

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik
Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Triantafyllidis

Kurzfassung der Diplomarbeit

**Vergleich verschiedener Modelle für
die Prognose der
Langzeitverformungen von
Monopilegründungen für
Offshore-Windenergieanlagen**

Dipl.-Ing. Konrad Josef Westermann

Betreuer: Dr.-Ing. T. Wichtmann
Dipl.-Ing. H. Zachert

24. September 2012

1 Einleitung

Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien entstehen in Deutschland in der Nord- und Ostsee Windparks aus "Offshore-Windenergieanlagen", kurz **OWEA**. Aufgrund der zyklischen Belastungen aus Wind und Wellen kann es zu bleibenden Verformungen und Schiefstellungen der Anlagen kommen. Somit stellt die Gründung dieser Anlagen eine große Herausforderung dar. Die Monopile-Gründung, d.h. eine Pfahlgründung bestehend aus einem einzigen hohlen Stahlrohr mit einem Durchmesser von 5 m und mehr, ist die am meisten verwendete Gründungsvariante. Bereits etablierte Verfahren in der Offshore-Industrie zur Bemessung von Gründungen können aufgrund des wesentlich größeren Verhältnisses aus zyklisch horizontal wirkenden Lasten zum Eigengewicht nicht ohne weiteres angewendet werden. Daneben wurden diese Methoden für wesentlich kleinere Pfahldurchmesser entwickelt, so dass nun mit den OWEA-Gründungen völliges Neuland betreten wird. Für die Prognose der bleibenden Verformungen von OWEA infolge zyklischer Belastung wurden einige neue Modelle an verschiedenen deutschen Universitäten entwickelt, deren Hauptaugenmerk auf der Beschreibung des nichtlinearen Langzeitverformungsverhaltens dieser Gründung liegt.

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Prognosen der verschiedenen Ansätze zur Abschätzung der Langzeitverformungen von OWEA für realitätsnahe Abmessungen, Belastungen der OWEA und Lagerungsdichten des nichtbindigen Bodens miteinander zu vergleichen. Anhand dieses Vergleichs sollten die Qualität und die Grenzen der Ansätze aufgezeigt und herausgearbeitet werden. Dazu wurden folgende Ansätze untersucht:

- *P-y*-Kurven des American Petroleum Institutes (API) [4]
- Ansatz von *Dührkop* (Universität Hamburg-Harburg) [6]
- Ansatz von *Taşan et al.* (Technische Universität Berlin) [9]
- Ansatz von *Achmus et al.* (Leibniz Universität Hannover) [2]
- Ansatz mit Hilfe von Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung und Akkumulationsmodell (KIT)

Für diese Arbeit wurden daher für einen offshore-typischen Feinsand die Eingangsparameter für alle betrachteten Modelle in Laborversuchen ermittelt. Vereinfachend und in Übereinstimmung mit den untersuchten Modellen wurde für den nichtbindigen Boden davon ausgegangen, dass es in Folge der zyklischen Belastung zu keiner Porenwasserdruckakkumulation am Pfahl kommt.

Im Folgenden werden die einzelnen Modelle und deren Umsetzung im Rahmen der Diplomarbeit kurz dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen zusammengefasst. Dabei werden einige Besonderheiten der einzelnen Modelle herausgearbeitet. Abschließend wird ein Fazit aus den Ergebnissen der Diplomarbeit gezogen.

2 Bemessungsmodelle

2.1 API [4]

Das American Petroleum Institute (API) [4] empfiehlt zur Bemessung von horizontal beanspruchten Pfählen bei Offshore-Bauwerken ein Verfahren, welches einen federgebetteten Balken und sog. "P-y-Kurven" verwendet. Dabei wird ein nichtlinearer Ansatz für die Beziehung zwischen der Bettungsreaktionskraft P und der Verschiebung y angesetzt, in Abhängigkeit von der Tiefe unterhalb des Meeresbodens, der Lagerungsdichte sowie dem Pfahldurchmesser.

Eine Berücksichtigung von zyklischen Belastungen findet in diesem Modell nur über einen Abminderungsfaktor der Bettungssteifigkeit für monotone Belastungen statt. Dies erscheint sehr einfach und gilt nur für Pfahldurchmesser kleiner 2 m als validiert.

