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Arbeit entwickelt. Die grundsätzliche Eignung der analytischen Ansätze wurde bereits anhand zahlreicher Modellversuche dargestellt.<sup>2</sup> Inwieweit ZYKLAX auch das Tragverhalten eines Pfahls in situ abbilden kann, wurde bisher nur an zwei zyklischen Pfahlprobelastungen überprüft. In diesem Beitrag wird daher anhand weiterer zyklischer Pfahlprobelastungen gezeigt, dass das Modell auch für Berechnungen in der Praxis grundsätzlich geeignet ist. Außerdem werden Empfehlungen gegeben, wie die notwendigen empirischen Eingangsparameter abgeleitet werden können.

Wenn die plastische Verschiebung des Pfahls und die Änderung der Pfahltragfähigkeit ermittelt wurden, können die Nachweise der Standsicherheit in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) geführt werden. Dabei können die neuen Empfehlungen sowie ein neues Nachweiskonzept nach (EA-Pfähle 2012) Anwendung finden.<sup>3</sup>

---

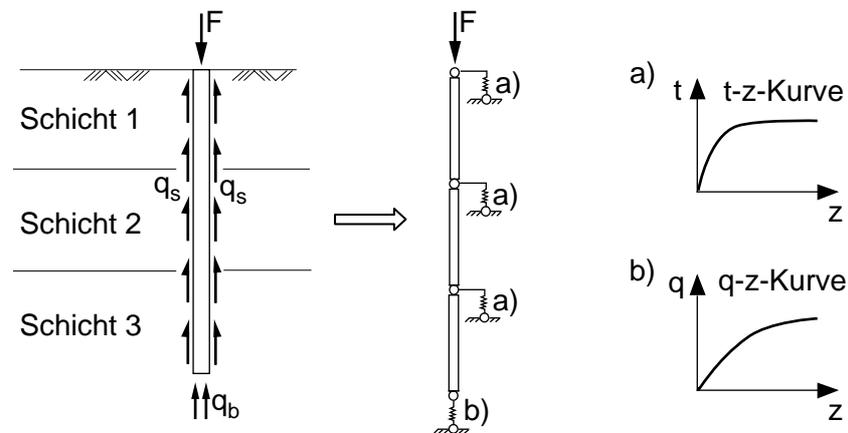
<sup>1</sup> Z. B. die Verfahren von (Kirsch et al. 2011) und (Randolph 2003).

<sup>2</sup> Eine ausführliche Beschreibung findet sich in (Thomas 2011).

<sup>3</sup> Berechnungsbeispiele werden in (Kempfert et al. 2012) vorgestellt.

## 2 ZYKLAX

Mit dem Berechnungsmodell ZYKLAX kann das statische, zyklische und post-zyklische Pfahltragverhalten näherungsweise ermittelt werden. Dabei wird die Wechselwirkung zwischen Boden und Pfahlmantel sowie zwischen Boden und Pfahlfuß zunächst mit analytischen Ansätzen separat betrachtet. Das Zusammenwirken von Pfahlmantel und Pfahlfuß sowie die Interaktion mit geschichtetem Baugrund werden dann mit einem numerischen Berechnungsalgorithmus erfasst. Dieser basiert auf dem Lastabtragungsansatz, bei dem der Pfahl durch Stabelemente und der angrenzende Boden durch unabhängige Feder-elemente repräsentiert werden (Bild 1).



