

Bewehrte Erdkörper über Pfählen unter ruhender und nichtruhender Belastung

C. Heitz, H.-G. Kempfert

Zusammenfassung Der Beitrag befasst sich mit Forschungsergebnissen zum Tragsystem „Bewehrte Erdkörper über Pfählen“, die auf Grundlage großmaßstäblicher Modellversuche sowie numerischer Analysen mit der Methode der finiten Elemente unter ruhender und nichtruhender Belastung gewonnen wurden. Während unter ruhender Belastung das Tragsystem auf einer Gewölbeausbildung im Bodenkörper und einer Membranwirkung in der Geogitterlage beruht, ändert sich unter nichtruhender Belastung (z. B. Verkehrslasten) die Lastabtragung. Große zyklisch-dynamische Beanspruchungen führen im unbewehrten System zu einer Gewölberückbildung, die mit erhöhten Systemverformungen und Scherfugenausbildungen verbunden ist. Durch Einlegen von horizontalen Geogitterlagen können die Scherfugenausbildung und Setzungen reduziert sowie die Lastumlagerung auf die Pfähle erhöht werden. Die Bewehrung erfährt hierbei eine zusätzliche Dehnungsbeanspruchung, die die Dehnung bei rein statischer Belastung deutlich übersteigt. Aus den Forschungsergebnissen wurden für das Tragsystem kritische geometrische und lastabhängige Randbedingungen abgeleitet sowie ein analytisches Berechnungsverfahren angegeben, mit dem eine vereinfachte Ermittlung der Gewölberückbildung und der zusätzlichen Geogitterdehnung unter nichtruhender Belastung durchgeführt werden kann.

Geosynthetic-reinforced and pile-supported earth structures under static and cyclic loading

Abstract The paper focuses on the soil improvement system “geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment”. The phenomenon of soil arching in cohesionless soils under static and cyclic loading and the stabilization of the soil arching by means of geosynthetic reinforcement (geogrids) has been investigated using experimental, numerical and analytical methods. Whereas the system behaviour (soil arching and membrane effect in geosynthetic reinforcement) under static loading is well-known, the bearing behaviour and the settlements expected under cyclic loading is not yet fully explained and cannot be predicted. Under cyclic loading the arching effect can only be formed in a very limited extent and part of the load carried directly by the piles can decrease

Dr.-Ing. Claas Heitz

ehemals Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel
Email: claas.heitz@zueblin.de

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Institut für Geotechnik und Geohydraulik
Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel
Email: geotech@uni-kassel.de

remarkably, which results in an increase of the load on the soft soil and on the reinforcement. Due to the reduction of the soil arching, the strains in the geogrid and the surface settlements increase considerably. Based on the results of model tests and numerical investigations, the main parameters which cause a reduction of the arching effect has been identified. Critical geometrical and loading limits were worked out. For system values beyond these limits a modified calculation procedure is proposed which takes a soil arching reduction and an increase of the geosynthetic strains into account.

1 Einleitung

Das Verfahren „Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern“ wird zur Ertüchtigung von gering tragfähigem oder setzungsempfindlichem Untergrund eingesetzt und ist zwischenzeitlich im Verkehrswegebau etabliert, siehe dazu [1], [2], [3]. Das Tragsystem und die sich unter vorwiegend ruhender (statischer) Belastung einstellende Lastabtragung sind schematisch in **Bild 1** dargestellt. Unter statischer Belastung beruht die Lastabtragung auf einer Gewölbeausbildung im Bodenkörper und einem Membraneffekt in der Geogitterlage, wobei auch Verkehrslasten durch die Gewölbebildung in die Pfahlelemente eingeleitet werden. Die Weichschicht wird hierdurch entlastet. Zusätzlich überspannen die Geogitterlagen membranartig die Pfahlköpfe und nehmen die noch verbliebenen vertikalen Spannungen in den Pfahlzwischenbereichen auf.

Auf der Grundlage von umfangreichen Untersuchungen zum Tragsystem unter statischer Belastung [4] wurde ein „Stand der Technik“ abgeleitet, der auch weitgehend in die Neubearbeitung der zuständigen nationalen Empfehlung EBGEO zur Thematik Eingang gefunden hat, siehe [5]. Auch wenn damit ein wesentlicher Erkenntnisfortschritt erzielt werden konnte, waren noch offene Fragen insbesondere zum Systemverhalten unter nichtruhenden (zyklisch-dynamischen) Beanspruchungen, denen im Verkehrswegebau eine besondere Bedeutung zukommen, verblieben. Im zweiten Teil eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojektes wurden Untersuchungen zur Identifizierung der Haupteinflussgrößen für eine Gewölbebeeinflussung infolge zyklisch-dynamischer Einwirkungen sowie der stabilisierenden Wirkungsweise mehrlageriger Geogitteranordnungen durchgeführt. Der Beitrag fasst die wesentlichen Ergebnisse zum Systemverhalten unter Zyklisch zusammen. Ein modifizierter auf den bisherigen Berechnungsformeln nach [2] aufbauender analytischer Ansatz zur Berücksichtigung einer Gewölberückbildung infolge nichtruhender Belastung wird vorgestellt.

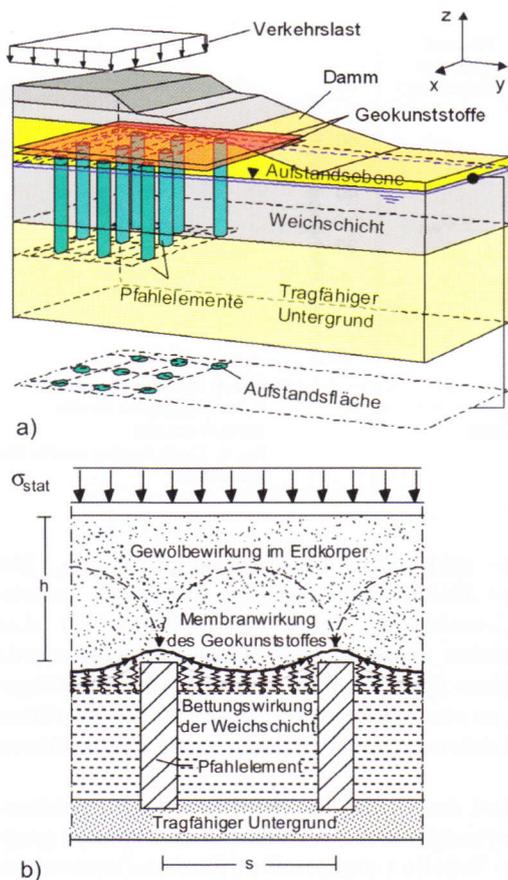


Bild 1. Tragsystem (a) und Lastabtragung unter vorwiegend ruhender Belastung (b)
 Fig. 1. Construction (a) and load transfer mechanisms under static loading (b)

