

Mathematische Modellbildung zur Befahrbarkeitssimulation einer mobilen Tiefsee-Arbeitsmaschine

P. Melcher, Siegen, BRD

A mathematical model for the simulation of the trafficability of mobil deep-sea mining vehicles

Abstract. The demand for a systematic mining of deep-sea ores, as for instance manganese nodules, by means of self-propelled underwater manipulators, leads to the difficult problem of the trafficability of the deep-sea floor. This article introduces a mathematical model for simulating the trafficability of a remote-controlled collector. The example of a specified active collector for large-scale mining manganese nodules, will serve to illustrate and explain the hypotheses and assumptions at the basic of this model, i.e. as concerns the soft-soil mobility, the vehicular propulsion system and the caterpillar tracks, as well as the operating situations. By means of a system of forces which has been transformed into a system of coordinates, the interrelations between the deep-sea bed and the four caterpillar tracks will be summed up in an algorithm. The most interesting working and operating situations will then be tested during a computer-controlled simulation. Finally it will be shown that there are further possible variants of the introduced model.

Zusammenfassung. Die Forderung nach dem systematischen Gewinnen von Tiefsee-Erzen, wie beispielsweise Manganknollen, mit selbstfahrenden Arbeitsmaschinen führt auf das schwierige Problem der Befahrbarkeit (Traffikabilität) des Tiefseebodens. Im vorliegenden Beitrag wird ein mathematisches Modell zur Befahrbarkeitssimulation einer ferngesteuerten Sammelmachine vorgestellt. Am Beispiel eines, als Konstruktionsentwurf spezifizierten, aktiven Manganknollenkollektors im großtechnischen Maßstab werden die Modellannahmen und Voraussetzungen für den zugrundeliegenden Tiefseeboden, das Fahrwerk und die betrachteten Betriebszustände und Lastsituationen beschrieben. Mit Hilfe eines koordinatentransformierten Kräftesystems werden die Wechselbeziehungen zwischen Tiefseeboden und einem Vierraupen-Fahrwerk in einem Algorithmus zusammengefaßt. Als Anwendungsbeispiele werden mittels EDV-Programmierung interessierende Betriebszustände und Lastsituationen simuliert. Abschließend werden weitere Modellvarianten aufgezeigt.

Formelzeichen

<i>a</i>	Abstand	m
<i>b</i>	Breite	m
<i>c</i>	Beiwert	–
<i>d</i>	Differentialoperator	–
<i>h</i>	Höhe	m
<i>i</i>	Zahnanzahl einer Aufstandslänge	–
<i>l</i>	Länge	m

<i>r</i>	Zählvariable	–
<i>s</i>	Streifendicke	m
<i>v</i>	Geschwindigkeit	m/s
<i>w</i>	Wassergehalt	–
<i>x, y, z</i>	Koordinaten im geobezogenen System	–
<i>A</i>	Fläche	m ²
<i>C</i>	Koeffizient	–
<i>F</i>	Kraft	N
<i>J</i>	Raupenzahl	–
<i>M</i>	Moment	Nm
<i>N</i>	Grenznormalspannung	N/cm ²
<i>R</i>	Radius	m
<i>S</i>	Spurweite	m
<i>T</i>	Teilung	m
<i>X, Y, Z</i>	fahrzeugbezogene Koordinaten	–
<i>α</i>	Steigungswinkel	grad
<i>β</i>	Querneigungswinkel	grad
<i>ρ</i>	Dichte	kg/m ³
<i>σ</i>	Drucknormalspannung	N/cm ²
<i>τ</i>	Schubspannung	N/cm ²
<i>φ</i>	Scherwinkel	grad
<i>ψ</i>	horizontaler Strangwinkel	grad
<i>Γ</i>	Verformungsgrad	–
<i>Δ</i>	Differenz	–
<i>Θ</i>	Strangwinkel gegen Lot	grad
<i>Σ</i>	Summe	–
<i>Φ</i>	Bodenreibungswinkel	grad
<i>Ω</i>	Kurswinkel	grad

Indizes

<i>a</i>	außen
<i>b</i>	Boden
<i>c</i>	kohäsionsbezogen
<i>f</i>	Fuß
<i>g</i>	Grund
<i>j</i>	Zählvariable
<i>jj</i>	Raupenzählindex
<i>k</i>	Kurve
<i>m</i>	mittel
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>n</i>	nenn
<i>o</i>	Ausgangswert
<i>p</i>	projiziert
<i>w</i>	Wasser

x, y, z	geobezogene Koordinaten
A	Aufstandsfläche
FW	Fahrwerk
FR	Fahr-raupe
G	Gewicht
Grenz	Grenzwert
H	horizontal
K	Kollektor
L	Lot
R	Rest
S	Schervorgang
W	Widerstand
ZN	Zahn
X, Y, Z	fahrzeugbezogene Koordinaten

Sonderzeichen und Symbole

$()$	Maximalwert
$()$	Mittelwert
$()$	Summationsvariable
$()$	Geradeausfahrt
$()$	Kurvenfahrt
$()^{(1)}$	auf den Gewichtswiderstand bezogene Größe
$()^{(2)}$	auf den Schneidwiderstand bezogene Größe
$()^{(3)}$	auf den Schleppwiderstand bezogene Größe
$()^{(4)}$	auf den Strömungswiderstand bezogene Größe
$()^{(5)}$	auf den Bodenwiderstand bezogene Größe
$()^*$	koordinatentransformierte Größe
$()'$	Größe nach Abzug des Auftriebs im Wasser

1 Einleitung

Obwohl der Rohstoffbedarf und die Preisentwicklung auf den Metallmärkten geradezu gegenläufig eingetreten sind, wie es vor noch zehn Jahren prognostiziert wurde, ist das Interesse an Tiefsee-Erzen wieder etwas gestiegen. Dies liegt neben der allgemeinen Weiterentwicklung der Forschung auf diesem Gebiet auch daran, daß einige Industrieländer durch Zeichnung des Seerechtsvertrages Aktivitäten zeigen. So wird derzeit beispielsweise ein deutsch-französisches Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit der Industrie und mehreren Hochschulinstituten zur Technologieentwicklung des Tiefseebergbaues auf Manganknollen mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

Für den in seinen Anfängen befindlichen Tiefseebergbau erhebt sich die Frage nach der Konkurrenzfähigkeit der neuen Abbau- und Verhüttungstechnologien der Wertmetalle Nickel, Kupfer und Kobalt zu den konventionellen Technologien auf der Basis des Landbergbaus [1]. Die großtechnische Förderung von Manganknollen stellt eine besondere Herausforderung an die Ingenieurwissenschaften dar. Daher wird in der vorliegenden Abhandlung das Problem der Befahrbarkeit des extrem weichen Tiefseebodens mit selbstfahrenden Arbeitsmaschinen betrachtet. Dabei ist der Kollektor eine wesentliche Komponente des Gesamtsystems zur Gewinnung und Förderung von Manganknollen, das am Institut für Konstruktion der Universität Siegen entwickelt wird (Bild 1).

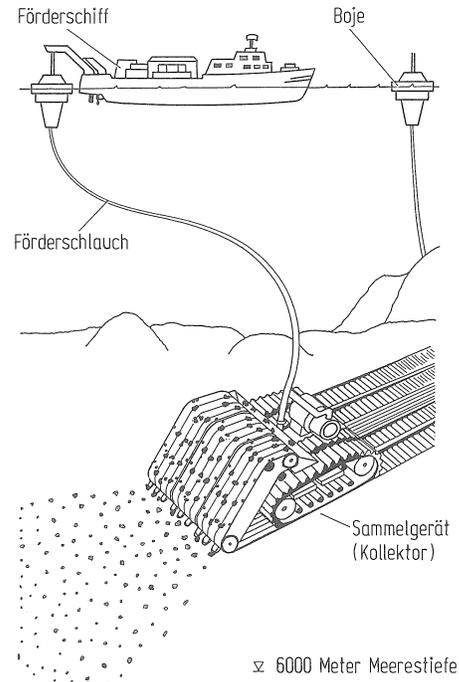


Bild 1. Manganknollen-Fördersystem

Zur Tragfähigkeit des in den 4000 m bis 6000 m Tiefe liegenden und überwiegend schlammartigen sedimentbedeckten Meeresbodens sind die maßgebenden Einflußgrößen und theoretischen Grundlagen in [2] erarbeitet worden. In diesem Beitrag wird ein Befahrbarkeits-Algorithmus vorgestellt, nach dem theoretisch unzulässige Lastsituationen und -kombinationen vorausberechnet werden. Für praktische in situ-Versuche zur Überprüfung der Annahmen und zur Korrektur des Algorithmus fehlen derzeit noch die Voraussetzungen. Mit Hilfe eines modular aufgebauten Rechenprogrammes können aber zunächst theoretisch interessante Parameterstudien und Befahrbarkeitssimulationen durchgeführt werden.

2 Problemstellung

Ein möglichst effizienter großtechnischer Abbau von flächig verteilten Tiefsee-Erzen wie Manganknollen, erfordert ein systematisches Befahren des Meeresbodens. Die Lösung des Befahrbarkeitsproblems weicher Tiefseeböden mit selbstfahrenden Arbeitsmaschinen auf Raupenfahrwerken ist in mehrfacher Hinsicht schwierig. Der schlammartige Tiefseeboden hat nur eine äußerst geringe Tragfähigkeit, woraus sich die Forderung nach einer möglichst geringen mittleren Bodenpressung unter den Fahrwerksaufstandsflächen ergibt. Dieser Bodendruck darf aber nicht beliebig klein gewählt werden, damit die notwendigen Traktionskräfte noch aktiviert werden können. Da die Scherfestigkeit des Bodens in Tiefenrichtung ansteigt, sind große Einsinktiefen der Fahr-raupen anzustreben. Realistische Raupen- und

Fahrwerkskonstruktionen setzen dieser Strategie jedoch Grenzen.