**Bild 1** Prinzip des Lastabtragungsansatzes in ZYKLAX bei einem Druckpfahl im geschichteten Boden

Die Verschiebung des Pfahlmantels und des Pfahlfußes unter statischer und post-zyklischer Belastung werden nach Gleichung (1) bzw. (2) ermittelt.

$$s_s = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \ln \left( \frac{\left( \frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right)^{g_s}}{1 - R_{fs} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right)^{g_s}} \right) \quad (1)$$

mit

$s_s$	Verschiebung des Pfahlmantels
$\tau_0$	Schubspannung am Pfahlmantel
$G_0$	Schubmodul bei sehr kleinen Dehnungen
$g_s$	Modellparameter
$r_0$	Pfahlradius
$r_m$	Einflussradius, mit $r_m = D$
$\tau_{ult}$	Bruchwert der Schubspannung
$R_{fs}$	Modellparameter

$$s_b = \frac{R_b \cdot (1 - \nu)}{4 \cdot G_0 \cdot r_0 \cdot \left( 1 - R_{fb} \cdot \left( \frac{R_b}{R_{b,ult}} \right)^{g_b} \right)} \quad (2)$$

mit

$s_b$	Verschiebung des Pfahlfußes
$\nu$	Querdehnzahl
$R_b$	Pfahlfußwiderstand
$g_b$	Modellparameter
$R_{b,ult}$	Bruchwert des Pfahlfußwiderstands
$R_{fb}$	Modellparameter

Unter zyklischer Belastung wird die Verschiebung des Pfahlfußes ebenfalls nach Gleichung (2) modelliert, da die zyklischen Phänomene vor allem Auswirkungen auf die Pfahlmantelreibung haben. Das Verschiebungsverhalten des Pfahlmantels unter zyklischer Belastung wird in einem Entlastungs- und Wiederbelastungsast gemäß Gleichung (3) bzw. (4) beschrieben.

$$s_{s,E}(N) = s_{\max} + \frac{(\tau_0 - \tau_{\max}) \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{r_{m,N}}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{\max}|}{\kappa \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}}{1 - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{\max}|}{\kappa \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}} \right) \quad (3)$$

mit

$s_{s,E}(N)$	Verschiebung des Pfahlmantels bei Entlastung im Lastzyklus $N$
$s_{\max}$	Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Entlastung bei $F_{\max}$
$\tau_{\max}$	Schubspannung zu Beginn der Entlastung bei $F_{\max}$
$r_{m,N}$	Lastzyklen-abhängiger Einflussradius, in erster Näherung sollte $r_{m,N} = r_m$ gesetzt werden, siehe auch (Thomas 2011)
$\kappa$	Parameter zur Beschreibung der Form der Hysterese
$\beta_N$	Parameter zur Beschreibung der Änderung der Pfahltragfähigkeit nach Gleichung (6)

$$s_{s,W}(N) = s_{\min} + \frac{(\tau_0 - \tau_{\min}) \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{r_{m,N}}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{\min}|}{\kappa \cdot \delta_N \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}}{1 - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{\min}|}{\kappa \cdot \delta_N \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}} \right) \quad (4)$$

mit	
$s_{s,W}(N)$	Verschiebung des Pfahlmantels bei Wiederbelastung im Lastzyklus $N$
$s_{\min}$	Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Wiederbelastung bei $F_{\min}$
$\tau_{\min}$	Schubspannung zu Beginn der Wiederbelastung bei $F_{\min}$
$\delta_N$	Parameter zur Beschreibung der Akkumulation der plastischen Verschiebung nach Gleichung (5)

Die unter zyklischen Einwirkungen auftretenden Phänomene werden in den Gleichungen (3) und (4) durch Ansätze für die Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls und für die Änderung der Tragfähigkeit modelliert. Bei abnehmender Verschiebungsrates<sup>4</sup> werden die plastischen Verschiebungen nach Gleichung (5) erfasst. Die Zu- oder Abnahme der Tragfähigkeit wird nach Gleichung (6) berechnet.

$$\delta_N = 1 - \frac{1}{a \cdot N^b} \quad \text{für } N \geq 1 \quad (5)$$

mit  
 $a, b$  Modellparameter

$$\beta_N = (1 - \dot{\beta}) \cdot (\beta_{N-1} - \beta_{\lim}) + \beta_{\lim} \quad \text{für } N > 1 \quad (6)$$

mit  
 $\beta_{N-1}$  Änderungsfaktor im vorherigen Lastzyklus  
 $\beta_{\lim}$  Grenzwert für den Änderungsfaktor  
 $\dot{\beta}$  Änderungsrate