2 Modellversuche zur Gewölbbeausbildung am Pfahlrasterausschnitt unter nichtruhender Belastung

2.1 Allgemeines

Der experimentelle Teil des Forschungsprojektes wurde mit dem in **Bild 2** dargestellten Modellversuchsstand vorgenommen, der einen Teilausschnitt des Tragsystems bestehend aus vier Pfählen als räumliches Modell im Maßstab 1:3 nachbildet. Neben unbewehrten Versuchen wurden Versuchsanordnungen mit ein bis drei Geogitterlagen und unterschiedlichen Geogittertypen untersucht, wobei in den unbewehrten Versuchen vorrangig die Gewölbbeausbildung unter nichtruhender Belastung und in den bewehrten Versuchen die stabilisierende Wirkungsweise der Geogitter analysiert wurde. Das Überdeckungshöhen-Stützweitenverhältnis h/s lag zwischen 0,5 und 1,5 (bzw. $h/(s-d)$ zwischen 0,75 und 2,0), was bezogen auf den Prototyp (siehe **Bild 3**, d = Pfahldurchmesser) Dammhöhen bis zu 3 m entspricht.

Die zyklischen Belastungsgrößen waren am Verkehrswegebau (Eisenbahnbau) orientiert und im Verhältnis des Modellmaßstabes verkleinert. Neben der zyklischen Spannungsamplitude σ_c wurden die Mittelspannung σ_m und die Belastungsfrequenz f variiert. **Bild 4** zeigt exemplarisch ein untersuchtes Belastungsschema. Weitergehende Erläuterungen zu den Modellversuchen finden sich in [3]. Die wesentlichen Phänomene, die sich unter nichtruhender Belastung im Tragsystem einstellen, werden nachfolgend für die beiden Fälle „unbewehrtes

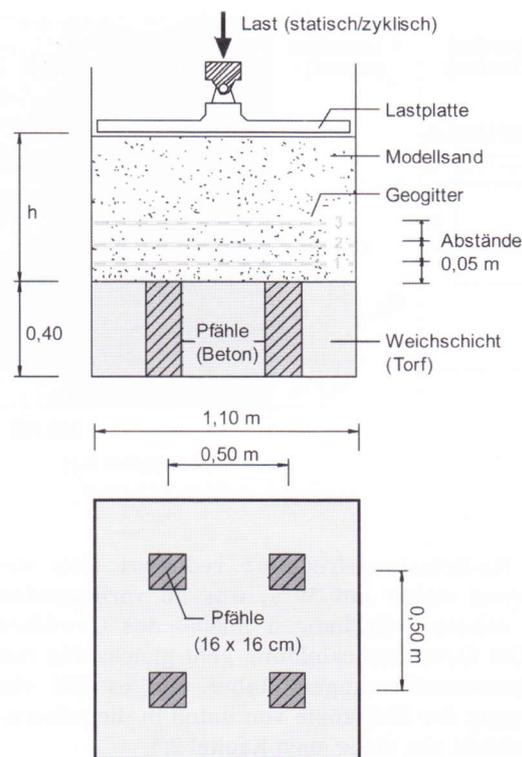


Bild 2. Modellversuchsstand zur Gewölbbeausbildung am Pfahlrasterausschnitt
 Fig. 2. Model test arrangement

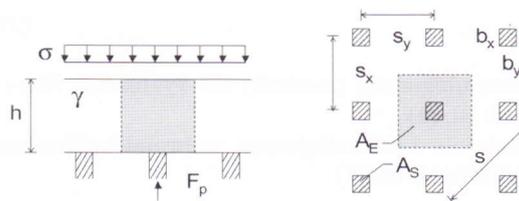


Bild 3. Definition des Lastumlagerungswertes E
 Fig. 3. Definition of the efficiency of soil arching E

System“ und „geogitterbewehrtes System“ erläutert. Die Effektivität des Gewölbessystems wird dabei mit Hilfe des Lastumlagerungswertes E dargestellt, der gemäß Gleichung (1) den Quotienten aus der Pfahlkraft F_p zur Gesamtlast, die auf die einem Pfahl zuzuordnende Einflussfläche A_E entfällt, beschreibt; siehe auch **Bild 3**. Die Bestimmung des Lastumlagerungswertes erfolgte in den Modellversuchen durch Pfahlkraftmessungen sowie durch Rückrechnung aus Spannungsmessungen oberhalb der Weichschicht.

$$E = \frac{F_p}{A_E \cdot (\gamma \cdot h + \sigma)} \quad \text{mit: } A_E = s_x \cdot s_y \quad A_S = b_x \cdot b_y \quad (1)$$

2.2 Unbewehrtes System unter nichtruhender Belastung

Bild 5 zeigt exemplarisch für den Fall $h/s = 0,5$ die Auswirkungen der zyklischen Belastung aus **Bild 4** auf die Lastumlagerung. Die Darstellung erfolgt halblogarithmisch. Infolge der 1 Hz-Belastung ist für das Tragsystem eine Reduzierung der Lastumlagerung von 76 % auf 56 % festzustellen, wobei sich eine Stabilisierung nach etwa 1.000 Lastzyklen einstellt. Mit Umstellung