Unter Berücksichtigung aller interessierenden Umgebungsbedingungen und Einflußgrößen basiert das hier betrachtete Kollektorkonzept auf der Mitführung aller vor Ort notwendigen mechanischen Einrichtungen auf dem Kollektorfahrzeug. Gegenüber anderen Konzepten mit räumlich oder zeitlich verteilter Funktionenrealisierung kann hiermit die Forderung nach einem mobilen Stetigförderer verwirklicht werden. Gleichzeitig wird eine größtmögliche Systemanpassung an die vorhandene Bodenstruktur bei frei wählbarer Abbaustrategie erreicht. Nachteilig ist hierbei allerdings, daß die technische Gestaltung des Kollektors ziemlich komplex ausfällt und die mitzuführenden Aggregate, wie insbesondere die für die Förderung erforderliche Pumpenanlage, zusätzliche Gewichtsbelastungen bewirken. Hinsichtlich einer möglichst gleichmäßigen Lastverteilung bei hinreichender Fahrgeschwindigkeit, Vortriebskraft und Geländegängigkeit wird ein großflächiges Raupenfahrwerk gegenüber anderen möglichen Fahrwerksformen [3, 5, 6, 7] für günstiger erachtet. Die fördertechnischen Baugruppen des Kollektors bestimmen entscheidend die Gestaltung des Fahrwerkes und damit auch dessen Belastungen. Die wichtigsten mechanischen Baugruppen und deren Anordnung auf dem Kollektor sind im Bild 2 dargestellt.

Ein selbstfahrender bodengängiger Kollektor benötigt ein geeignetes Fahrwerk, das den topographischen Gegebenheiten des Meeresbodens in der interessierenden Region angepaßt ist. Das gelenkige Tragwerk mit seinem Antriebs- und Lenksystem muß insbesondere den außerordentlich schwierigen bodenmechanischen Bedingungen Rechnung tragen. Der schlammige, wenig tragfähige Tiefseeboden ist der Ansatzpunkt erster Überlegungen zur Beherrschung der Fortbewegungstechnik auf dem Meeresgrund [3–6].

Für den beschriebenen Kollektor wird ein System von Traffikabilitätsbedingungen aufgestellt: Der Kollektor befährt den Boden mit der vorhandenen Grobtopographie in jeder beliebigen Richtung, wobei die Gebietsanteile mit Ge-

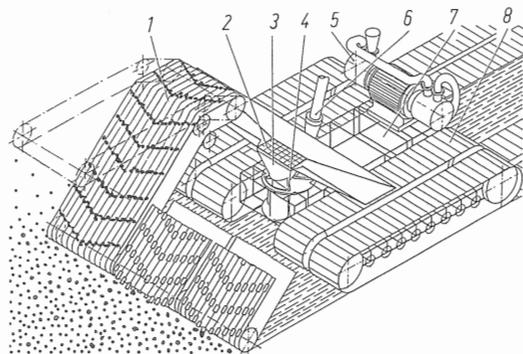


Bild 2. Manganknollenkollektor; 1 Aufnahmeeinrichtung, 2 Grobkornabscheider, 3 Zuführeinrichtung, 4 Fördergut - Einschleuse-aggreat, 5 Klarwasser - Förderpumpenaggreat, 6 Förderschlauch mit Gelenkansschluß, 7 Tragwerk, 8 Fahrwerk

ländeneigungen und -steigungen von mehr als 10% ausgenommen werden sollen. Dabei wird angenommen, daß die anzutreffende Bodenfestigkeit nicht unterhalb der in den Modellannahmen definierten Sumpfgrenze liegt. Diejenigen Gebietsanteile, in denen die Bodenfestigkeit diese Sumpfgrenze unterschreitet, können nicht befahren werden. Nicht überwindbare Einzelhindernisse, wie herausragende Felspitzen, Wracks und ähnliches, müssen umfahren werden. Die Befahrbarkeit des Tiefseebodens ist unter den angegebenen Einschränkungen gegeben, wenn das Kollektorfahrzeug zumindest theoretisch noch hinreichend manövrierfähig ist und dabei die maximal zulässige Einsinktiefen der Raupen an keiner Stelle überschritten wird.

Die Bestimmung der größten örtlichen Einsinktiefen soll unter Berücksichtigung der jeweiligen Lastkombination und der Minderung der Bodenfestigkeit infolge der vertikalen und horizontalen Bodenverformungen vorgenommen werden. Hierzu wird im weiteren ein Algorithmus aufgestellt. Ausgehend von mechanischen Betrachtungen über die am Kollektor angreifenden äußeren Kräfte und Momente, deren Resultierende in Auflasten der konstruktionsbedingten Teilaufstandsflächen überführt werden, wird die Einsinktiefen anhand der Wechselbeziehungen zwischen Raupenfahrwerk und Boden bestimmt. Für ein noch zu entwickelndes automatisches Fahrzustands-Überwachungs-System, bei dem die aktuellen Bodenkennwerte on-line einzuspeisen wären, kann der Algorithmus als theoretische Grundlage herangezogen werden. In jedem Fall sind aber noch experimentelle Untersuchungen zur Überprüfung und Korrektur der Theorie erforderlich, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht behandelt werden konnten.

3 Mathematisches Modell

Zur Gewinnung von Aussagen über die Befahrbarkeit des Tiefseebodens für die betrachtete selbstfahrende Arbeitsmaschine eignet sich ein mathematisches Modell, in dem die relevanten Beziehungen in der Weise verknüpft sind, daß die erforderlichen Iterations- und Berechnungsabläufe mit einem EDV-Programm vollzogen werden können. Die Ziele der Modellrechnungen sind darauf ausgerichtet, daß für vorgegebene Betriebszustände des Kollektorfahrzeuges die jeweilige Belastungskombination des Bodens ermittelt und die daraus resultierende maximale Einsinktiefen berechnet wird. Hierbei wird davon ausgegangen, daß im allgemeinen Fahrbetrieb neben Lenkbewegungen auch Kurvenfahrten durchgeführt werden. Die Grenzen der Traffikabilität sind erreicht, sobald das Fahrzeug die maximal zulässige Einsinktiefen im Boden unter einem der vier Raupenquadranten erreicht hat und/oder die angreifenden äußeren Kräfte zur Überschreitung der Grenztraktionsfähigkeit des Bodens führen.

3.1 Voraussetzungen und Modellannahmen

Im folgenden werden die für die mathematische Modellbildung erforderlichen Voraussetzungen und Annahmen be-

Tabelle 1. Physikalische Eigenschaften des Tiefseebodens nach Daten von [10, 16, 17]

Durchschnittl. Vorkommen %	Sedimenttyp	Korngrößenbereich μm	Mittlere Korngröße μm	Mittlere Raumdichte (naß) kg/dm^3	Mittlerer Wassergehalt	Mittlere Porosität %	Scherfestigkeit nach Keller N/cm^2
38	Tiefseeton	0,5 – 2,45	0,97	1,41	1,26	75	< 0,35
14	Radiolarienschlamm	1,07 – 3,44	1,99	1,17	3,41	88	0,35 – 0,7
48	Kalkschlamm	1,51 – 2,27	1,78	1,41	1,20	74	1,4 – 1,75

züglich der Wechselbeziehungen zwischen Boden und Fahrzeug für die interessierenden Betriebszustände zusammengestellt.

3.1.1 Tiefseeboden

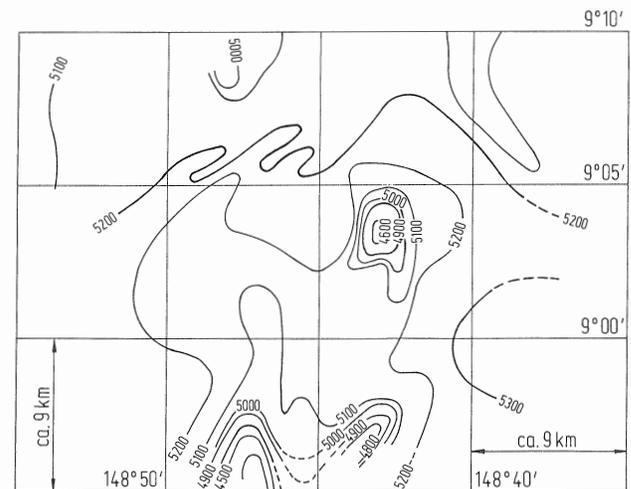
Die Tiefsee kann nach [8, 9] in Ozeanbecken, vulkanische Erhebungen, Rücken und Senken verschiedener Entstehungsursachen eingeteilt werden. In den größtenteils flach ausgeprägten Tiefseebecken liegen überwiegend sehr schwach geneigte Tiefsee-Ebenen, deren durchschnittliches Gefälle weniger als ein Promille beträgt. Die Ebenen sind durch einige Bruchzonen, Schwellen, Tröge und Hügelzonen gestört.

Das für den Manganknollenabbau wirtschaftlich interessanteste Gebiet ist derzeit der sogenannte Knollengürtel, der im Nordpazifik zwischen den Längengraden 120 W und 160 W sowie den Breitengraden 0 und 20 N liegt. Dieses hier betrachtete Gebiet gehört zu den mittelgebirgsähnlichen Hügelzonenregionen, deren topographische Bodengestalt im Bild 3 veranschaulicht wird. Hierin ist die Morphologie vorwiegend durch flache Hügel und einzelne meist isoliert liegende bis zu 1000 Meter steil aufragende Berge gekennzeichnet. In der Mitte des etwa 5200 m tiefen Beckens erhebt sich die Gundlach-Höhe um etwa 600 m. Zwei weitere Berge liegen am Südrand, wobei der westlichere der beiden ca. 900 m hoch ist. Die größte gemessene mittlere Hangneigung im Großrelief wurde an der Westseite der Gundlach-Höhe mit 26 Grad ermittelt.

Da die Steigfähigkeit und die zulässige Querneigung des Kollektorfahrzeuges aus verschiedenen Gründen begrenzt werden müssen, können bestimmte Bereiche des Tiefseebodens auch innerhalb eines ausgewählten Abbaufeldes nicht befahren werden. Der Anteil dieser Ausfallflächen dürfte jedoch schätzungsweise unter 10% liegen.

Aus verschiedenen, allerdings für eine Beurteilung der Befahrbarkeit des Meeresbodens völlig unzureichenden, Beschreibungen der Feinstruktur der Oberflächengestalt [10–12] kann entnommen werden, daß der Meeresboden vorwiegend eben ist. Wegen einzelner herausragender Felspitzen sowie lokal begrenzter Spalte und Klüfte muß aber grundsätzlich mit Hindernissen gerechnet werden.