Das Vorgehen nach API wurde mit Hilfe des Programms *Mathematica* automatisiert. Dazu wurde ein Skript entwickelt, welches die horizontale Verformung eines Pfahls in Folge einer am Pfahlkopf angreifenden und zyklisch wirkenden Horizontalkraft H_0 berechnet.

2.2 Ansatz von Dührkop [6]

An der Universität Hamburg-Harburg wurde von Dührkop [6] (siehe auch Dührkop et al. [7]) eine Modifikation des P-y-Verfahren nach API entwickelt. Diese Modifikation basiert auf Ergebnissen aus kleinmaßstäblichen 1g-Modellversuchen an zyklisch belasteten Monopiles[6]. Der Abminderungsfaktor für zyklische Belastungen nach API wurde modifiziert und an den Modellversuchsergebnissen kalibriert.

Das Vorgehen nach Dührkop wurde im Rahmen der Diplomarbeit ebenfalls in einem *Mathematica*-Skript implementiert.

2.3 Ansatz nach Taşan et al. [9]

Das Modell von Taşan et al. [9] basiert auf dem sog. "Strain-Wedge-Modell", kurz: **SWM**, welches von Norris [8] erstellt und von Ashour et al. [5] weiterentwickelt wurde. Dieses Modell wurde dann von Taşan et al. [9] für zyklische Lasten erweitert. Ziel des (E)SWM ist es, das komplexe Problem der dreidimensionalen Spannungs-Dehnungsbeziehung im Boden auf ein einfacheres, eindimensionales Problem der Pfahl-Boden-Wechselwirkung zu reduzieren, welches dann mit gewöhnlichen Lösungsverfahren für den auf elastischen Federn gebetteten Balken gelöst werden kann.

Auch das ESWM wurde in Form eines *Mathematica*-Skriptes umgesetzt. Die Parameter des ESWM wurden für den betrachteten Feinsand durch aufwändige Reihen an Laborversuchen mit monotoner und zyklischer Belastung bestimmt.

2.4 Ansatz von *Achmus et al.*[3]

Achmus et al. [3] haben an der Leibniz Universität Hannover ein Modell zur Prognose der bleibenden Verformungen zyklisch horizontal belasteter Monopiles entwickelt, bei dem die Steifigkeit des Bodens in Abhängigkeit der zyklischen Belastung reduziert wird. Dieses sog. "Stiffness Degradation Model", kurz: SDM, soll dazu dienen, FE-Berechnungen mit einem elastoplastischen Stoffmodell und die in zyklischen Triaxialversuchen gemessene Verformungsakkumulation zu kombinieren, um damit das Verformungsverhalten von OWEA-Gründungen abzuschätzen. Neben der Zyklenanzahl N berücksichtigt die Steifigkeitsabminderung auch das Verhältnis aus der maximalen Spannung während der Zyklen und der Scherfestigkeit des Bodens. Das SDM wird in einer 3D-FE-Analyse des Monopiles verwendet.

Das Verfahren nach *Achmus et al.* [1] wurde im Rahmen der Diplomarbeit mit Hilfe eines eigens dafür geschriebenen "User-Material" umgesetzt, welches über das Programm ABAQUS für eine 3D-FE-Berechnung einer Monopile-Gründung verwendet werden kann. Dabei wurde neben einem elastoplastischen Stoffgesetz mit einer Fließfläche nach *Drucker-Prager* alternativ auch ein elastisches Stoffgesetz ohne Plastizität implementiert.

Die Parameter für die Steifigkeitsabminderung im SDM wurden aus zyklischen Triaxialversuchen am Feinsand abgeleitet, wobei der von *Achmus et al.* beschriebene Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die bleibende Dehnung bei zyklischer Belastung nicht bestätigt werden konnte.

2.5 Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung und Akkumulationsmodell (HIA)

Am Institut für Boden- und Felsmechanik des KIT werden zur Beschreibung des hochgradig nichtlinearen Bodenverhaltens Stoffgesetze verwendet. Durch systemunabhängige Verwendbarkeit dieser Stoffgesetze kann jedes beliebige Boden-Gründungs-System untersucht werden. Weiterhin müssen keine Vereinfachungen oder Einschränkungen wie bei den in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Ingenieurmodellen vorgenommen werden. Für die Untersuchung von OWEA-Gründungen werden am IBF ein hypoplastisches Stoffmodell, welches um die sog. intergranulare Dehnung für Bereiche kleiner Dehnung erweitert wurde und ein speziell für hochzyklische Belastungen entwickeltes Akkumulationsmodell verwendet. Diese Kombination von Stoffmodellen wird im Folgenden mit HIA bezeichnet.