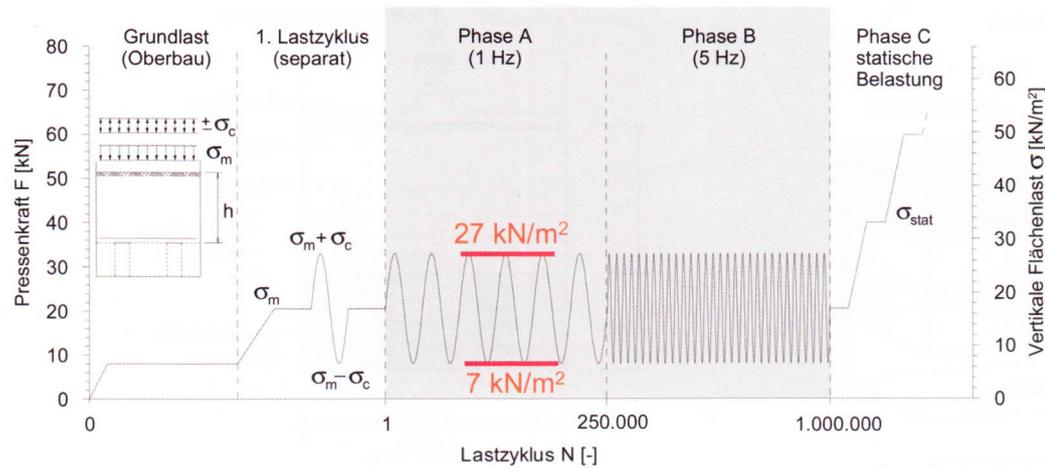


Bild 4. Zyklisch-dynamische Belastungsgrößen für die Modellversuche
Fig. 4. Cyclic loading used in the model tests

auf die 5 Hz-Belastungsfrequenz reduziert sich die Lastumlagerung weiter auf 39%, was im vorliegenden Fall einem nahezu vollständigen Ausfall des Gewölbes entsprach. Die Gewölberückbildung geht gleichzeitig mit erhöhten Systemverformungen einher und es tritt ein Einstanzzvorgang der Pfahlköpfe von unten in die mineralische Tragschicht ein, siehe auch Kapitel 2.3. Zur weiteren Auswertung wurde die Systembeanspruchung als Gewölbereduktionsfaktor κ entsprechend Gleichung (2) eingeführt.

$$\kappa = \frac{E_{stat}}{E_{zykl}} \quad (2)$$

mit: E_{stat} Lastumlagerung (statisch) vor zyklischer Phase nach Gl. (1)
 E_{zykl} minimale Lastumlagerung während zyklischer Phase nach Gl. (1)

Mit Hilfe des Reduktionsfaktors lassen sich die Haupteinflussgrößen für eine Gewölberückbildung infolge zyklischer Belastung quantifizieren, siehe Bild 6 und Bild 7. Es zeigt sich, dass die Größe der Gewölbereduktion direkt abhängig ist vom Verhältnis der Überdeckungshöhe zur Stützweite h/s , der Belastungsfrequenz f , der Lastzyklenzahl

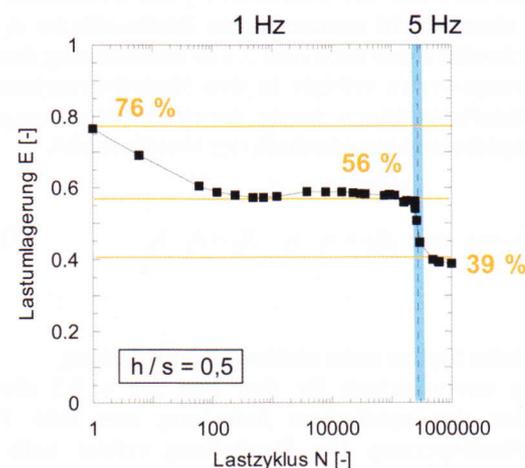


Bild 5. Lastumlagerung im unbewehrten System unter der zyklischen Belastung nach Bild 4
Fig. 5. Efficiency of soil arching for the unreinforced system and cyclic loading conditions according to Fig. 4

N sowie der zyklischen Belastungsamplitude σ_c . Mit abnehmender Höhe, zunehmender Frequenz, zunehmender Zyklenzahl und Belastungsamplitude tritt eine Gewölbereduktion verstärkt ein. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine erhöhte statische Überlagerungsspannung σ_m zu einem Überdrückungseffekt des Gewölbes und einem stabileren Gewölbesystem unter Zyklik führen kann.

In Abhängigkeit der Größe der einwirkenden nichtruhenden Beanspruchung und des Verhältnisses h/s können pragmatisch die in Tabelle 1 dargestellten Bereiche unterschieden werden. Dabei bedeutet der Fall „Gewölbereduktion vernachlässigbar“, dass die zyklische Beanspruchung innerhalb des Tragsystems durch innere Reibungskräfte aufgenommen wird. Für Randbedingungen, die eine Berücksichtigung der Gewölberückbildung erfordern, wird in Kapitel 4 ein analytisches Verfahren beschrieben, mit dem die infolge nichtruhender Beanspruchung erhöhten Spannungen oberhalb der Weichschicht abgeschätzt werden können.

2.3 Ein- bis dreilagig bewehrtes System unter nichtruhender Belastung

Bei Anordnung von Bewehrungslagen sind während der ersten 1000 Lastzyklen ähnliche Effekte zu beobachten wie im unbewehrten Fall. Das bewehrte Bodenpaket wird von oben in die Pfahlköpfe hineingedrückt und es kommt zu einer Scherfugenausbildung im Bereich der Pfahlköpfe. Mit zunehmender zyklischer Belastungsdauer behindern die Geokunststoffe jedoch die weitere Ausbildung der Scherfugen, reduzieren den Einstanzzvorgang und die Setzungen und erhöhen die Lastumlagerung auf die Pfähle, siehe Bild 8 und Bild 9 im Fall von 0 bis 3 gewebten, biaxialen PET-Geogittern mit Zugfestigkeiten von 60 kN/m und einem Geometrieverhältnis von $h/s = 0,5$.