Der das betrachtete Gebiet bedeckende Weichboden besteht hauptsächlich aus feinsten anorganischen und biogenen Partikeln. Die örtliche Sedimentmächtigkeit schwankt

**Bild 3.** Lagerstätten-Topographie nach Özkara [10] (Wassertiefen in m)

zwischen 175 und 400 m [10]. Es handelt sich hierbei überwiegend um umgelagertes Material mit örtlichen Sedimentationslücken, da das Ablagern durch Bodenströmungen beeinflusst wird [9, 10, 13]. Die Bodenklassifizierung nach der Korngröße führt auf eine Einstufung in die Gruppe der bindigen, kohäsionsbehafteten Böden [14]; allerdings liegen die Wassergehalte mit mehr als 80 Volumenprozent erheblich über denen vergleichbarer terrestrischer Böden, wie Tone und Schluffe [15]. Die physikalischen Eigenschaften der drei Sediment-Grundtypen sind aus Schrifttumsangaben [10, 16, 17] in der Tabelle 1 zusammengestellt. Der Weichboden besteht in der Regel aus einer Mischung von verschiedenen Sedimenttypen von örtlich unterschiedlichen Konzentrationen.

Über die Mischungsverhältnisse und Häufigkeitsverteilungen liegen bisher nur spärliche Veröffentlichungen vor. Horn et al. [16] vermuten, daß das betrachtete Gebiet überwiegend mit Radiolarienschlamm bedeckt ist, dessen hoher Wassergehalt eine äußerst geringe Konsistenz [18] bedingt (Bild 4).

Dem Mischungsverhältnis der Sedimenttypen entsprechend schwankt die Scherfestigkeit des Bodens in weiten Grenzen. Nach Messungen von Lettau [19] existieren Gebiete, in denen der Tiefseeboden nur eine verschwindend geringe Festigkeit aufweist, die daher nicht als befahrbar angesehen werden können. Lettau [19] sowie Halbach et al.

[12] stellen übereinstimmend fest, daß die Bodenfestigkeit in der Regel mit der Bodentiefe ansteigt. Nach Meßwerten von [12] folgt die Zunahme der Bodenfestigkeit über der Tiefe etwa einem natürlichen Wachstumsgesetz. Hierzu ist noch anzumerken, daß im allgemeinen mit einer durch Bioturbation beeinflussten Deckschicht von einigen Zentimetern Dicke mit vernachlässigbar geringer Festigkeit zu rechnen ist.

Eine Definition der Grenzfestigkeit des Bodens im Sinne der Befahrbarkeit für ein Fahrzeug bestimmter Bauart ist notwendig, um hiernach das Fahrzeug zu dimensionieren und zu gestalten. Diese Grenze wird so festgelegt, daß das Fahrzeug, mit noch tragbarem technischen Aufwand und unter Anwendung erprobter Wirkprinzipien, bei hinreichender vertikaler Bodenbelastung noch eine genügende Traktions- und Manövrierfähigkeit zumindest theoretisch erreichen kann. Die danach im Sinne der Befahrbarkeit ausgeschlossenen Gebietsanteile des Tiefseebodens werden hier als Sumpfgebiete bezeichnet.

Im Bild 5 ist der Bereich der von Lettau [19] und Halbach et al. [12] angegebenen Scherfestigkeiten von Tiefseeböden durch Rasterung gekennzeichnet. Es handelt sich hierbei um die im Flügelsondenversuch je Probe ermittelten Maximalwerte. Die der Darstellung zugrunde liegenden Meßwerte sind aus dem Gebiet des Pazifischen Ozeans ermittelt worden. Die im Bild 5 eingetragene Sumpfgrenze stellt eine geglättete Mittelung zwischen der oberen und unteren Begrenzung des gerasterten Feldes dar. Hiernach könnte der Eindruck entstehen, daß mit dieser Definition der Sumpfgrenze die Hälfte der interessierenden Tiefseebodenfläche von der Befahrbarkeit ausgeschlossen wäre. Tatsächlich liegen aber etwa 80% aller herangezogenen Meßwerte oberhalb dieser Sumpfgrenze. Für andere Fahrwerkskonzepte und spezielle Bodengebiete wäre eine angepaßte Befahrbarkeitsgrenze entsprechend zu modifizieren.

Alle weiteren Betrachtungen werden für den Boden mit der Scherfestigkeit an dieser Sumpfgrenze angestellt. Soweit die Befahrbarkeit dieses Bodens gegeben ist, darf davon ausgegangen werden, daß alle festeren Böden auch befahrbar sind.

Der Tiefseeboden ist als plastisch verformbares Bodenmaterial anzusehen, dessen Scherfestigkeit dem Coulomb-Mohrschen Gesetz folgt:

$$\hat{\tau}_s = \tau_c + \sigma \cdot \tan \Phi \tag{1}$$

Hierin bedeuten:

- $\hat{\tau}_s$ = Scherfestigkeit,
- τ_c = Kohäsionsfestigkeit,
- σ = aufgebrauchte Normalspannung,
- Φ = Winkel der inneren Bodenreibung.

Die Größe des inneren Bodenreibungswinkels beeinflusst die Zunahme der Scherfestigkeit unter einer durch eine Auflast aufgebrauchten Normalspannung. Nach Lettau [19] liegen die an Tiefseebodenproben gemessenen Mittelwerte des inneren Reibungswinkels in einem Bereich von 0° bis 10°. Für die

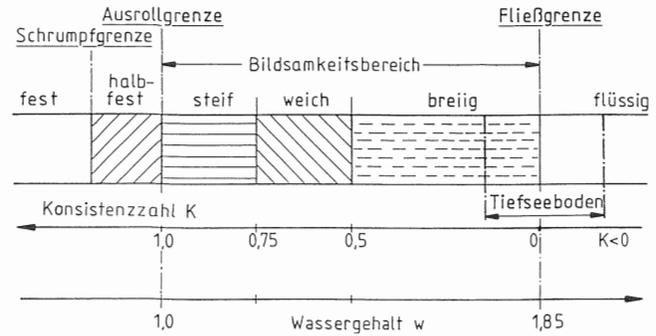


Bild 4. Konsistenzbereich von Tiefseeböden auf der Attenbergschen Skala

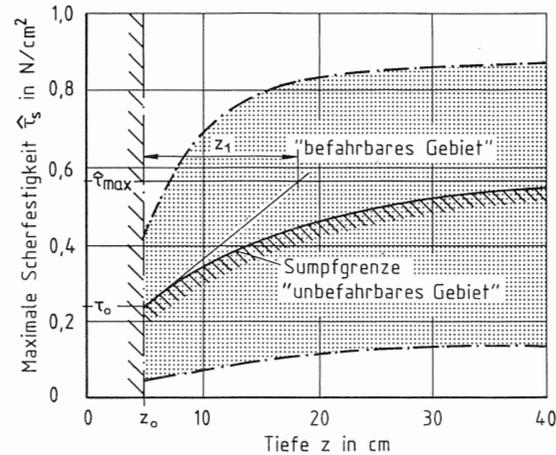


Bild 5. Definition der Sumpfgrenze

Tragfähigkeitsberechnungen wird im weiteren vorsichtshalber ein reibungsloser Boden angenommen.

Die Scherfestigkeit des Tiefseebodens ist auch eine Funktion des Verformungsgrades, dessen Einfluß in den Versuchen von Noorany und Fuller [20] gemessen worden ist.

Danach wird bereits nach einem relativ kleinen Drehwinkel die maximale Scherfestigkeit mobilisiert, die bei weiterer Drehung stetig abfallend einen Restwert annimmt, der auch nach vollständiger Abscherung des Probensektors als Gleitfestigkeit konstant bleibt. Dieses Verhalten des Tiefseebodens ist dadurch erklärbar, daß bei sehr geringer Verformung überwiegend elastische Bodenwiderstände vorhanden sind. In der Nähe des Scherfestigkeitsmaximums werden die skeletten Kornstrukturen entlang der Scherfläche zerbrochen. Dieses Abscheren hat aber in Richtung der Flügelsondendrehung vor dem Flügel aufgrund der Plastizität des Tiefseebodens nur eine sehr begrenzte Reichweite, so daß das Scherfestigkeitsmaximum örtlich bis fast zum totalen Abscheren des Probensegmentes wirksam ist, wobei die dem Scherwinkel entsprechende Restscherfläche maßgebend ist, die bei einer Vierflügelsonde verschwindet. Im Bild 6 ist die von Noorany und Fuller [20] gemessene Scherspannungs-

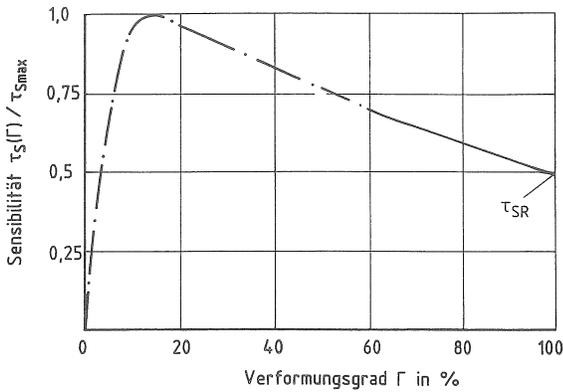


Bild 6. Scherspannung – Scherwegbeziehung von ungestörten Tiefseebodenproben

Scherwegbeziehung (Sensibilität), auf den Maximalwert normiert, dargestellt.

Das Verhältnis von Restscherfestigkeit zur maximalen Scherfestigkeit beträgt dabei 0,5, während der Verformungsgrad zur Mobilisierung der maximalen Scherfestigkeit etwa bei 13% liegt [20].

Die Scherfestigkeit des Tiefseebodens an der Sumpfgrenze ist, insbesondere bei großen Verformungsgraden, somit sehr gering. Sie führt daher zu einer – im Vergleich zu terrestrischen Fahrzeugen – extrem geringen zulässigen Bodenpressung. Hierzu zeigt Bild 7 die in [2] berechnete statische Grenztragfähigkeit des Tiefseebodens für die im Bild 5 zugrundegelegte Sumpfgrenze. Deswegen muß der Kollektor in Leichtbauweise und im Vergleich zu terrestrischen Fahrzeugen mit sehr großen Aufstandsflächen konstruiert werden, wobei ganz besondere Traktionshilfen erforderlich sind.