### 3 Modellparameter

Zur Prognose des statischen und zyklischen Pfahltragverhaltens mit ZYKLAX müssen pfahlspezifische Kenngrößen, Kenngrößen zum statischen Pfahltragverhalten, bodenmechanische Kenngrößen und empirische Modellparameter angegeben werden.<sup>5</sup>

Die pfahlspezifischen Kenngrößen, wie z. B. der Radius, die Länge und der Elastizitätsmodul, ergeben sich aus der Pfahlgeometrie und dem Pfahlsystem. Die Kenngrößen zum statischen Pfahltragverhalten, d. h. der Bruchwert der Pfahlmantelreibung und des Pfahlspitzendrucks, können aus statischen oder dynamischen Pfahlprobelastungen

<sup>4</sup> Ein Ansatz zur Modellierung des Verschiebungsverhaltens bei zunehmender Verschiebungsrates findet sich in (Thomas 2011).

<sup>5</sup> Nähere Informationen zu den Modellparametern finden sich in (Thomas 2011).

oder aus Erfahrungswerten für die Pfahlmantelreibung und den Pfahlspitzendruck ermittelt werden. Die bodenmechanischen Kenngrößen, wie z. B. der Schubmodul bei sehr kleinen Dehnungen und die Querdehnzahl, werden üblicherweise aus Laborversuchen oder empirischen Korrelationen bestimmt. Für die modelleigenen empirischen Parameter des Verschiebungs- und Tragfähigkeitsansatzes liegen derzeit jedoch noch keine abgesicherten Verfahren oder Erfahrungswerte vor. Zur Ermittlung dieser Kenngrößen sind nachfolgend beschriebene Methoden möglich.

1. Bestimmung aus Pfahlprobelbelastungen.
2. Bestimmung aus Erfahrungswerten.
3. Bestimmung aus zyklischen Laborversuchen.

Die empirischen Modellparameter lassen sich am zuverlässigsten durch statische oder dynamische und zyklische Pfahlprobelbelastungen ableiten. Dadurch können sowohl die herstellungsbedingten Veränderungen im Spannungs- und Verformungszustand des Bodens als auch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Pfahl und Boden bei der zyklischen Belastung erfasst werden. In diesem Fall sollten in der Regel wenige Lastzyklen ausreichen, um das zyklische Pfahltragverhalten extrapolieren zu können.

Sofern am Baufeld vergleichbare Randbedingungen (Belastungsart, Belastungsniveau, Bodenart, Pfahlsystem) vorliegen, kann auf bereits abgeleitete Modellparameter zurückgegriffen werden, wie z. B. auf die in diesem Beitrag durch Nachrechnungen von zyklischen Pfahlprobelbelastungen ermittelten Kennwerte (Tabelle 1 und 2).

Ergänzend hierzu könnten die benötigten Parameter für den Verschiebungsansatz nach Gleichung (5) näherungsweise auch anhand von Laborversuchen, z. B. zyklischen Triaxialversuchen, ermittelt werden, da die Dehnungsentwicklung im zyklischen Triaxialversuch bei abnehmender Verschiebungsrate ein affines Verhalten zur Entwicklung des Parameters  $\delta_N$  zeigt. Die benötigten Parameter im Tragfähigkeitsansatz nach Gleichung (6) könnten zunächst ebenfalls näherungsweise aus Triaxialversuchen oder aus mehreren zyklischen Scherversuchen (z. B. aus zyklischen Einfach-Scherversuchen oder Rahmen-Scherversuchen) ermittelt werden. Die Scherversuche sind dabei nach unterschiedlichen Lastzyklen (z. B. nach 10, 100, 1.000 Lastzyklen) monoton bis zum Bruch abzuscheren. Die Entwicklung der post-zyklischen Scherfestigkeit über die Anzahl der Lastzyklen kann dann verwendet werden, um die Modellparameter in Gleichung (6) zu bestimmen.