Mit fortschreitender Belastungsdauer werden infolge der Einstanzzbeanspruchung zusätzliche Zugkräfte im Geogitter aktiviert, siehe Bild 10. Die unterste Geokunststofflage ist dabei besonders wirksam. Mit zunehmender Höhenlage verringert sich der Membraneffekt hingegen deutlich. Für eine zweilagige, tiefliegende Bewehrungsführung wurde festgestellt, dass die obere Lage nur etwa 2/3 der unteren Beanspruchung erhält. Bei dreilagiger, tiefliegender Bewehrungsführung ergibt sich im Vergleich zur unteren Lage etwa 2/3 für die mittlere und etwa 1/3 der Beanspruchung für die obere Lage.

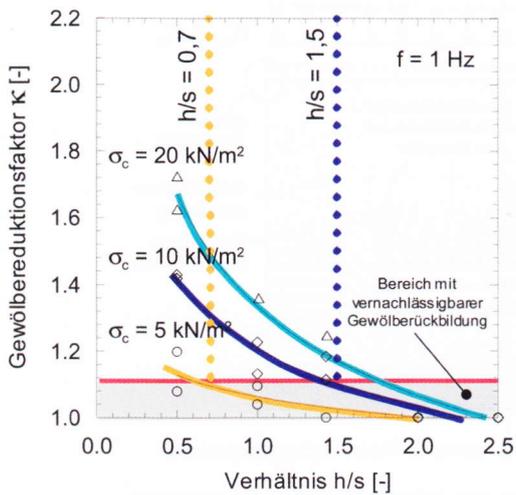


Bild 6. Einfluss der zyklischen Belastungsamplitude σ_c auf den Gewölbereduktionsfaktor κ
 Fig. 6. Influence of load amplitude σ_c on factor of soil arching reduction κ

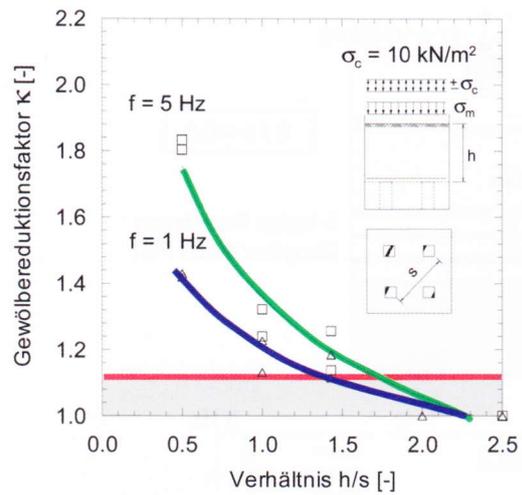


Bild 7. Einfluss der Belastungsfrequenz f auf den Gewölbereduktionsfaktor κ
 Fig. 7. Influence of load frequency f on factor of soil arching reduction κ

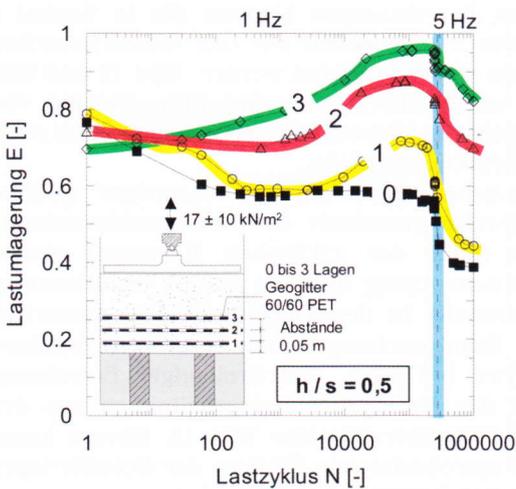


Bild 8. Lastumlagerung im 0- bis 3-lagig bewehrten System für zyklische Belastung nach Bild 4
 Fig. 8. Efficiency of soil arching in case of non- and multi-layered reinforced systems and loading conditions according to Fig. 4

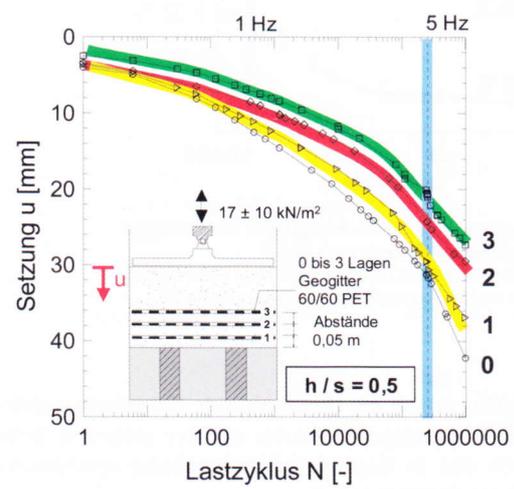


Bild 9. Setzungsakkumulation im 0- bis 3-lagig bewehrten System für zyklische Belastung nach Bild 4
 Fig. 9. Settlement accumulation at the system surface in case of non- and multi-layered reinforced systems and loading conditions according to Fig. 4

Tabelle 1. Näherungsansatz zur Gewölbestabilität in Abhängigkeit der Belastungsamplitude σ_c und des Geometrieverhältnisses h/s
 Table 1. Soil arching conditions depending on load amplitude σ_c and system dimensions h/s

zyklisch-dynamische Beanspruchung	h/s	Gewölbereduktion
groß (in situ $\sigma_c = \pm 30 \text{ kN/m}^2$, „Eisenbahnbeanspruchung“)	$> 1,5$	vernachlässigbar
	$\leq 1,5$	teilweise bis vollständig
mittel (in situ $\sigma_c = \pm 15 \text{ kN/m}^2$, „LKW-Beanspruchung“)	$> 0,7$	vernachlässigbar
	$\leq 0,7$	teilweise