3.1.2 Fahrwerk

Der fahrzeugtechnische Teil des Kollektors, der im Bild 8 dargestellt ist, besteht im wesentlichen aus dem Tragwerk mit steifem Rahmen und einem System von Laufwerkschwingen mit Antriebs- und Umlenktrommeln, den Tragrollen sowie den Fahrtraubenbändern. Das Tragwerk ist in druckausgeglichener Hohlkonstruktion in Leichtbauweise gestaltet. Der biege- und torsionssteife Rahmen stützt sich auf drei gelenkige Rahmenaufleger ab. Durch die vorn liegende Gelenktraverse wird die vordere Stützlast auf die beiden vorderen Oberschwingen verteilt. Die beiden hinteren Rahmenaufleger tragen die hintere Rahmenauflast je zur Hälfte, so daß die Summe der Rahmenaufasten auf die vier Oberschwingen statisch bestimmt verteilt wird. Alle vier Oberschwingen sind mit Quergelenken versehen, die jeweils den Lastausgleich der Unterschwingen in Querrichtung gewährleisten. Die Unterschwingen erlauben ebenfalls eine statisch bestimmte Lastaufteilung in Längsrichtung, so daß die vier Ecklasten annähernd gleichmäßig auf die jeweils zugeordneten Aufstandsflächen der Fahrtrauben verteilt werden, wobei gleichzeitig eine hinreichende Geländegängigkeit

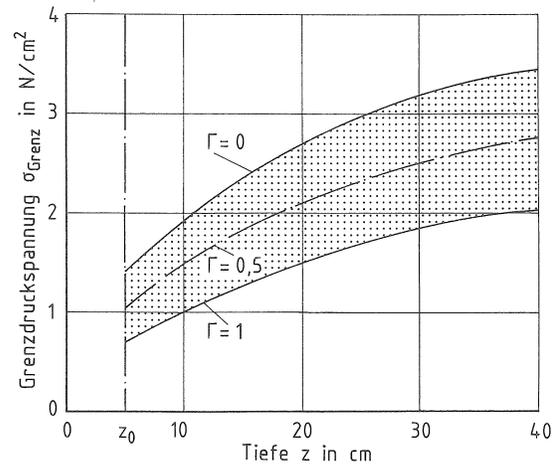


Bild 7. Statische Grenztragfähigkeit von Tiefseeboden an der Sumpfgrenze [2]

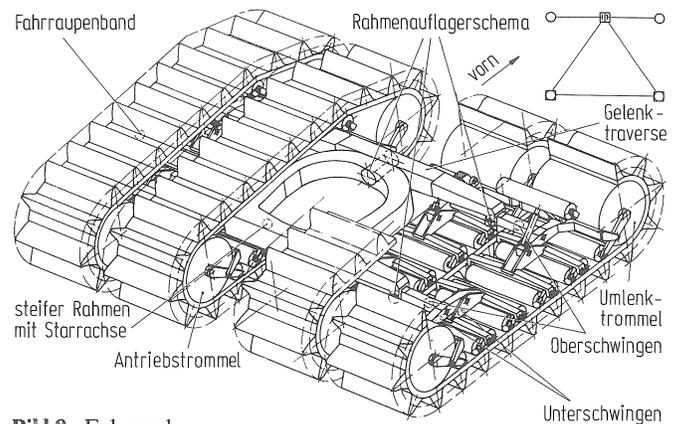


Bild 8. Fahrwerk

erzielt wird. Hierzu ist anzumerken, daß das in Längsrichtung biegeeweiche Fahrtraubenband auch leicht tordierbar ist, so daß die vier Teilaufstandsflächen unter den vier Oberschwingen bei nicht zu großen Einsinktiefen- und Neigungsunterschieden keine nennenswerte gegenseitige Beeinflussung erfahren.

Die erforderliche Aufstandsflächensumme aller Fahrtrauben auf dem Boden hängt von der Belastungskombination im Betrieb und von einer zulässigen Einsinktiefe ab. Für die weiteren Betrachtungen wird für das gesamte Fahrzeug eine Brutto-Raupenaufstandsfläche von 30 m² zugrundegelegt. Zur Erzielung einer hinreichenden Lenkwilligkeit, die im Schrifttum für terrestrische Fahrzeuge z. B. in [21–23] beschrieben ist, wird die Gesamtaufstandsfläche auf vier Raupen von je 1,5 m Breite und je 5 m wirksamer Aufstandsfläche aufgeteilt, wobei die Geschwindigkeiten der Einzelantriebe der Raupen bei der Kurvenfahrt proportional zum jeweiligen Fahrradius eingestellt werden.

Das Fahrtraubenband, über das die Auflasten, Traktions- und Querkräfte des Fahrzeuges in den Boden eingeleitet wer-

den, ähnelt im Grundaufbau einem elastischen Fördergurt mit hochfesten Zugelementen. Zur Übertragung der Umfangskraft von der Antriebstrommel auf die Innenseite des Gurtes dürfte auch unter Wasser die Umschlingungsreibung genügen, wobei je Raupe eine selbsttätige Spanneinrichtung vorausgesetzt wird. Mit den auf den Innenseiten der Raupen angeordneten Führungselementen, die in ihrem Aufbau etwa einem gezahnten Keilriemen entsprechen, werden die horizontalen Spurführungskräfte über die entsprechend geformten Antriebs-, Umlenkrollen und Laufrollen in das Tragwerk eingeleitet (Bild 9).

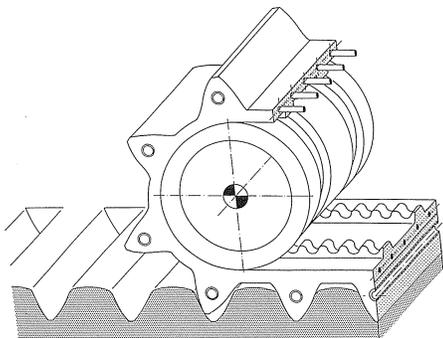


Bild 9. Konstruktiver Aufbau einer Fahrraupe

Zur Ausnutzung der höheren Bodenfestigkeit in tieferen Bodenbereichen ist das Band mit sehr großen Traktionszähnen aus elastischem Material versehen. Die Zahnflanken sind evolventenförmig gestaltet, wodurch sie in schonender Weise in den Boden eingreifen.

Die Größe und Teilung der Traktionszähne können hierbei so gewählt werden, daß die Zunahme der Bodenfestigkeit mit der Tiefe im Hinblick auf die Gewichts- und Traktionsbelastung vorteilhaft ausgenutzt werden kann. Im vorliegenden Entwurf wird von einer maximalen Zahnhöhe von 35 cm ausgegangen. Die elastisch nachgiebigen Zähne lassen eine gewisse Verwindung um ihre flankenparallele Achse zu, wodurch bei Kurvenfahrten ein Teil des Längs- und Querschlupfes von der Raupe aufgenommen werden kann. Die Verformungswege des Bodens werden hierdurch, im Vergleich zu starren Zähnen, noch etwas vermindert. Gleichzeitig wird auf festem Boden eine hinreichende Lenkwilligkeit erreicht. Im weichen Tiefseeboden stellt sich die Einsinktiefe entsprechend der Bodenfestigkeit ein; es können aber auch verdeckte Felshindernisse überwunden werden, wobei sich die elastischen Eigenschaften der Raupenzähne stoßmindernd auswirken. Auf zusätzliche Feder- und Dämpfungselemente des Fahrwerkes kann daher verzichtet werden.

Zusammenfassend wird bei dem betrachteten Fahrwerk von folgenden Vereinfachungen ausgegangen:

- Vierraupenfahrwerk mit statisch bestimmter Dreipunkt-Abstützung und starrem Rahmen;
- Vernachlässigung aller Reibungsmomente in den Gelenken;

- elastisch biegsames und tordierbares sowie in Längsrichtung biegeweiches Raupenband mit elastisch verformbaren Zähnen, die in Querrichtung ausgesteift sind;
- Laufwerk mit gelenkigem Schwingensystem zur gleichmäßigen Lastverteilung unter den jeweiligen Aufstandsquadranten.

3.1.3 Betriebsbedingungen und Berechnungen

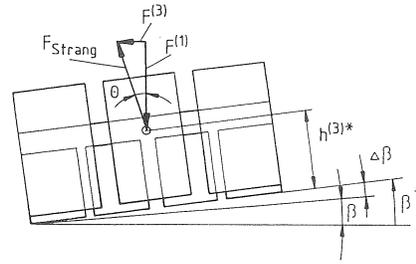
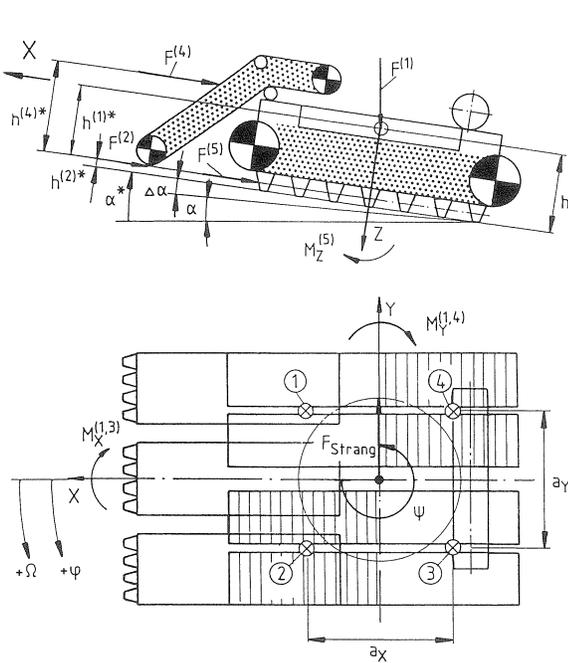
Für den Betrieb gelten die bereits genannten Befahrbarkeitsbedingungen:

- Fahrt auf dem Tiefseeboden an der Sumpfgrenze;
- Geländefahrt innerhalb der maximal zulässigen Steigungs- und Querneigungswinkel;
- keine Überschreitung der konstruktionsbedingten zulässigen Einsinktiefe;
- keine Überschreitung der Grenztraktionskraft;
- stationäre Betriebszustände.

Im Betriebszustand greifen unterschiedliche Kräfte am Kollektor an, die hinsichtlich ihres zeitlichen und örtlichen Auftretens nach Größe und Richtung verschieden sind. Die für die Traffikabilitätsuntersuchungen interessierenden äußeren Kräfte sind als Summen von Einzelkräften zu verstehen, die auch kippende und drehende Momente um die drei Fahrzeugachsen bewirken (Bild 10).