Das HIA liegt am IBF bereits in Form einer benutzerdefinierten Stoffroutine für ABAQUS (*User-Material*) vor und konnte direkt für die Diplomarbeit verwendet werden. Es musste jedoch ein FE-Modell der OWEA-Gründung erstellt werden. Die aus zahlreichen monotonen und zyklischen Versuchen abgeleiteten Parameter der HIA-Stoffmodelle für den Feinsand lagen bereits vor.

3 FE-Modell

Für die Anwendung des SDM und des HIA wurde ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell benötigt. Dieses sollte die Gründung der OWEA, also den Monopile sowie den ihn umgebenden Baugrund abbilden. Dabei musste sichergestellt sein, dass die Lösung der Berechnung weder durch Randeinflüsse noch durch eine unzureichende Diskretisierung des FE-Netzes beeinflusst wird. Das aus einer Optimierung hervorgegangene FE-Modell, welches für die Vergleichsrechnungen in dieser Arbeit verwendet wurde, ist in den Bildern 1 und 2 dargestellt.

4 Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Für den Vergleich der Modelle wurden insgesamt 27 Kombinationen von Belastungen und Anfangslagerungsdichten untersucht. Für jede Kombination wurden stets 100.000 Lastzyklen berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass die Modelle nach API, *Dührkop* und das ESWM lediglich die maximalen Belastungen M_{max} und H_{max} während eines Zyklus als Eingangsgrößen verwenden und eine vollständige Entlastung während des Zyklus voraussetzen (d.h. $M_{min} = M_{av} - M_{ampl} = 0$), wurde ein Großteil der Belastungskombinationen so gewählt, diese Anwendungsvoraussetzung der Modelle erfüllt ist.

In Bild 3 sind beispielhaft die aus den Berechnungen mit den verschiedenen Modellen erhaltenen Biegelinien für drei unterschiedliche Belastungskombinationen und die gleiche Lagerungsdichte des Bodens dargestellt.

Generell lassen sich folgende Schlüsse aus den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen ziehen:

- Wie erwartet liefern die P - y -Kurven des API die geringsten Verformungen im Vergleich zu allen anderen Modellen, aufgrund der einfachen Berücksichtigung von zyklischen Belastungen über die Reduzierung des Bettungsmoduls um einen konstanten Faktor. Hierdurch kommt es unabhängig von der Belastung und der Lagerungsdichte des Bodens zu einer Zunahme der Verformungen infolge der zyklischen Belastung von rund 2% gegenüber einer statischen Belastung. Obwohl die API-Kurven immer noch weltweit als einer der Standards für die Ermittlung der horizontalen Tragfähigkeit von Pfählen gelten, muss die Eignung für die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit von zyklisch horizontal belasteten Pfählen mit großen Pfahldurchmessern auf Basis der Berechnungsergebnisse stark angezweifelt werden.
- Das Modell von *Dührkop* [6] prognostiziert in etwa eine um 50% größere Pfahlkopfverformung als das statische Vorgehen nach API. Damit liegen die Pfahlkopfverschiebungen zwar unterhalb der Werte nach HIA, jedoch in einer ähnlichen Größenordnung wie die des SDM nach *Achmus et al.*. Die Pfahlkopfverdrehungen nach *Dührkop* sind häufig sehr ähnlich wie nach HIA oder SDM, da der Pfahl nach *Dührkop* eine starke Krümmung im oberflächennahen Bereich erfährt.