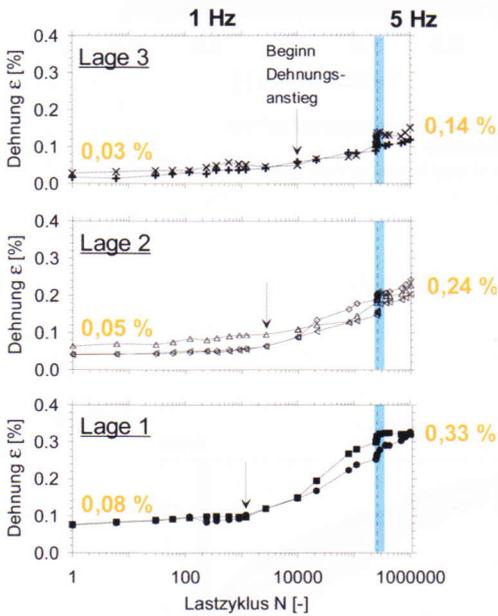
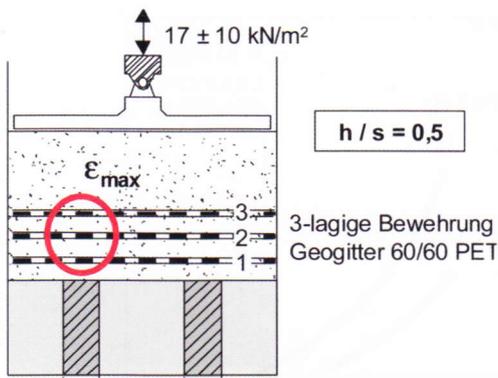


Bild 10. Dehnungszunahme in Bewehrungslagen bei dreilagiger Bewehrung für zyklische Belastung nach Bild 4
 Fig. 10. Strains in geosynthetic reinforcement for a three-layered reinforced system and loading conditions according to Fig. 4

Die im Geogitter durch die nicht ruhende Belastung entstehenden Zusatzdehnungen können auf der sicheren Seite liegend durch das in Kapitel 4 beschriebene analytische Verfahren abgeschätzt werden.

Für mehrlagige Bewehrungsanordnungen konnte die Entstehung eines Verbundeffektes zwischen Geogitter und Füllboden beobachtet werden, der zu einer eher plattenartigen Lastabtragung führte. Hinsichtlich der Geogittereigenschaften wurde festgestellt, dass der erzielte Stabilisierungseffekt insbesondere von der Dehnsteifigkeit der Geogitter abhängig ist. Die Produktstruktur spielt eine untergeordnete Rolle, siehe hierzu auch [6]. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass sich die mittragende Wirkung der Weichschicht unterhalb der untersten Geogitterlage während der zyklischen Belastung verringert.

Zusammenfassend sind in Bild 11 schematisch die Auswirkungen einer nicht ruhenden Belastung auf das Tragsystem dargestellt.

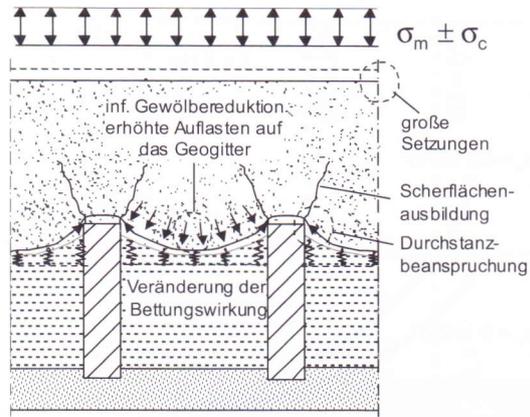


Bild 11. Auswirkungen einer nicht ruhenden Belastung im Tragsystem
 Fig. 11. Effects of cyclic loading on the load transfer mechanisms

3 Numerische Berechnungen zur Gewölbeausbildung am Pfahlrasterausschnitt unter nicht ruhender Belastung

Ergänzend zu den Modellversuchen wurden numerische Analysen mit der Methode der finiten Elemente (FEM) variierend unter statischer Belastung und als zyklische Berechnungen auf Grundlage des zyklisch-viskoplastischen Stoffansatzes nach [7] durchgeführt. Mit Hilfe der numerischen Berechnungen konnten die in Kapitel 2 beschriebenen Mechanismen aus den Modellversuchen bestätigt bzw. weiter präzisiert werden. Bild 12 und Bild 13 zeigen exemplarisch eine Gegenüberstellung von Modellversuchs- und Berechnungsergebnissen eines zwei-dimensionalen Ersatzmodells.

Die numerischen Berechnungen bestätigen qualitativ und teilweise quantitativ die Setzungsakkumulation sowie den unter der zyklischen Belastung eintretenden Einstanzvorgang und den daraus resultierenden Dehnungszuwachs in den Geogittern. Das numerisch berechnete Beanspruchungsverhältnis in den einzelnen Geogitterlagen bei zwei- und dreilagiger Bewehrung stimmt mit den Beanspruchungsverhältnissen aus den Modellversuchen überein, siehe Bild 12. Ebenso konnte der setzungsreduzierende Einfluss der Geogitterlagen unter zyklischen Belastung bestätigt werden.

Bild 14 verdeutlicht qualitativ die Ausbildung des Einstanzkegels oberhalb des Pfahlkopfes infolge einer zyklischen Beanspruchung. Dargestellt ist ein axialsymmetrisches FEM-Modell auf Grundlage des zyklisch-viskoplastischen Stoffansatzes nach [7] sowie die mit Hilfe einer bildbasierenden Messmethode (Particle Image Velocimetry – PIV) für einen kleinmaßstäblichen Modellversuch ermittelte Systemverformung.

Weitergehende Ausführungen zu den numerischen Vergleichsberechnungen können [3] entnommen werden.

4 Analytisches Berechnungsmodell zur Gewölberückbildung bei nicht ruhender Belastung

Mit den in Tabelle 1 definierten geometrischen und zyklischen Randbedingungen werden Systemgrößen vorgeschlagen, die eine statische Berechnung mit den derzeit vorhandenen analytischen Gewölbe-Modellen unein-