Den physikalischen Entstehungsursachen entsprechend werden diese als bodenparallele bzw. erdsenkrechte Kräfte hergeleitet, die in einem einheitlichen Koordinatensystem beschrieben und komponentenweise zusammengefaßt werden. Hierzu wird ein fahrzeugbezogenes Koordinatensystem herangezogen, dessen Richtungen durch die Geländewinkel und durch die überlagerten Schiefstellungen des Fahrzeuges aufgrund des unterschiedlichen Einsinkens an seinen vier Teilaufstandsflächen entstehen. Das auf die natürliche Bodenoberfläche bezogene Koordinatensystem ist gegenüber der Horizontalebene um den Steigungs- bzw. Geländewinkel in Fahrtrichtung sowie um den Hangsteigungs- bzw. Hangneigungswinkel senkrecht zur Fahrtrichtung geneigt. Geländesteigungen in Fahrtrichtung werden positiv, Geländeneigungen in Fahrtrichtung werden negativ definiert. Hangsteigungen nach rechts sind positiv, während Hanggefälle nach rechts mit negativem Vorzeichen definiert werden. Im Bild 11 ist das oberflächenbezogene rechtwinkelige Koordinatensystem dem fahrzeugbegleitenden gegenübergestellt.

Das fahrzeugbegleitende Koordinatensystem unterscheidet sich vom geländebezogenen dadurch, daß das Fahrzeug seiner mittleren Einsinktiefe entsprechend in den Boden eingesunken ist. Für weitere Betrachtungen der äußeren Kräfte und Momente wird daher eine wirksame Tragtiefe definiert, in der sich die mittlere Trageebene aufspannt. Infolge der angreifenden äußeren Kräfte und Momente sind die Einsinktiefen und somit auch die wirksamen Tragtiefen unter den vier Aufstandsflächen des Fahrzeuges verschieden groß. Demnach ist die mittlere Trageebene gegenüber der Geländeebene geneigt. Diese relativen Neigungen werden

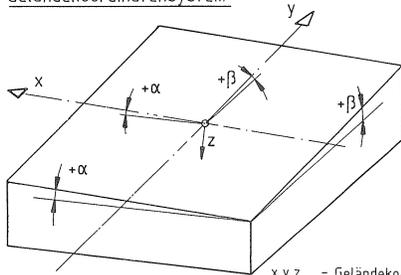


- α = Steigungswinkel
- β = Querhangwinkel
- ψ = Scherwinkel
- ψ = horizontaler Strangwinkel
- θ = Strangwinkel gegen Lot
- Ω = Kurswinkel

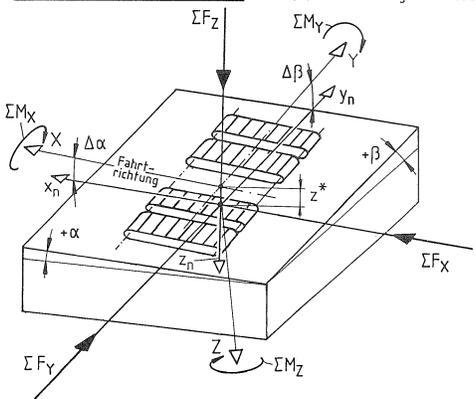
- F(1) = Gewichtswiderstand
- F(2) = Schneidwiderstand
- F(3) = Strangwiderstand
- F(4) = Strömungswiderstand
- F(5) = Bodenwiderstand

Bild 10. Äußere Kräfte am Kollektor

Geländekoordinatensystem



Fahrzeugkoordinatensystem



x, y, z = Geländekoordinaten
 x_n, y_n, z_n = Nennkoordinaten
 X, Y, Z = Fahrzeugkoordinaten

Bild 11. Koordinatensysteme

analog zu den Geländewinkeln definiert. Dieses für die weiteren Untersuchungen zugrunde gelegte Koordinatensystem ist im Bild 11 unten dargestellt.

Die wirksame Tragtiefe wird als diejenige Tiefe definiert, in der die Wälzebene der Raupenzähne liegt. Ihre Lage wird durch die halbe Bodenzahnhöhe festgelegt (Bild 12).

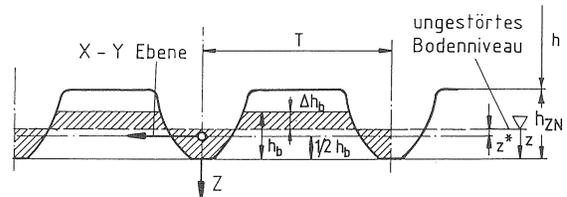


Bild 12. Definition der wirksamen Tragtiefe z^*

Die Fußebene der Bodenstollen stimmt mit der Zahnkopfebene der Raupenzähne überein. Der Einfachheit halber wird angenommen, daß der Bodenzahnkopf bei allen Einsinktiefen des Raupenzahnes eben bleibt. Infolge des Einsinkens der Raupenzahnköpfe in den ungestörten Boden um den Betrag z ergibt sich in den Lücken zwischen je zwei Raupenzähnen ein Bodenzahn der Höhe $h_b(z)$. Solange die Einsinktiefe des Raupenzahns nicht den Wert z_A überschreitet, gilt:

$$z^* = z - \frac{1}{2} \cdot h_b; \quad z \leq z_A. \tag{2}$$

Für größere Einsinktiefen gilt:

$$z^* = \frac{1}{2} \cdot h_{zN} + (z - z_A); \quad z > z_A. \tag{3}$$

Wegen des unterschiedlich tiefen Einsinkens der Raupen gilt für die mittlere wirksame Tragtiefe der Mittelwert aus den wirksamen Tragtiefen der vier Aufstandsflächen:

$$\bar{z}^* = \frac{z_1^* + z_2^* + z_3^* + z_4^*}{4}. \tag{4}$$

Auf diese mittlere wirksame Tragtiefe werden gemäß Bild 12 alle Kraftangriffshöhen bezogen:

$$h^* = h + h_{zN} - z + z^*. \tag{5}$$

Mit dem Zusammenhang zwischen der Bodenzahnhöhe und der Einsinktiefe läßt sich die Lage der wirksamen Tragebene allein mit der Einsinktiefe beschreiben.

$$z^* = \frac{1}{2}(z + \Delta h_b); \quad (\tilde{z} \leq z_A) \tag{6}$$

$$z^* = z - \frac{1}{2} \cdot h_{ZN}; \quad (\tilde{z} > z_A) \tag{7}$$

Die Beziehungen sind im Bild 13 dargestellt.

Das Fahrzeug stellt sich auch hinsichtlich der Winkel-lagen auf das Fahrzeugkoordinatensystem ein, wobei aufgrund des unterschiedlichen Einsinkens der vier Teilaufstandsflächen nach Bild 14 folgende relative Neigungen zum bodenbezogenen System formuliert werden.

In Fahrtrichtung:

$$\tan \Delta\alpha = \frac{\frac{1}{2} \cdot (z_1^* + z_2^*) - \frac{1}{2} \cdot (z_3^* + z_4^*)}{a_x} \tag{8}$$

und in Querrichtung:

$$\tan \Delta\beta = \frac{\frac{1}{2} \cdot (z_1^* + z_4^*) - \frac{1}{2} \cdot (z_2^* + z_3^*)}{a_y} \tag{9}$$

Für die Umrechnung von Koordinaten, die im bodenbezogenen Bezugssystem gegeben sind, auf das Fahrzeugkoordinatensystem gelten nachstehende Transformationsbeziehungen:

$$X = x_n \cdot \cos \Delta\alpha; \tag{10}$$

$$Y = y_n \cdot \cos \Delta\beta; \tag{11}$$

$$Z = z_n + 2(x_n \cdot \tan \Delta\alpha + y_n \cdot \tan \Delta\beta). \tag{12}$$

Die Höhenlagen der Angriffspunkte der äußeren Kräfte werden auf die wirksame mittlere Tragebene bezogen und mit h^* bezeichnet. Hiermit ergeben sich die Momente in Richtung der Einheitsvektoren x_n , y_n und z_n . Konstruktionsbedingt kommen hier Momente aus äußeren Kräften um die Fahrzeughochachse nur beim Lenken und bei Kurvenfahrten vor.

Mit Rücksicht auf die dominanten Gewichtskräfte wird das fahrzeugeigene Bezugssystem X, Y, Z unmittelbar aus dem erdbezogenen System mit einer Horizontalebene $x-y$ abgeleitet. Durch die Überlagerung der Geländewinkel und der relativen Fahrzeugneigungen gegenüber dem Gelände zu den resultierenden Schräglagenwinkeln gilt mit

$$\alpha^* = \alpha \pm \Delta\alpha \tag{13}$$

und

$$\beta^* = \beta \pm \Delta\beta \tag{14}$$

schließlich

$$X = x \cdot \cos \alpha^*; \tag{15}$$

$$Y = y \cdot \cos \beta^*; \tag{16}$$

$$Z = z + 2(x \cdot \tan \alpha^* + y \cdot \tan \beta^*). \tag{17}$$

Wegen der gelenkigen Fahrwerksabstützung entsteht eine statisch bestimmte Dreipunkt-Abstützung des als starr angesehenen Rahmens, der die Auflasten und Momente durch

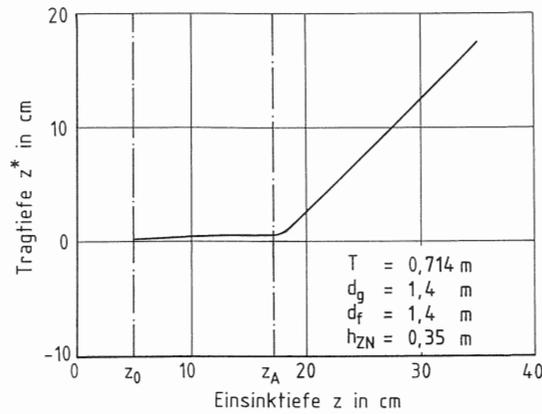


Bild 13. Zusammenhang der wirksamen Tragtiefe z^* mit der Einsinktiefe Z

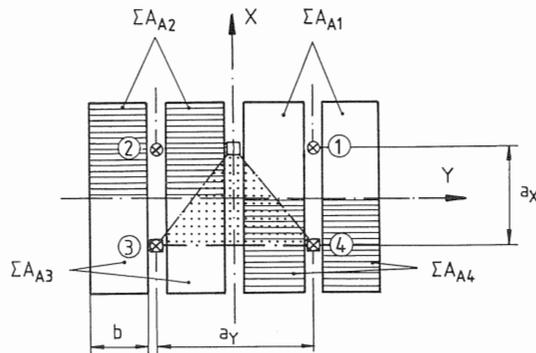


Bild 14. Verteilung der Kräfte und Momente der Dreipunkt-Abstützung auf die Aufstandsquadranten

ein Schwingensystem auf vier Teilaufstandsflächen verteilt. Obwohl den Raupenbändern jeweils zwei Oberschwingen einer Fahrzeugseite zugeordnet sind, kann mit Rücksicht auf die leichte Bieg- und Tordierbarkeit der Raupenbänder in guter Näherung von vier gleichwertigen entkoppelten Aufstandsflächen ausgegangen werden. Die vier Raupenbänder sind also gedanklich in der Fahrzeug-Querachse durchgeschnitten. Diese Vorstellung ist im Bild 14 dargestellt und liegt den weiteren Berechnungen zugrunde.