## 4 Anwendung von ZYKLAX auf zyklische Pfahlprobelastungen

### 4.1 Allgemeines

Mit dem Berechnungsmodell ZYKLAX wurden die von (Baumbach et al. 2010), (Jardine et al. 2000) und (Karlsruh et al. 1986) dokumentierten, zyklischen Pfahlprobelastungen unter Zugschwelllasten nachgerechnet. Dazu wurde das Modell zunächst an dort ebenfalls beschriebenen statischen Pfahlprobelastungen kalibriert, sodass die gemessenen und berechneten Widerstands-Hebungs-Linien möglichst gut übereinstimmen. Die dabei angesetzten statischen Modellparameter enthält Tabelle 1.

Unter Ansatz der zuvor festgelegten statischen Kennwerte erfolgte anschließend die Rückrechnung der zyklischen Modellparameter aus den zyklischen Probelastungen. Dabei wurde zuerst die zyklische Steifigkeit  $\kappa$  derart angepasst, dass die gemessenen den berechneten elastischen Verschiebungen entsprechen. Danach erfolgte analog die Anpassung der Parameter des Verschiebungsansatzes an die gemessenen plastischen Verschiebungen der Pfähle. Die Kennwerte des Tragfähigkeitsansatzes wurden abschließend aus den ebenfalls dokumentierten post-zyklischen Pfahlprobelastungen abgeleitet. Die auf diese Weise bei den Rückrechnungen der Probelastungen ermittelten zyklischen Modellparameter enthält Tabelle 2.

Literaturquelle	$g_s$ [-]	$R_{fs}$ [-]	$G_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{s,ult}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$r_0$ [m]	$l_i$ [m]
(Baumbach et al. 2010)	0,30 bis 0,50	1,00	8.000 bis 20.000	55,0 bis 57,6	0,08	1,33
(Jardine et al. 2000)	0,03 bis 0,08	1,00	90.000 bis 180.000	52,0 bis 88,0	0,23	6,30 bis 6,45
(Karlsruh et al. 1986)	0,30 bis 0,60	1,00	10.000 bis 40.000	26,0	0,08	1,72

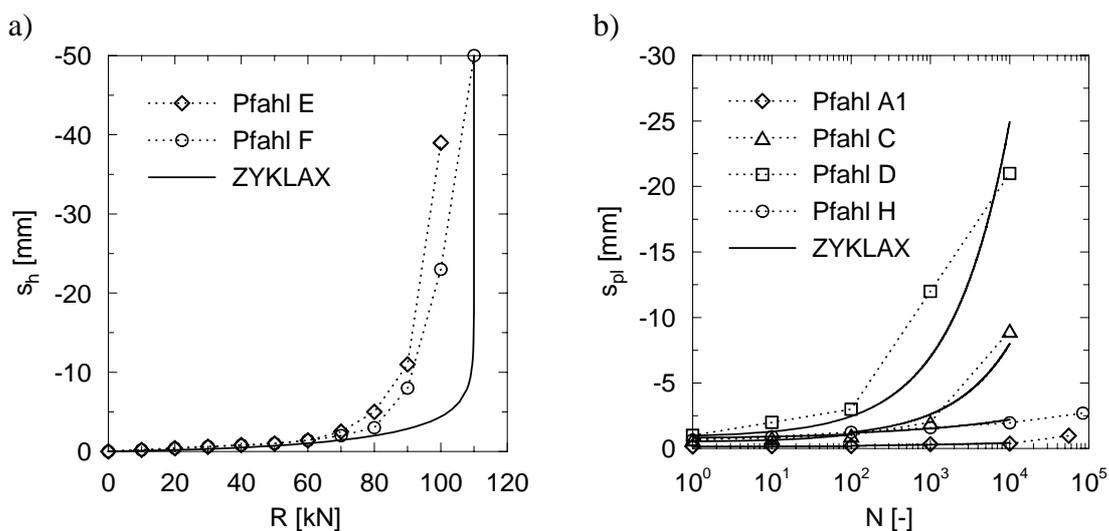
**Tabelle 1** In den statischen Berechnungen angesetzte Modellparameter