- Das SDM von *Achmus et al.* prognostiziert im Vergleich zur Vorgehensweise nach Dührkop recht große Pfahlkopfverschiebungen, die nur für den Fall einer Belastung mit großem Mittelwert stark von der Prognose des HIA abweichen. Dabei ist im SDM, ebenso wie im ESWM nach *Taşan et al.* der Anteil aus akkumulierten Verformungen infolge der zyklischen Belastung im Verhältnis zur statischen Verformung recht groß (bis zu 140 % beim SDM, bis zu 170 % beim ESWM).
- Das ESWM liefert für die geringen Lagerungsdichten von $I_D = 0,4$ und $I_D = 0,6$ die mit Abstand größten Verformungen aller Modelle, auch dank der hohen Zuwächse infolge der $N = 10^5$ Zyklen.
- Im HIA betragen die Verformungszuwächse infolge der zyklischen Belastung in keinem der berechneten Beispiele mehr als 65 % der statischen Verschiebung. Damit resultieren die vergleichsweise großen Verformungen, die mit dem HIA prognostiziert werden, nicht primär aus der Verformungsakkumulation infolge zyklischer Belastung, sondern im Wesentlichen aus der statischen Belastung. Somit beeinflusst die für die Berechnung der statischen Belastung verwendete Hypoplastizität über ein relativ weiches Bodenverhalten die Gesamtverformung stärker als das für die hochzyklische Belastung verwendete Akkumulationsmodell.

5 Fazit

Wie anhand der in dieser Arbeit durchgeführten Vergleichsrechnungen festgestellt werden konnte, gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den Prognosen verschiedener Modelle für die Langzeitverformung von Monopilegründungen für Offshore-Windenergieanlagen. Da jedoch bisher keine Messdaten zur Validierung der Modellprognosen vorliegen, kann eine abschließende Beurteilung der Prognosemodelle in Hinblick auf ihre Tauglichkeit und Prognosequalität nicht erfolgen. Zum Teil liefern jedoch schon einfache Bettungsansätze ähnliche Ergebnisse wie aufwendige 3D-FE-Berechnungen mit hoch entwickelten Stoffgesetzen. Allerdings sind die bisher vorgeschlagenen einfachen Ansätze hinsichtlich der Belastungen, welche mit diesen Modellen berechnet werden können, relativ stark limitiert.

A Inhalt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bemessungsmodelle	2
2.1	API [4]	2
2.2	Ansatz von <i>Dührkop</i> [6]	2
2.3	Ansatz nach <i>Taşan et al.</i> [9]	2
2.4	Ansatz von <i>Achmus et al.</i> [3]	3
2.5	Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung und Akkumulationsmodell (HIA) .	3
3	FE-Modell	4
4	Ergebnisse der Vergleichsrechnungen	4
5	Fazit	5
A	Inhalt	6
B	Literatur	7
C	Erläuternde Darstellungen	8

B Literatur

Literatur

- [1] M. Achmus. Bemessung von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen. *Bautechnik*, 88(9):602–616, 2011.
- [2] M. Achmus, K. Abdel-Rahman, and Y.-S. Kuo. Design of monopile foundations for offshore wind energy converters. In Z. Mlynarek, Z. Zikora, and E. Dembicki, editors, *Geotechnics in Maritime Engineering, Proc. of 11th Baltic Sea Geotechnical Conference*, volume 1, pages 463–470, 2008.
- [3] M. Achmus, Y.-S. Kuo, and A. Abdel-Rahman. Zur Bemessung von Monopiles für zyklische Lasten. *Der Bauingenieur*, 83:303–311, 2008.
- [4] API American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design. API RP 2A - WSD, Washington DC, USA, 2000.
- [5] M. Ashour and G. Norris. Modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 126(5):420–428, 2000.
- [6] J. Dührkop. Zum Einfluss von Aufweitungen und zyklischen Lasten auf das Verformungsverhalten lateral beanspruchter Pfähle in Sand. Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Heft Nr. 20, 2009.
- [7] J. Dührkop. Zyklisch horizontal belastete Offshore-Monopiles. In *Workshop "Gründung von Offshore-Windenergieanlagen", Karlsruhe 2010, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Heft Nr. 172*, pages 209–223, 2010.
- [8] G.M. Norris. Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis. In *Proc. 3rd Int. Conf on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, France*, pages 361–386, 1986.
- [9] H.E. Taşan, F. Rackwitz, and R. Glasenapp. Ein Bemessungsmodell für Monopilegründungen unter zyklischen Horizontallasten. *Bautechnik*, 88(5):301–318, 2011.