Hiermit können die Auflasten und die Momente um die Längs- und Querachse in Normallasten der vier Teilaufstandsflächen umgewandelt werden:

$$F_1 = F_z/4 - M_y/a_x, \tag{18}$$

$$F_2 = F_z/4 - M_y/a_x, \tag{19}$$

$$F_3 = F_z/4 - M_x/a_y + M_y/a_x, \tag{20}$$

$$F_4 = F_z/4 + M_x/a_y + M_y/a_x. \tag{21}$$

Hierin bedeuten:

$F_{1...4}$ = Stützlast des jeweiligen Aufstandsquadranten,

F_z = resultierende Auflast aus Eigengewicht und vertikal entlastender Strangkraftkomponente,

M_x = resultierende Momentensumme aus allen äußeren Kräften um die X -Achse

Tabelle 2. Zusammenstellung der Kräfte- und Momentengleichungen

Nr.	Kraft	Kräfte in kN			Momente in kNm		
		X	Y	Z	X	Y	Z
$F^{(1)}$	Gewichtskraft	$-\frac{F'_G \cdot \tan \alpha^*}{C_G}$	$-\frac{F'_G \cdot \tan \beta^*}{C_G}$	$\frac{F'_G}{C_G}$	$-\frac{F'_G \cdot \tan \beta^* \cdot h^{(1)*}}{C_G}$	$\frac{F'_G \cdot \tan \alpha^* \cdot h^{(1)*}}{C_G}$	0
$F^{(2)}$	Schneidkraft	$-\tau_{SR} \cdot b_S \cdot z_S$ $\cdot r_S \cdot C_S$	0	0	0	$-\tau_{SR} \cdot b_S \cdot z_S$ $\cdot r_S \cdot C_S \cdot h^{(2)*}$	0
$F^{(3)}$	Strangkraft	$+F_{HStrang} \cdot \cos \psi$	$-F_{HStrang} \cdot \sin \psi$	$-\frac{F_{HStrang}}{\tan \theta}$	$F_{HStrang} \cdot \sin \psi$ $\cdot h^{(3)*}$	$-F_{HStrang} \cdot \cos \psi$ $\cdot h^{(3)*}$	0
$F^{(4)}$	Strömungswiderstand	$-A_p \cdot \frac{\rho_w}{2}$ $\cdot v_k^2 \cdot c_w$	0	0	0	$-A_p \cdot \frac{\rho_w}{2} \cdot v_k^2$ $\cdot c_w \cdot h^{(4)*}$	0
$F^{(5)}$	Bodenwiderstand für Geradeausfahrt	$-\left(\frac{i \cdot j \cdot b_{FR} \cdot c_b}{T}\right)$ $\cdot [\tau_S \cdot T^2 \cdot \Gamma_{x,4+}$ $+ \sum N_j \cdot s(\tilde{z}_j)$ $\cdot \Delta z_j]$	0	0	0	0	0
$F^{(5)}$	Bodenwiderstand für Kurvenfahrt	$-\sum F_{kjj}^{(5)}$	0	0	0	0	$\pm A_S \cdot \tau_S \cdot R_{0jj}$
Σ	Summation	F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
Abkürzungen:		$C_G = \sqrt{\tan^2 \alpha^* + \tan^2 \beta^* + 1}$		$N_j = \sigma_{Grenz}(z, \tilde{z}_j, \Gamma)$			

und

M_Y = resultierende Momentensumme aus allen äußeren Kräften um die Y-Achse.

Die für den betrachteten Kollektor relevanten äußeren Kräfte und Momente wurden in [2] einzeln untersucht. In Tabelle 2 sind diese Kräfte- und Momentengleichungen zusammengestellt. Für die Berechnungen gelten zusammenfassend folgende Vereinfachungen:

- Kräfte- und Momentenangriff nach den Angaben in Tabelle 2;
- Approximation des nichtlinearen Spannungs- und Verformungsverhaltens des Tiefseebodens durch ein tiefen- und verformungsabhängiges Gleichgewicht an der Sumpfgrenze;
- Ersatz des unterhalb der Raupen existierenden dreidimensionalen Spannungszustandes durch einen quasizweidimensionalen;
- Die statische Betrachtungsweise wird für die an sich dynamischen Bodenbelastungen als die kritischere angesehen, weil davon ausgegangen wird, daß dynamische Lastanteile geringer sind als die dynamische Tragfähigkeit des Bodens.

3.2 Algorithmus

Unter den genannten Voraussetzungen wird der im folgenden aufgezeigte Berechnungsablauf anhand eines Beispiels für exemplarische Fahr- und Betriebssituationen des Kollektors dargestellt. Hierbei wird von den in Tabelle 3 zusammengestellten Konstruktions- und Fahrwerksdaten ausgegangen.

Für die zugrunde gelegten Konstruktionsdaten und Betriebszustandsgrößen werden zunächst die mechanischen Belastungsgrößen bezüglich der drei Fahrzeugachsen berechnet. Die hierfür erforderlichen Gleichungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die tiefenabhängigen Bodenwiderstände werden dabei erst ab dem zweiten Berechnungsdurchlauf berücksichtigt, da die Einsinktiefen in weiteren Iterationsdurchläufen genauer ermittelt werden.

Als Belastungsbeispiel werden die in Tabelle 4 zusammengestellten Betriebszustandsgrößen zugrunde gelegt.

Eine Übersicht über den Berechnungsablauf ist im Bild 15 dargestellt, anhand dessen der Algorithmus im weiteren schrittweise beschrieben wird.

Im zweiten Berechnungsschritt werden aus den Kräfte- und Momentensummen die resultierenden Auflasten für die Raupenquadranten berechnet. Jeder dieser resultierenden

Tabelle 3. Zahlenwerte und Wertebereiche des Datensatzes „KONST“

Nr.	Konstruktionsparameter	Größe	Wertebereich min ... Entwurf ... max		
1	Eigengewicht im Wasser	F_G	200	... 400	... 700 kN
2	Raupenbreite	b_{FR}	1	... 1,5	... 2 m
3	Aufstandslänge	l_A	3	... 5	... 12 m
4	Fahrwerksbreite	b_{FW}	4	... 7,5	... 12 m
5	Spurweite	S_m	3	... 4	... 7 m
6	Stützpunktstand in Richtung Querachse	a_Y	3	... 4	... 7 m
7	Stützpunktstand in Richtung Längsachse	a_X	1,5	... 2,5	... 6 m
8	Schwerpunkthöhe	h	1	... 1,5	... 4 m
9	Grundkreisradius	R_g	0,5	... 0,7	... 1,5 m
10	Fußkreisradius	R_f	0,5	... 0,7	... 1,5 m
11	Zahnhöhe	h_{ZN}	0,2	... 0,35	... 0,6 m
12	Zahnkopfdicke	s_a	0	... 0,114	... 0,15 m
13	Zahnteilung	T	0,4	... 0,714	... 1,2 m
14	Zinkenbreite einer Sammelschneide	b_S	0,5	... 1,0	... 2 cm
15	Anzahl der Sammelschneiden	r_S	0	... 300	... 500 –
16	Projektionsfläche für den Strömungswiderstand	A_p	20	... 30	... 60 m ²
17	Strömungswiderstandsbeiwert	c_W	0,6	... 1,0	... 1,5 –
18	zulässige Einsinktiefe	z_{zul}	0,2	... 0,35	... 0,4 m

Auflasten wird entsprechend der in [2] hergeleiteten statischen Tragfähigkeit eine vorläufige Einsinktiefe zugeordnet. Anschließend wird anhand der gemittelten vorläufigen Einsinktiefe geprüft, ob die dabei mobilisierbare Grenztraktionskraft ausreicht, um die entgegen der Fahrtrichtung wirkenden Widerstände überwinden zu können. Wenn dieses nicht der Fall sein sollte, sind die entsprechenden Betriebsparameter zu verändern. Nach einer erneuten Durchrechnung der dann wirkenden Belastungsgrößen sowie einem Gesamtfahrwiderstand, der unterhalb der Grenztraktionsfähigkeit des Bodens liegen muß, ist dann der gegebenenfalls zu reduzierende Traganteil in Zusammenhang mit der eingeleiteten Traktionskraft zu berücksichtigen.

Mit den vier vorläufig ermittelten Einsinktiefen wird die Koordinatentransformation auf die wirksame Tragtiefe vorgenommen, wonach sich die zusätzlich auftretenden Einsinkwinkel des Fahrzeuges gegenüber der Bodenoberfläche ergeben. Sind die Winkeldifferenzen hinreichend klein, so sind die Iterationen abubrechen, anderenfalls werden erneute Berechnungsläufe durchgeführt, wobei auch alle Kraftangriffshöhen auf die jeweils mittlere wirksame Tragenebene gemäß Gln. (4) und (5) bezogen werden. Bei hinrei-

Tabelle 4. Zahlenwerte und Wertebereiche des Eingabedatensatzes „BETRIEB“

Nr.	Betriebszustandsparameter	Größe	Wertebereich min ... Entwurf ... max		
1	Fahrgeschwindigkeit	v_K	0	... 0,75	... 1,5 m/s
2	Steigungswinkel	α	0	... 3,5	... 4,5 grad
3	Querneigungswinkel	β	0	... 1,0	... 4,5 grad
4	Schnitttiefe	z_S	0	... 10	... 20 cm
5	Aktionsradius	R_L	0	... 0,16	... 1,5 km
6	Horizontaler Strangwinkel	Ψ	0	... 100	... 360 grad
7	Kurvenradius	R_{km}	15	... 50	... 500 m
8	Gesamtverformungsgrad	Γ	0,5	... 0,75	... 1,0 –

chender Konvergenz stehen die unterhalb der Aufstandsquadranten ermittelten vier Einsinktiefen und die Fahrzeugwinkel fest.