Literaturquelle	Versuch	$X_{mitt}$	$X_{zyk}$	$a$	$b$	$\beta_{lim}$	$\dot{\beta}$	$\kappa$
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
(Baumbach et al. 2010)	Pfahl A1	0,19	0,14	50	0,70	1,05	0,01	1,10
	Pfahl C	0,38	0,33	40	0,40	1,05	0,01	1,10
	Pfahl D	0,48	0,33	15	0,40	1,05	0,01	1,10
	Pfahl H	0,48	0,24	15	0,60	1,05	0,01	1,10
(Jardine et al. 2000)	R3CY2	0,30	0,30	50	0,25	0,88	0,01	1,10
	R3CY3	0,46	0,46	45	0,10	0,81	0,10	1,10
	R4CY2	0,34	0,34	60	0,23	0,80	0,01	1,10
(Karlsruh et al. 1986)	3	0,46	0,37	100	0,10	0,75	0,02	0,90
	4	0,39	0,36	500	0,15	0,80	0,01	0,90

**Tabelle 2** Aus zyklischen Pfahlprobelastungen abgeleitete Modellparameter

#### 4.2 Mikropfähle im bindigen Boden nach (Baumbach et al. 2010)

Die Feldversuche wurden im Löß in der Nähe von München durchgeführt. Der Außendurchmesser der Verrohrung betrug 15,2 cm und die Pfähle (GEWI-Stahl Ø 50 mm) bindeten etwa 4,0 m in einen leicht bis mittelplastischen Ton (TL bzw. TM) mit überwiegend steifer, zum Teil aber auch weicher Konsistenz, ein. Die undrained Scherfestigkeit des Tons wurde mittels Drucksondierungen zu etwa 60 kN/m<sup>2</sup> bestimmt. Nachgerechnet wurden zwei der statischen und vier der zyklischen Pfahlprobelastungen (Bild 2).



**Bild 2** Von (Baumbach et al. 2010) gemessene und mit ZYKLAX berechnete Verschiebung der Pfähle in den statischen (a) und den zyklischen (b) Pfahlprobelastungen

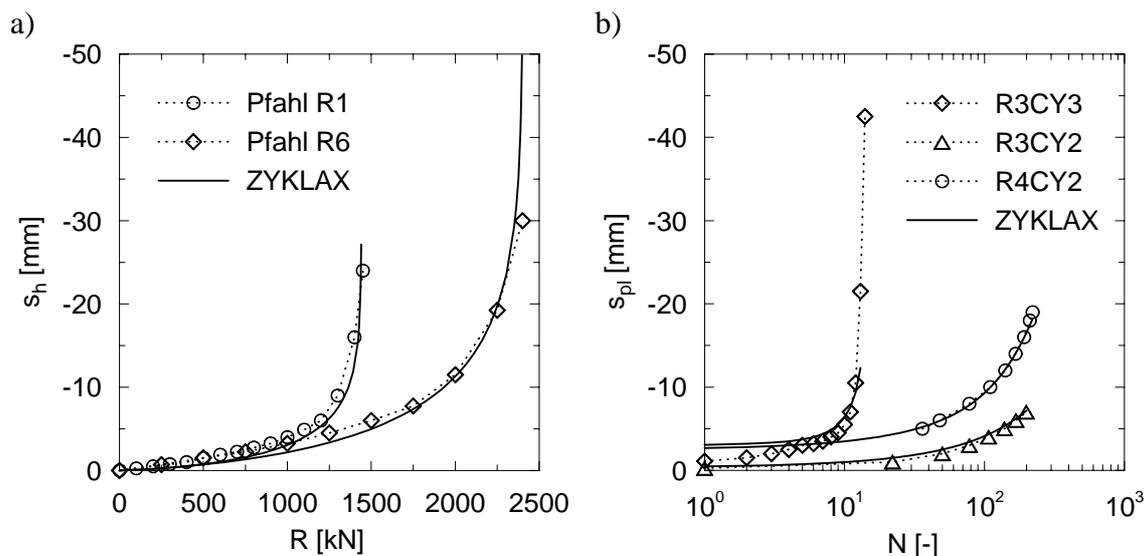
Das statische Tragverhalten der Pfähle E und F kann mit ZYKLAX insbesondere im Gebrauchslastbereich bis etwa 70 kN und im Hinblick auf die Grenztragfähigkeit abgebildet werden (Bild 2a). Die zyklischen Pfahlprobelastungen an den Pfählen A1, C, D und H wurden bis zum 10.000sten Lastzyklus nachgerechnet. Da aus post-zyklischen Pfahlprobelastungen bekannt ist, dass die Tragfähigkeit der Pfähle durch die zyklische Belastung etwa um 5 bis 10 % zugenommen hatte, wurde der Parameter  $\beta_{lim}$  zu 1,05 gesetzt. Das zyklische Tragverhalten kann mit diesen Kennwerten näherungsweise nachgerechnet werden (Bild 2b).