C Erläuternde Darstellungen

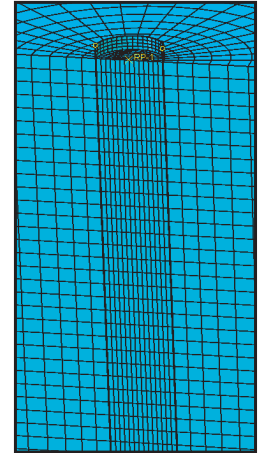
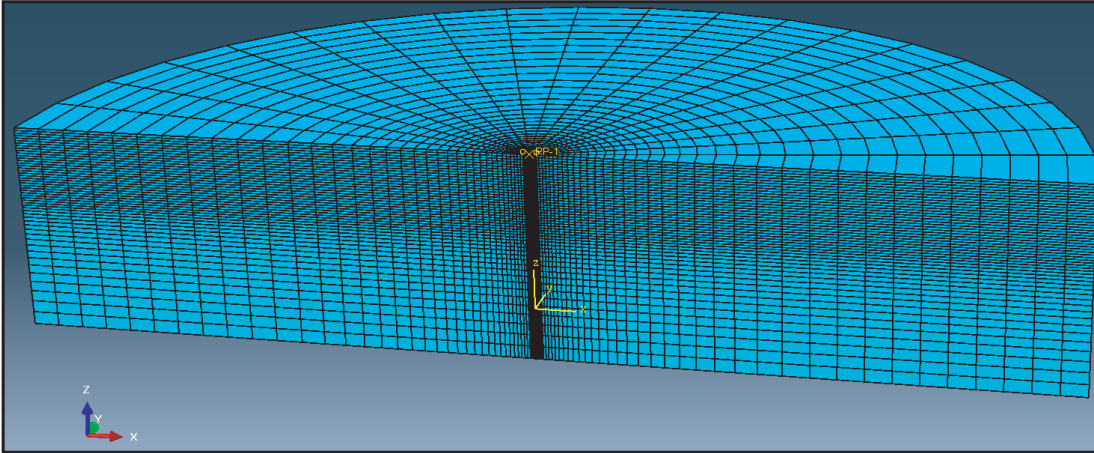


Bild 1: Ansicht des verwendeten FE-Modells

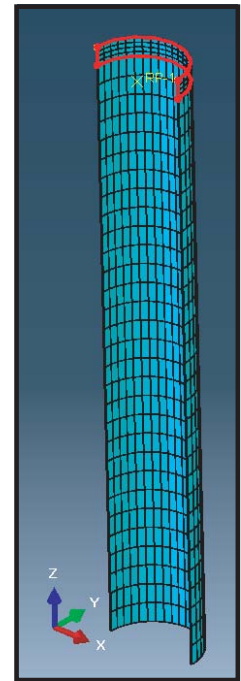
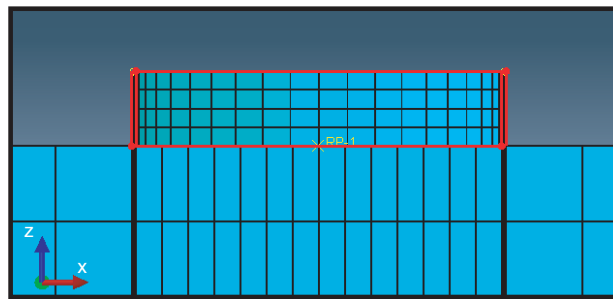
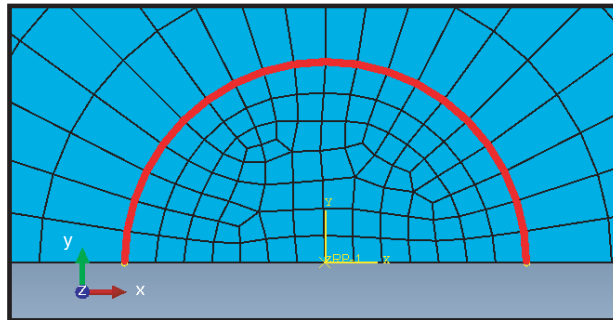
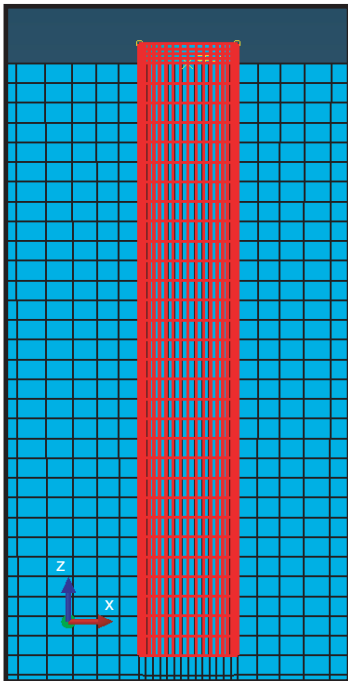