Sobald eine der vier Einsinktiefen die maximal zulässige überschreitet, ist die Befahrbarkeit unter der betrachteten Lastkombination nicht zulässig. Im anderen Fall ist die Befahrbarkeit unter der betrachteten Lastkombination zulässig.

4 EDV-Programmierung und Modellvarianten

Bevor weitere denkbare Modellvarianten aufgezeigt werden, wird im folgenden zunächst auf die EDV-Programmierung des vorgestellten Berechnungssystems eingegangen. Es wird ein modularer Aufbau gewählt, dessen Berechnungsmodule im einzelnen kurz erläutert werden. Bild 16 zeigt anhand der Verknüpfungen der Module den Programmablauf.

Im Modul 1 „EINGABE“ werden alle erforderlichen Bodenkennwerte, Fahrwerks- und Betriebszustandsdaten geladen. Von den Bodenkennwerten sind neben der Bodentiefe und dem Sensibilitätsverhältnis insbesondere die tiefen- und verformungsabhängige Scherfestigkeit einzugeben.

Des weiteren gehören zum Eingabedatensatz alle relevanten Konstruktionsparameter des Fahrzeuges als Festwerte. Dieser Datensatz „KONST“ enthält für das betrachtete Vierraupen-Fahrzeug alle relevanten Größen, deren Wertebereich in Tabelle 3 zusammengestellt worden sind.

Die Betriebszustandsdaten mit den in Frage kommenden Variationsbereichen werden gemäß Tabelle 4 eingegeben.

Im Modul 2 „BODEN“ werden neben den konstruktionsbedingten Hilfsgrößen, wie Aufstandstiefe und wirksame Tragtiefe, insbesondere die tiefen- und verformungsabhängigen Scher- und Grenzdruckspannungen sowie die darauf basierenden Bodengrenzkräfte berechnet und die Ergebnisse in der später benötigten Datei „BODEN“ abgelegt.

Danach werden im Modul 3 „LAST“ aufgrund der aktuellen Betriebszustandsdaten die Kraft- und Momentenkom-

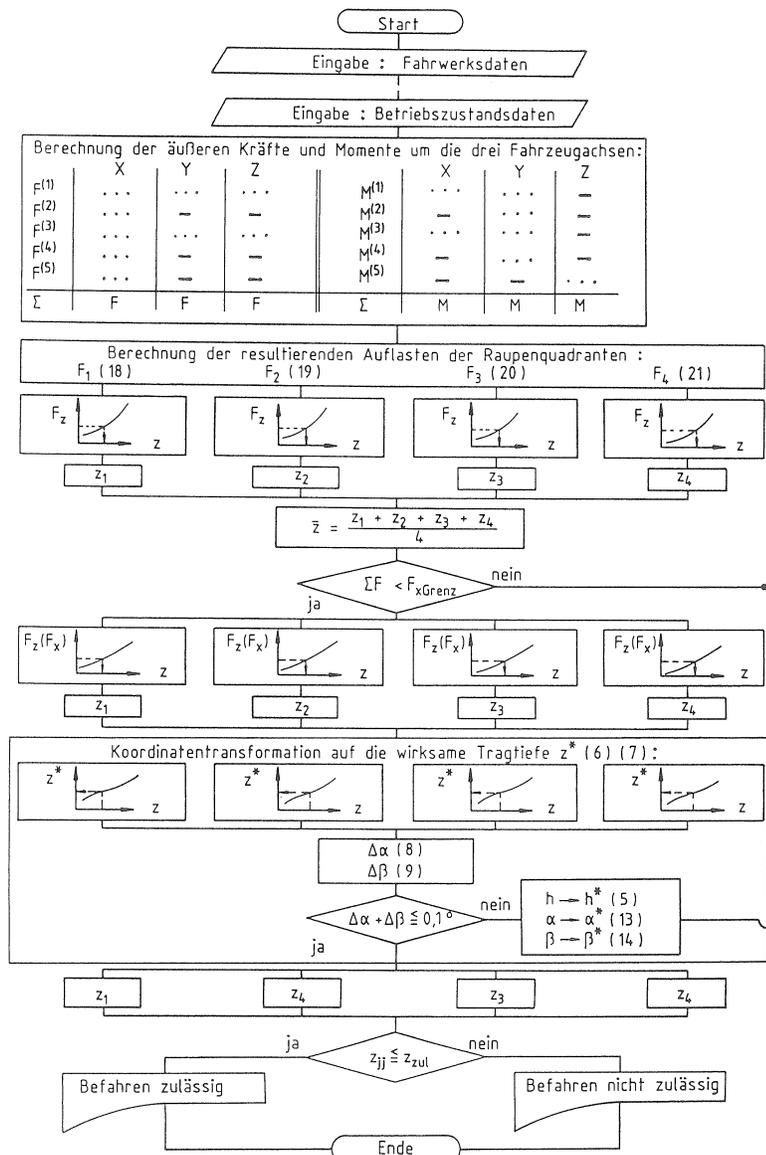


Bild 15. Berechnungsalgorithmus

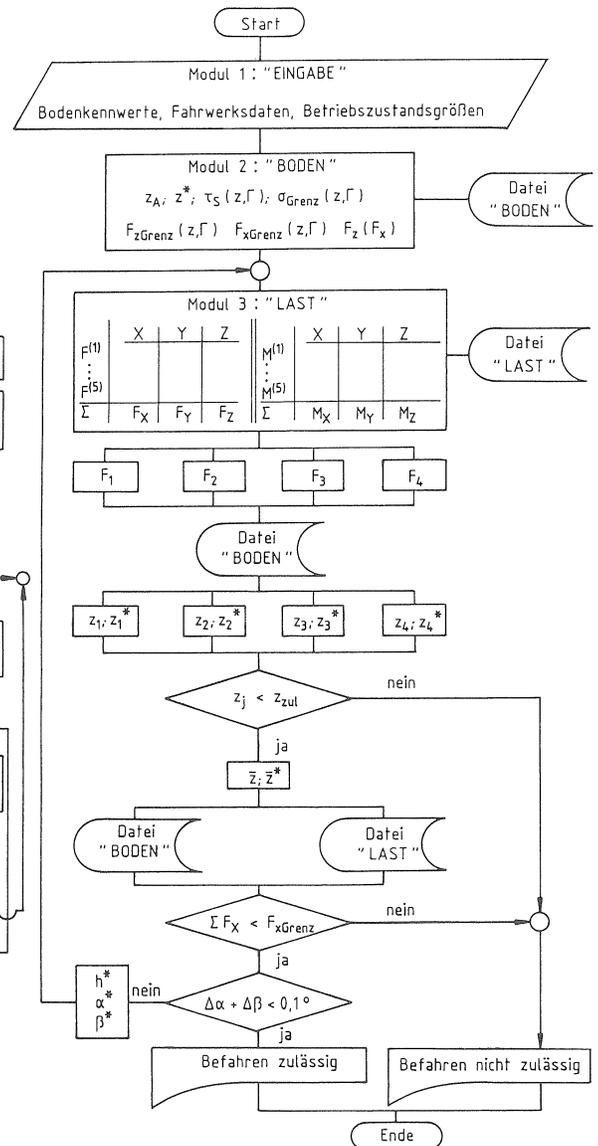


Bild 16. Programmablaufschaema

ponenten aller am Kollektor angreifenden äußeren Kräfte in den drei Richtungen des Fahrzeugkoordinatensystems nach den in Tabelle 2 vorgestellten Gleichungen berechnet und analog in einer Ergebnisdatei gespeichert. Nach der Summation der Einzelkräfte und Momente werden die daraus resultierenden vier Auflasten nach den Gln. (18) bis (21) ermittelt, in denen auch die anteiligen Vertikallasten je Raupenquadrant enthalten sind.

Für die resultierenden Auflasten werden aus der Datei „BODEN“ diejenigen vier Einsinktiefen ermittelt, bei denen sich jeder Aufstandsquadrant mit den Bodengrenzkraften im Gleichgewicht befindet. Diesen vier Einsinktiefen werden zugleich aus der Datei „BODEN“ die entsprechenden wirksamen Tragtiefen zugeordnet.

Im nächsten Berechnungsschritt wird als erstes Befahrbarkeitskriterium abgefragt, ob keine der vier Einsinktiefen die zulässige Einsinktiefe überschreitet. Solange alle Einsinktiefen unterhalb der zulässigen bleiben, wird hierfür und auch für die vier wirksamen Tragtiefen jeweils der Mittelwert gebildet. Für die mittlere Einsinktiefe wird aus der Datei „BODEN“ die tiefen- und verformungsabhängige Grenztraktionskraft gelesen und anschließend mit der in der Datei „LAST“ enthaltenen Summe der entgegen der Fahrtrichtung wirkenden Widerstände verglichen. Ist diese Kräfte-summe, bei der die tiefenabhängigen Bodenwiderstände noch nicht berücksichtigt werden konnten, bereits zu groß, so ist die vorliegende Befahrbarkeitsituation nicht zulässig. Im anderen Fall beginnt die eigentliche iterative Ermittlung

Tabelle 5. Zustandsergebnisse verschiedener Lastkombinationen

Nr.	Betriebszustandsgröße	Einheit	Ohne Strangkraft	Mit wirkender Strangkraft				
			Lastfall 1: Geradeausfahrt in der Ebene	Lastfall 2: „Nennbetrieb“	Lastfall 3: max. Steig- und Talfahrt	Lastfall 4: max. Kurven- fahrt in der Ebene	Lastfall 5: max. Kurven- fahrt am Schräghang	
1	v_K	m/s	+0,75	+0,75	+0,75	+0,25	+0,25	
2	α	grad	0	+3,5	+4,5	0	+4,5	
3	β	grad	0	+1,0	+4,5	0	+4,5	
4	z_S	cm	10	10	10	10	10	
5	R_L	m	500	160	500	500	500	
6	ψ	grad	0	+100	+90	+270	+90	
7	R_{km}	m	+200	+50	+50	+15	+42	
8	Γ	–	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	
Betriebszustand:			zulässig	zulässig	zulässig	zulässig	zulässig	

der genaueren Einsinktiefen, indem die sich durch das ungleiche Einsinken der Aufstandsquadranten einstellenden Winkelabweichungen zu veränderten Einsinkwinkeln führen. Zusammen mit den auf die mittlere wirksame Tragebene bezogenen Kraftangriffshöhen wird bei noch zu großen Winkeldifferenzen der Modul „LAST“ wiederholt aufgerufen. Bei diesem zweiten Berechnungslauf und bei jedem weiteren werden nun auch die tiefen- und verformungsabhängigen Bodenwiderstände für die jeweils mittlere Einsinktiefe berücksichtigt, wodurch die zuvor ermittelten Werte in der Datei „LAST“ überschrieben werden. Bei allen ablaufenden Iterationen muß außer der Einsinktiefenbeschränkung auch das zweite Befahrbarkeitskriterium erfüllt werden, indem die Grenztraktionsfähigkeit des Bodens ausreichen muß, um alle Widerstandskräfte einschließlich der kurvenradiusabhängigen Bodenwiderstände zu überwinden. Wird dabei schließlich das Abbruchkriterium einer hinreichend kleinen Winkeldifferenz erreicht, so ist die simulierte Befahrbarkeitssituation zulässig.