### 4.3 Verdrängungspfähle im nichtbindigen Boden nach (Jardine et al. 2000)

Die Pfahlprobelastungen wurden im Rahmen des GOPOL-Projektes<sup>6</sup> in Dünkirchen (Frankreich) an acht Pfählen von etwa 10 m und 19 m Länge durchgeführt. Es handelte sich dabei um gerammte Stahlrohrpfähle (driven piles) mit einem Durchmesser von 45,7 cm (13,5 mm Wandstärke). Die Schichtenfolge auf dem Versuchsgelände stellte sich wie folgt dar: Bis in eine Tiefe von 3 m fand sich eine Auffüllung aus Sand. Darunter folgten bis in etwa 30 m Tiefe Fein- und Mittelsande mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,25 mm und einer bezogenen Lagerungsdichte von i. M. 0,75, die von einer organischen Bodenschicht zwischen 7,6 m und 8,2 m Tiefe durchsetzt waren. Unterhalb der Sande stand sogenannter London Clay an. Das Grundwasser befand sich in etwa 4 m Tiefe. Bei diesen Pfahlprobelastungen ist zu beachten, dass die zyklischen Versuche an den Reaktionspfählen durchgeführt wurden, die dadurch bereits eine statische und zyklische Vorbelastung erfahren haben. Nachgerechnet wurden zwei statische und drei zyklische Pfahlprobelastungen an den Probepfählen R1, R3 und R4 und R6 (Bild 3).

---

<sup>6</sup> GOPOL (Jet Grouting To Improve Offshore Pile Capacity)