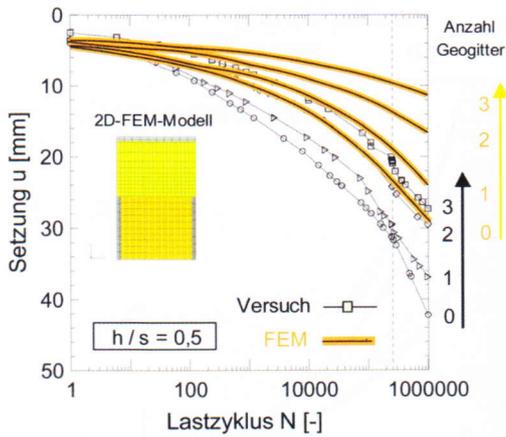


Bild 12. Numerisch berechnete und gemessene Oberflächensetzungen für zyklische Belastung nach Bild 4
Fig. 12. Calculated and measured settlements for loading conditions according to Fig. 4

geschränkt zulassen. Die auf die Weichschicht wirkende vertikale Spannung σ_{z0}^{stat} wird für diese Situationen über das Gewölbemodell nach [2] bzw. [4] bestimmt, siehe Gleichung (3) und Bild 15a.

$$\sigma_{z0}^{stat} = \lambda_1^\chi \cdot \left(\gamma + \frac{\sigma_{stat}}{h} \right) \cdot \left(h \cdot (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} + h_g \cdot \left(\left(\lambda_1 + \frac{h_g^2 \cdot \lambda_2}{4} \right)^{-\chi} - (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} \right) \right) \quad (3)$$

mit: $h_g = \begin{cases} s/2 & \text{für } h \geq s/2 \\ h & \text{für } h < s/2 \end{cases}$ Gewölbhöhe

$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{b_x \cdot b_y}{\pi}}$ Ersatzdurchmesser

$K_{krit} = \tan^2 \left[45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right]$ kritisches Hauptspannungsverhältnis

$$\chi = \frac{d \cdot (K_{krit} - 1)}{\lambda_2 \cdot s}, \quad \lambda_1 = \frac{1}{8} \cdot (s - d)^2, \quad \lambda_2 = \frac{s^2 + 2 \cdot d \cdot s - d^2}{2 \cdot s^2}$$

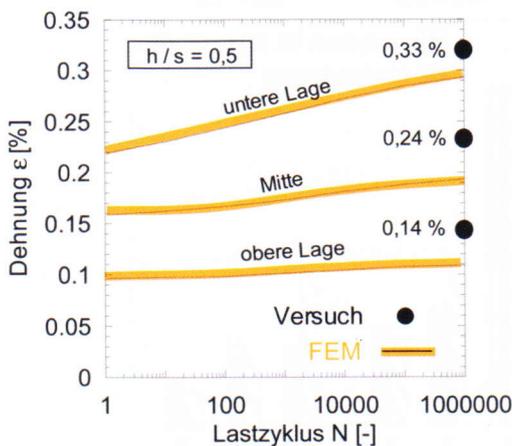


Bild 13. Numerisch berechnete und maximal gemessene Geokunststoffdehnungen für dreilagige Bewehrung und Belastung nach Bild 4
Fig. 13. Calculated and measured geosynthetic strains for a three-layered reinforced system and loading conditions according to Fig. 4

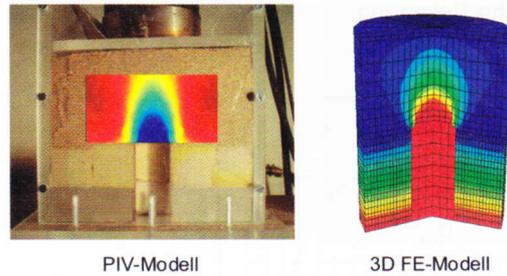


Bild 14. Scherflächenausbildung infolge zyklischer Belastung im PIV- und im FEM-Modell
Fig. 14. Shear zones due to cyclic loading in a PIV- and FEM-model

Für zyklisch-dynamische Randbedingungen, die außerhalb der in Tabelle 1 näherungsweise genannten Gültigkeitsgrenzen liegen, kann Gleichung (3) um den Gewölbereduktionsfaktor κ erweitert werden, zur Herleitung der Gleichung siehe [3]. Die auf die Weichschicht wirkende und infolge Gewölberückbildung erhöhte vertikale Spannung σ_{z0}^{zykl} ergibt sich nach Gleichung (4) und Bild 15b zu:

$$\sigma_{z0}^{zykl} = \frac{(\gamma \cdot h + \sigma_{stat}) \cdot A_E}{A_E - A_S} \cdot \left(1 - \frac{1}{\kappa} \right) + \frac{1}{\kappa} \cdot \left\{ \lambda_1^\chi \cdot \left(\gamma + \frac{\sigma_{stat}}{h} \right) \cdot \left(h \cdot (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} + h_g \cdot \left(\left(\lambda_1 + \frac{h_g^2 \cdot \lambda_2}{4} \right)^{-\chi} - (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} \right) \right) \right\} \quad (4)$$

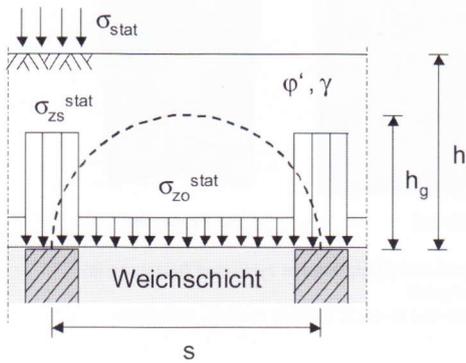
Die über die Zeit veränderliche zyklische Belastung $\sigma_{zykl}(t)$ wird dabei als statische Ersatzlast ($\sigma_{stat} = \sigma_m + \sigma_c$) nach Bild 16 berücksichtigt. Die Bestimmung des in Gleichung (4) enthaltenen Gewölbereduktionsfaktors κ erfolgt mit Hilfe der Diagramme nach Bild 17 bzw. Bild 18 in Abhängigkeit des Verhältnisses h/s sowie der einwirkenden Frequenz f und der Lastamplitude σ_c .

Die Größen der in den Bildern 17 und 18 angegebenen Lastamplituden σ_c (5/10/20 kN/m²) beziehen sich dabei noch auf den Maßstab der Modellversuche (1:3). Für eine Übertragung in die Realität (Maßstab 1:1) sind die Werte der Lastamplituden σ_c um den Faktor „3“ zu vergrößern (15/30/60 kN/m²).