Bild 2: Detailansicht des verwendeten FE-Modells

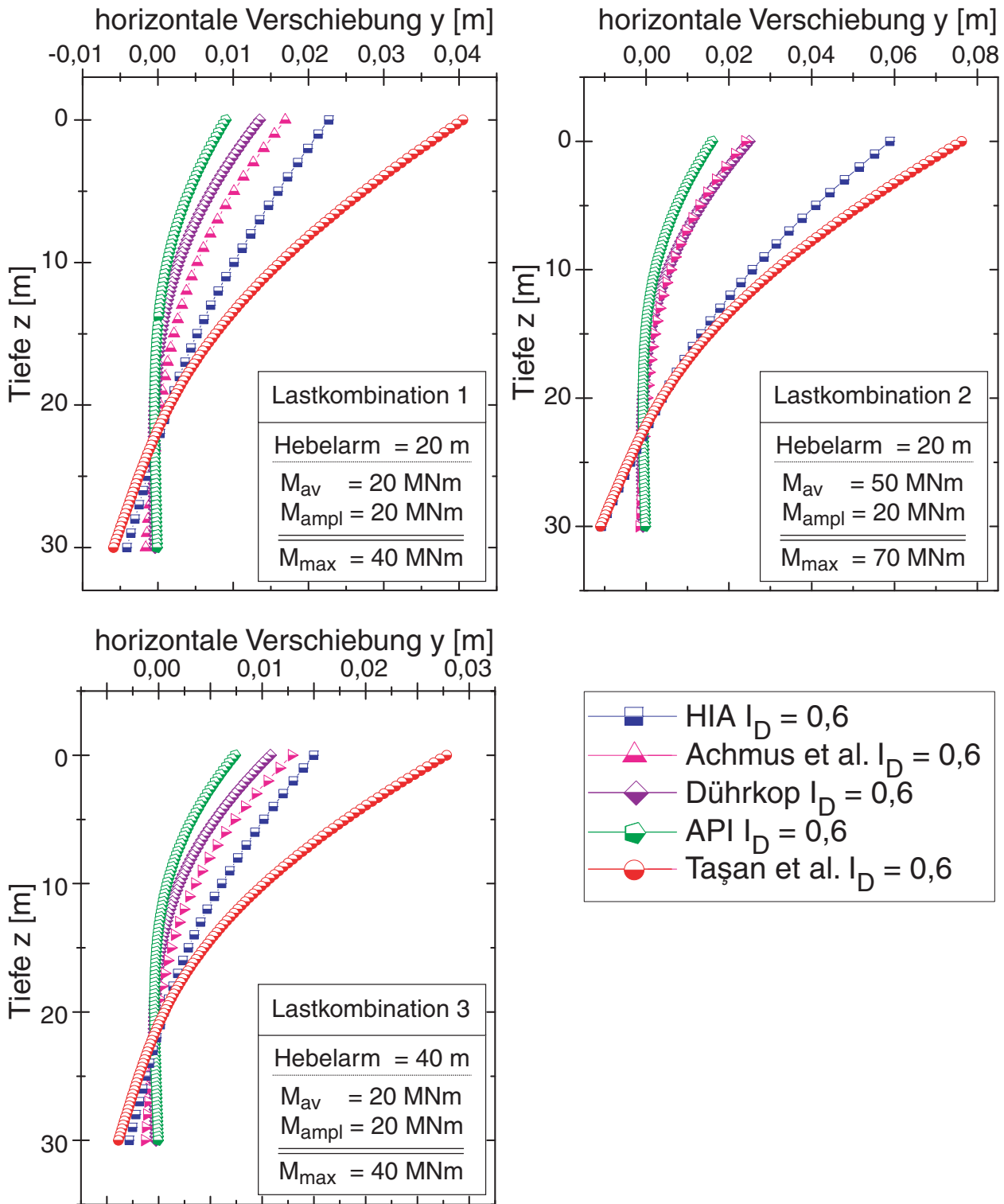


Bild 3: Vergleich der Biegelinien aus allen Modellen für die drei Lastkombinationen bei einer mittleren Lagerungsdichte von $I_D = 0,6$