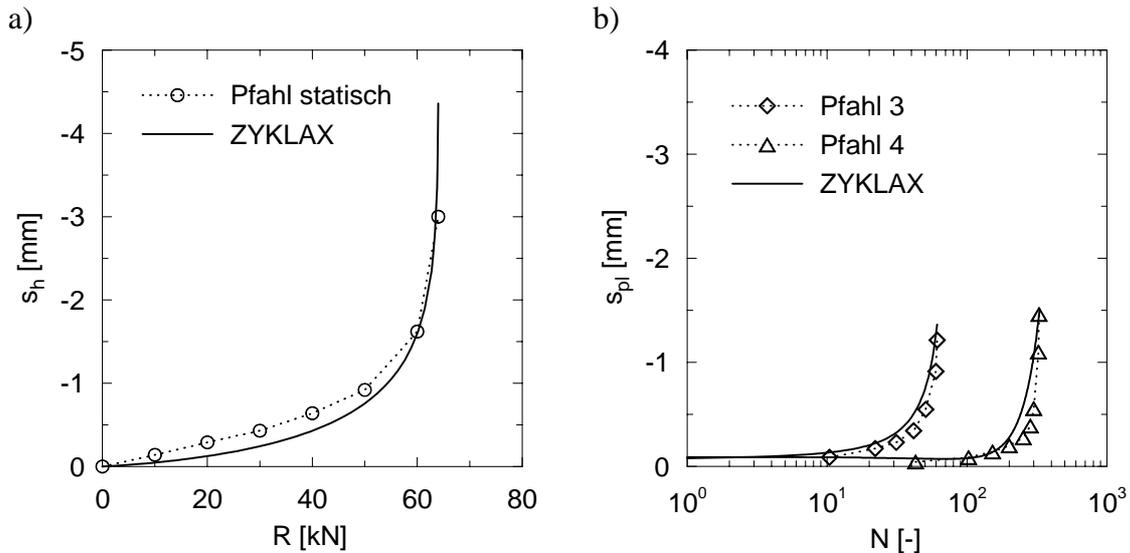
**Bild 3** Von (Jardine et al. 2000) gemessene und mit ZYKLAX berechnete Verschiebung der Pfähle in den statischen Pfahlprobelastungen (a) und den zyklischen Pfahlprobelastungen (b)

Die Widerstands-Hebungs-Linien der Pfähle R1 und R6 werden durch ZYKLAX sehr gut abgebildet (Bild 3a). Bei der Simulation der zyklischen Probelastung an Pfahl R3CY2 wurde gemäß (Jardine et al. 2000) eine Abnahme der Tragfähigkeit um 12 % berücksichtigt. Die Probelastung wurde nach 200 Lastzyklen bei etwa 6,9 mm plastischer Verschiebung beendet. Mit ZYKLAX wurde eine Verschiebung von 7,1 mm berechnet (Bild 3b). Die zyklische Probelastung R3CY3 erfolgte am gleichen Pfahl nach der ersten zyklischen Belastung. Aufgrund der Vorbelastung und des großen zyklischen Lastniveaus versagte der Pfahl bereits nach 14 Lastzyklen. Bei der Berechnung wurden die infolge der ersten zyklischen Belastung des Pfahls verringerte Tragfähigkeit sowie eine Abnahme der Tragfähigkeit infolge der zweiten zyklischen Belastung um weitere 19 % berücksichtigt. Durch ZYKLAX wird die Verschiebung in den ersten fünf Lastzyklen geringfügig überschätzt, prinzipiell wird das Tragverhalten jedoch gut abgebildet. Im 14. Lastzyklus wird die Berechnung aufgrund zu großer Verschiebungen zwischen zwei Lastzyklen abgebrochen. Aus der zyklischen Probelastung R4CY2 liegen für die ersten 35 Lastzyklen keine Messwerte vor, der weitere Verschiebungsverlauf stimmt in der Berechnung mit den Messwerten sehr gut überein (Bild 3b).

#### 4.4 Verdrängungspfähle im bindigen Boden nach (Karlsrud et al. 1986)

Das NGI (Norwegian Geotechnical Institute) führte Feldversuche im Ton in der Nähe von Oslo durch. Die Pfahlprobelastungen wurden an eingedrückten Stahlrohrpfählen (jacked piles) mit einem Durchmesser von 15,3 cm (4,5 mm Wandstärke) und einer

Einbindelänge von etwa 5,15 m durchgeführt. Das Grundwasser stand in etwa 0,5 m Tiefe an. Bei dem Ton handelte es sich um einen überkonsolidierten, mittelplastischen Ton mit einem natürlichen Wassergehalt von 40 %. Der Überkonsolidierungsgrad betrug in einem Meter Tiefe etwa 17 und in fünf Metern Tiefe etwa 3. Mit Flügelsondierungen wurde die undrained Scherfestigkeit über die Tiefe annähernd konstant zu etwa  $40 \text{ kN/m}^2$  ermittelt. Mit ZYKLAX wurden eine statische und zwei zyklische Pfahlprobelastungen an den Pfählen Nr. 3 und Nr. 4 nachgerechnet (Bild 4).