In dem Grundmodell, das als Version I bezeichnet wird, liegen die fahrzeugspezifischen Daten, wie z. B. Eigengewicht im Wasser, Raupenbreiten und -längen, Spurweiten, Zahnabmessungen usw., als konstruktionsbedingte Festwerte vor. Auch die bodenspezifischen Daten, wie Grenzscherfestigkeit und der Abhängigkeit von der Tiefe sowie die verformungsgradabhängige Sensibilität usw., stellen darin einen feststehenden Datensatz dar. Die im Fahrbetrieb beeinflussbaren Betriebszustandsgrößen wie Fahrgeschwindigkeit, Steigungs- und Hangneigungswinkel, Aktions- und Kurvenradius sind variable Größen, die jeweils nur in ihren Extremwerten begrenzt sind. Erst die jeweilige Kombination der Betriebsparameter kann zu unzulässigen Betriebszuständen führen. Die Modellrechnungen mit diesem Grundmodell stellen somit Fahrbetriebssimulationen für ein bestimmtes Fahrzeug auf dem definierten Boden dar. Ausgehend von den aktuellen Zustandsgrößen kann die Antwort des Systems auf beabsichtigte Betriebszustandsänderungen im voraus angegeben werden.

Das Grundmodell ist dahingehend ausbaufähig, daß anstelle der angenommenen Bodenkennwerte aktuelle Meßdaten eingegeben werden. Des weiteren wird eine automatische Betriebszustandsüberwachung des Fahrzeuges als Version II möglich, wenn der Einbau eines Systems logischer Beziehungen, wie beispielsweise eine Strategie mit Prioritäten für die automatische Reduzierung der beeinflussbaren Betriebszustandsgrößen, erfolgt. Hierzu muß vorausgesetzt werden, daß alle relevanten Betriebszustandsdaten und Steuerbefehle des Fahrzeuges meßtechnisch erfaßt und on-line bereitgestellt werden.

Mit einer weiteren Modellversion III können die fahrzeugspezifischen Daten bei vorgegebenen Boden- und Betriebsdaten variiert werden. Diese Version dient der Vor-dimensionierung von Fahrwerken. Hiermit können auch Richtwerte für die Gestaltung generiert werden.

Als Anwendungsbeispiele sind für die Modellversion I die Ergebnisse für verschiedene Lastkombinationen in Tabelle 5 zusammengestellt. Unter den getroffenen Annahmen steht somit die Befahrbarkeit des Tiefseebodens für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kollektorentwurf außer Frage.

5 Ausblick

Anhand eines Kollektor-Grobentwurfes mit einem neuartigen Raupenfahrwerk wurde ein mathematisches Modell zur Befahrbarkeitssimulation auf extrem weichen Tiefseeböden vorgestellt. Die in [2] aufgestellte Traffikabilitätstheorie wurde in einem Algorithmus zusammengefaßt und in einem Rechenprogramm umgesetzt. Die hiermit durchgeführten Fallstudien lassen als Ergebnis die Aussage zu, daß die Befahrbarkeit des Tiefseebodens mit selbstfahrenden Arbeitsmaschinen bei zweckdienlicher Fahrwerkskonstruktion unter den genannten Voraussetzungen und Bedingungen außer Frage steht. Die vorgestellten Berechnungsansätze bedürfen noch der experimentellen Überprüfung und Verfeinerung,

wobei auch die bisher für den Tiefseeboden unbekanntem Bodenkennwerte für dynamische Berechnungen [24–27] zu berücksichtigen wären.

Weil es derzeit an hinreichend gesicherten Angaben über die tatsächlichen Bodenfestigkeiten und deren Verteilung auf den Arealen in der Tiefsee mangelt, wird im Hinblick auf weitere Entwicklungen vorgeschlagen, systematisch in situ-Messungen mit geeigneten Geräten vorzunehmen. Ferner werden experimentelle Fahrwerks-Untersuchungen auf künstlich herzustellendem Tiefseeboden in mit Wasser gefluteten Versuchsbecken angeregt. Durch Messung der tiefen- und verformungsabhängigen Bodenfestigkeit und der Einsinktiefen bei statischer und dynamischer Belastung des Fahrwerkes könnten die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten theoretischen Zusammenhänge überprüft werden. Bei Reduzierung der Lastannahmen entsteht die Möglichkeit, die Baugröße des Fahrwerkes zu verkleinern, wobei dann auch andere Raupenkonstruktionen in Frage kommen könnten.

Unter den im Rahmen dieser Arbeit pessimistisch getroffenen Belastungsannahmen und der bewußt niedrig zugrunde gelegten Sumpfgrenze sind die ermittelten Aussagen über die Befahrbarkeit des Tiefseebodens mit selbstfahrenden Arbeitsmaschinen recht ermutigend.

Danksagung

Der Autor dankt Herrn Professor Dr.-Ing. W. Schwarz für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Beitrages.

Literatur

- Dick, R.: Tiefseebergbau versus Landbergbau. Metallproduktion aus Manganknollen und Nickellateriterzen im Wirtschaftlichkeitsvergleich. (Kieler Arbeitspapiere Nr.: 131) Kiel: Institut für Weltwirtschaft 1981
- Melcher, P. R.: Untersuchungen über das Befahren des Tiefseebodens mit aktiven Manganknollenkollektoren. Diss. Universität-GH Siegen 1986
- Avula, X. J. R.: Soil mechanics approach to the performance of underwater terrain vehicles. *Interocean* '73, Düsseldorf 1973
- Herrmann, H. G.: Trafficability and Performance Analyses for a Deep Ocean Running Gear Module for an Undersea Vehicle. *Marine Technology Oceans '78 – The Ocean Challenge fourth annual combined MTS-IEEE Conference*. Washington: 1978 723–728
- Janosi, Z.; Hanamoto, B.: The analytical determination of drawbar pulls as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. *Proc. of 1st Int. Conference ISTVS, Turin*: 1961
- Wiendieck, K. W.: Studie zur technischen Konzeption von Meeresboden-Fahrzeugen. *Meerestechnik* mt 3 (1972) 41–48
- N. N.: Remotely Operated Vehicles. Prepared by R. F. Busby Associates, Inc. Arlington, Virginia: August 1979
- Heezen, B. C.; Tharp, M.; Ewing, M.: The floors of the oceans. *Geol. Sov. Am. Spec. Paper* 65 (1959)
- Seibold, E.: *Der Meeresboden: Ergebnisse und Probleme der Meeresgeologie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1974
- Özkara, M.: Untersuchungen der Makroeigenschaften, Geochemie, Mineralogie und Mikrogefüge von Manganknollen der Tiefsee. Diss. TU Clausthal: 1978
- Beiersdorf, H.: Überblick über die morphologischen und geologischen Verhältnisse in den Arbeitsgebieten der Forschungsfahrt VA 13/1. Ergebnisse der Manganknollen-Wissenschaftsfahrt VA 13/1, BGR, Hannover 1976
- Halbach, B.; Özkara, M.; Rehm, E.: Bericht der Arbeitsgruppe der TU Clausthal. Fahrbericht VA 13/1, BGR, Hannover 1976
- Hayes, S. P.: The bottom boundary layer in the eastern tropical Pacific. *J. Phys. Oceanography*, 10, p. 315–329
- DIN 4022: Baugrund und Grundwasser. Benennung und Beschreibung von Bodenarten und Fels. Berlin: Beuth-Vertrieb 1969
- Pregl, O.; Zach, R.: Erfassung der Zusammendrückbarkeit und der Scherfestigkeit von Böden für konventionelle Nachweise. *Geotechnik* 6 (1983) 70–76
- Horn, D. R.; Horn, B. M.; Delach, M. N.: Copper and nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrates. Papers on the origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration. Symposium Honolulu 1973
- Keller, G. H. Shear strength and other physical properties of sediments from the ocean basins. *Civil Engineering in the Oceans, Proc. ASCE Conf., San Francisco* 1967 391–417
- DIN 18122: Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. Teil 1, Baugrund, Berlin: Beuth-Vertrieb 1976
- Lettau, O.: Bodenmechanische Bord- und Landlaboruntersuchungen an pazifischen Tiefseesedimenten. BMFT-FB-M78-02, Bonn: 1978
- Noorany, I.; Fuller, J. T.: Soil-Machine Interaction Studies for Manganese Nodule Mining. 14th. Offshore Technology Conf. OTC 4261, Houston, Texas 1982
- Johannis, E.: Lenkverhältnis und Einsinktiefen als Kriterium für die Lenkwilligkeit der Kettenfahrzeuge. *ATZ* 60 (1958) 121–124
- Koessler, P.; Glaubitz, H.: Zum Wendevorgang bei Gleiskettenfahrwerken. *ATZ* 53 (1951) 201–208
- Merhoff, W.; Hackbarth, E. M.: *Fahrmechanik der Kettenfahrzeuge*. Alsbach: Leuchtturm-Verlag 1982
- Bekker, M. G.: A System of Physical and Geometrical Soil Values for Determination of Vehicle Performance and Soil Trafficability. *Proc. Interserv. Symp. Stevens Inst. of Tech. and Duke Univ., Office of Ord. Res., Durham, N. C.*: 1955
- Bekker, M. G.: *Theory of Land Locomotion. The Mechanics of Vehicle Mobility*. Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan 1956
- Bekker, M. G.: *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*. Univ. of Michigan Press, Ann Arbor 1969
- Parringer, P.: Die dynamische Wechselbeziehung zwischen Gleiskette und Boden. Diss. TU München: 1982

Dr.-Ing. Paul R. Melcher
 Fachbereich 11
 Maschinentechnik
 Institut für Konstruktion
 Universität-GH-Siegen
 Paul-Bonatz-Straße 9–11
 D-5900 Siegen

Eingegangen am 20. März 1988