Bild 19 zeigt exemplarisch einen Vergleich von analytisch ermittelten Spannungen oberhalb der Weichschicht nach Gleichungen (3) und (4) mit Modellversuchsergebnissen. Mit Hilfe des Ansatzes nach Gleichung (4) werden die Messwerte auf der sicheren Seite abgedeckt, der bisherige statische Ansatz nach Gleichung (3) führt zu einer Unterschätzung.

Unter Ansatz von σ_{z0}^{stat} und σ_{z0}^{zykl} als äußere ruhende Ersatzbelastung auf die Geogitterlage können die Geokunststoffdehnungen $\varepsilon(\sigma_{z0}^{stat})$ und $\varepsilon(\sigma_{z0}^{zykl})$ mit Hilfe des analytischen Membranmodells nach [2], [5] ermittelt werden. Der auf die nicht ruhende Beanspruchung zurückzuführende Zuwachs $\Delta\varepsilon$ ergibt sich in diesem Fall aus der Differenz der beiden Dehnungsanteile. Bild 20 zeigt eine Gegenüberstellung von Berechnungs- und Versuchsergebnissen. Die Zusatzdehnungen können mit dieser pragmatischen Vorgehensweise auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden.

a) Statische Belastung



b) Zyklisch-dynamische Belastung

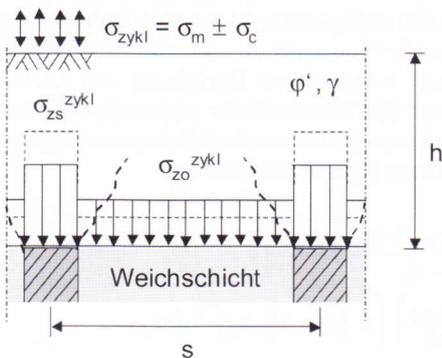


Bild 15. Spannungsverteilung bei (a) statischer und (b) zyklisch-dynamischer Belastung
Fig. 15. Assumed stresses distribution in case of (a) static or (b) cyclic loading

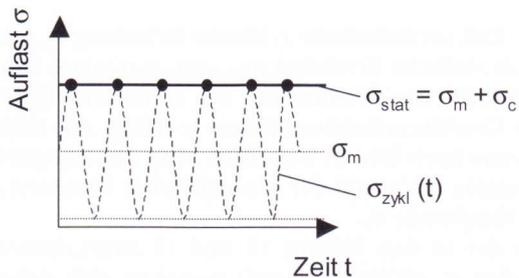


Bild 16. Definition der statischen Ersatzlast
Fig. 16. Definition of equivalent static load

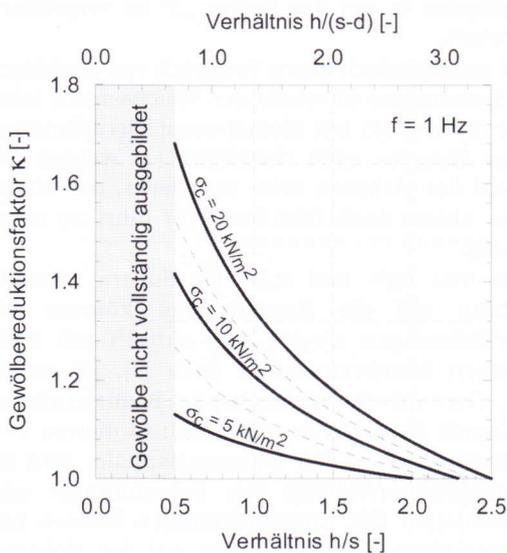


Bild 17. Diagramm zur Bestimmung des Gewölbereduktionsfaktors kappa
Fig. 17. Diagram to determine the factor of soil arching reduction kappa

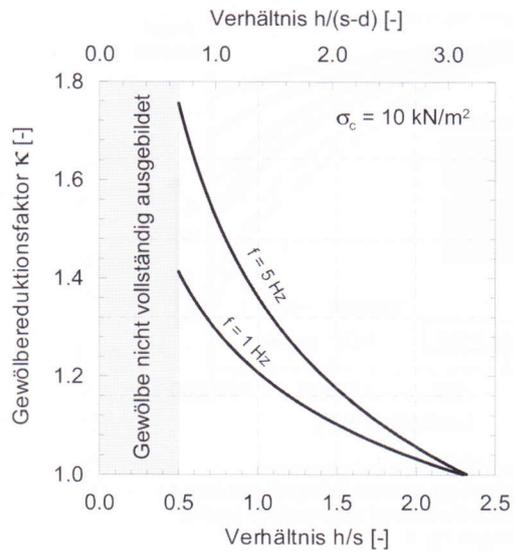


Bild 18. Diagramm zur Bestimmung des Gewölbereduktionsfaktors kappa
Fig. 18. Diagram to determine the factor of soil arching reduction kappa

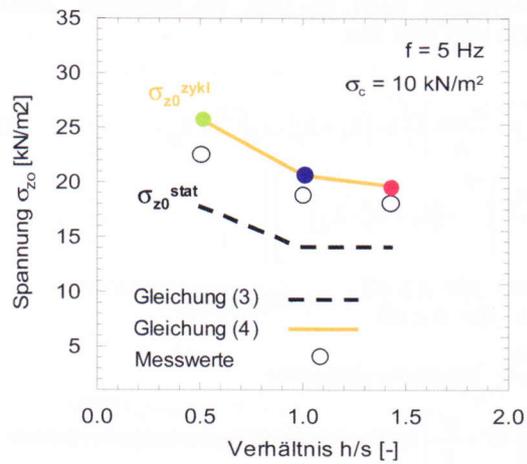


Bild 19. Vergleich von analytisch ermittelten Spannungen nach Gleichungen (3) und (4) mit Modellversuchsergebnissen
Fig. 19. Comparison of equation (3) and (4) and model test results