**Bild 4** Von (Karlsrud et al. 1986) gemessene und mit ZYKLAX berechnete Verschiebung der Pfähle in der statischen (a) und den zyklischen (b) Pfahlprobelastungen

Auch diese statische Pfahlprobelastung kann mit ZYKLAX näherungsweise abgebildet werden (Bild 4a). Bei der zyklischen Berechnung wurde eine Minderung der Pfahltragfähigkeit um 25 % und 20 % bei Pfehl 3 bzw. Pfehl 4 angenommen (Tabelle 2). Mit diesen Werten stimmen die gemessenen und berechneten plastischen Verschiebungen der Pfähle ebenfalls angenähert überein (Bild 4b).

## 5 Schlussbemerkungen

Die Nachrechnung von in situ ausgeführten Pfahlprobelastungen zeigt, dass das Berechnungsmodell ZYKLAX prinzipiell geeignet ist, das statische und zyklische Pfahltragverhalten auch bei verschiedenen Randbedingungen (z. B. Lastniveaus, Pfahlsystem, Bodenart) näherungsweise zu erfassen. Die hier betrachteten zyklischen Pfahlprobelastungen wurden unter Zugschwelllasten ausgeführt. Die Eignung von ZYKLAX bei Versuchen unter Druckschwelllasten und Wechsellasten wurde bereits in (Thomas 2011) dargestellt.

Die Rückrechnung der Modellparameter aus den Pfahlprobelastungen an drei Pfahlsystemen in bindigen und nichtbindigen Böden zeigt, dass die Parameter  $a$  und  $b$  des Verschiebungsansatzes insbesondere vom mittleren Lastniveau bzw. vom zyklischen Lastniveau und der Bodenart abhängig sind.

Die Qualität der Berechnungen hängt maßgeblich von der Wahl der empirischen Modellparameter ab. Aus Rückrechnungen statischer und zyklischer Pfahlprobelastungen lassen sich die empirischen Modellparameter am zuverlässigsten ermitteln. Zur Prognose des Pfahltragverhaltens mit ZYKLAX könnten für die Ableitung der Modellparameter näherungsweise auch zyklische Laborversuche geeignet sein. Alternativ könnte unter vergleichbaren Randbedingungen am Baufeld auch auf die hier abgeleiteten Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

Es ist vorgesehen, durch weitere Vergleichsberechnungen mit Pfahlprobelastungen die Modellparameter im Sinne von Erfahrungswerten weiter abzusichern.

## Literatur

- Baumbach, J., Schwarz, P., Vogt, N. (2010)  
Axial zyklisch belastete Mikropfähle in bindigen Böden. DIBt-Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ZP 52-5-11.48.1-1273/07, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- DIN 1054:2010-12  
Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- EA-Pfähle (2012)  
Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA Pfähle. Arbeitskreis Pfähle (AK2.1) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- Jardine, R. J., Standing, J. R. (2000)  
Pile load testing performed for HSE cyclic loading study at Dunkirk, France. Offshore Technology Report OTO 2000 008, Health and Safety Executive, London
- Karlsrud, K., Nadim, F., Haugen, T. (1986)  
Piles in clay under cyclic axial loading – Field tests and computational modeling. Proceedings of the 3rd International Conference of Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, pp. 165-190

Kempfert, H.-G., Thomas, S. (2012)

Zyklische Einwirkungen auf Pfähle – Neue Empfehlungen und Nachweiskonzepte der EA-Pfähle 2012. Beitrag zur 4. VDI-Fachtagung Baudynamik, (Manuskript eingereicht)

Kirsch, F., Richter, T. (2011)

Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen. Bautechnik, Band 88, Heft 2, S. 113-120

Randolph, M. F. (2003)

RATZ – Load transfer analysis of axially loaded piles. User manual, University of Western Australia, Perth

Thomas, S. (2011)

Zum Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 25, Dissertation