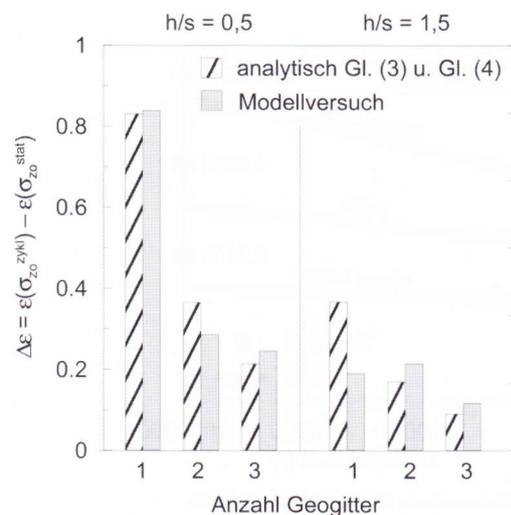


Bild 20. Gemessener maximaler Dehnungszuwachs in der untersten Geogitterlage infolge zyklischer Belastung sowie analytisch ermittelter Dehnungszuwachs
Fig. 20. Measured maximum increase of strains in the lowest geogrid layer due to cyclic loading and calculated strains

386

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durchgeführte großmaßstäbliche Modellversuche und numerische Berechnungen zum Tragsystem „Bewehrte Erdkörper über Pfählen“ zeigen, dass zyklisch-dynamische Belastungen zu einem veränderten Lastabtragungsmechanismus in Form einer Gewölberückbildung im Tragsystem führen können, die mit größeren Systemsetzungen und zusätzlichen Dehnungsbeanspruchungen im Geogitter einhergehen. Aus den Modellversuchen wurden geometrische und zyklische Randbedingungen abgeleitet, die die Anwendbarkeit der bisher existierenden analytischen Gewölbemodelle teilweise einschränken. Mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren steht ein vereinfachter Ansatz zur Berücksichtigung einer Gewölberückbildung und der zu erwartenden zusätzlichen Geogitterdehnung unter nichtruhender Belastung zur Verfügung.

Weiterhin noch nicht abschließend geklärt sind Optimierungen zur Spreizdruckausbildung und -aufnahme bei bewehrten Erddämmen über Pfählen sowie Fragen zur Setzungsabschätzung des Systems im Gebrauchszustand.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit.

Literatur

- [1] Kempfert H.-G.; Stadel M.; Zaeske D.: Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen, Bautechnik Jahrgang 75 (1997), Heft 12, S. 818–825
- [2] Zaeske D.: Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel 2001, Heft 10
- [3] Heitz C.: Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel 2006, Heft 19
- [4] Zaeske D.; Kempfert H.-G.: Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über punkt- und linienförmigen Traggliedern, Bauingenieur 77 (2002), S. 80–86
- [5] *EBGEO: Abschnitt 9: Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern*, (Entwurf), 2007
- [6] Kempfert H.-G.; Heitz C.; Gebreselassie B.: Horizontalbewehrung über Pfählen – Einfluss der Bewehrungslagen und der Produktstrukturen, Tagungsband: Geokunststoff-Kolloquium Januar 2007, Bad Lauterberg, (in Vorbereitung)
- [7] Stöcker T.: Zur Modellierung von granularen Materialien bei nichtruhenden Lasteinwirkungen, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel 2002, Heft 13

Professor Carl-Alexander Graubner 50 Jahre

Am 7. September 2007 feierte Professor Graubner seinen 50. Geburtstag. Geboren und aufgewachsen in München legte er 1976 am Wittelsbacher Gymnasium das Abitur ab und studierte anschließend an der TU München Bauingenieurwesen. Nach dem Abschluss seines Studiums 1982 nahm er eine Assistentenstelle am Lehrstuhl für Massivbau an.

Schon während seiner 6-jährigen Assistentenzeit leistete Graubner in Forschung und Lehre vorzügliche Arbeit. 1987 bestellte ihn die deutsche Bundesbahn als Dozenten für die Weiterbildung auf dem Gebiet des Spannbetonbaues.

In seiner viel beachteten Dissertation zum Thema der Schnittgrößenverteilung in statisch unbestimmten Sahlbetonbalken unter Berücksichtigung wirklichkeitsnaher Stoffgesetze zeigte Graubner, dass der Umlagerung der Biegemomente des Stahlbetondurchlaufträgers enge Grenzen gesetzt sind. Außerdem unterstützte mich Graubner bei meiner Tätigkeit als Prüflingenieur für ungewöhnliche Bauwerke, darunter die teilweise vorgespannte Donaubrücke Donauwörth, entworfen von Schmitt & Stumpf.

Nach einem kurzen Studienaufenthalt in Japan bei der Firma Kajima wechselte Graubner in die Praxis, wo er 1989 zunächst stellvertretender Leiter des Konstruktionsbüros einer Baufirma wurde und 1991 Leiter des technischen Büros der Firma Philipp Holzmann, Held & Franke, Bauaktiengesellschaft München. Ab 1995 war Graubner selbstständig als Beratender Ingenieur tätig und leitete die Tragwerksplanung für zahlreiche Bauvorhaben darunter alle Bauwerke des Projektes Transrapid der Magnetschwebbahn von Hamburg nach Berlin.

Aufgrund seiner fundierten Arbeiten folgte Graubner 1997 dem Ruf an die Technische Universität Darmstadt auf den Lehrstuhl für Massivbau als Nachfolger von Professor König. In zwei gemeinsamen mit Dr. Rossner verfassten Büchern über Spannbetonbauwerke, einem gemeinsam mit Dr. Hüske verfassten Buch über Nachhaltigkeit im Bauwesen und Beiträgen in Handbüchern, wie Beton- und Mauerwerkskalender, hat er den Wissensstand übersichtlich dargestellt. In weiteren 83 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Tagungsbänden sind seine Forschungsarbeiten dokumentiert.

Graubner hält auch als Professor den notwendigen Kontakt zur Praxis. Seit 1997 ist er Prüflingenieur für Baustatik, Fachrichtung Massivbau, seit 1999 Mitglied des Prüfungs- und Berufungsausschusses für Prüflingenieure des Landes Hessen und seit 2001 Partner im Büro König, Heunisch und Partner, Frankfurt.

Professor Graubner kann schon in jungen Jahren auf erstaunliche Leistungen zurückblicken. Für die Zukunft wünscht ihm die Fachwelt weiterhin Gesundheit, Glück und Erfolg, den Erhalt seiner fröhlichen Ausstrahlung und vor allem weiterhin viel Freude im Kreise seiner Lieben.

H. Kupfer, München