



Möglichkeiten einer prädikativen Beurteilung von gefährdeten Objekten infolge Tunnelvortrieben im innerstädtischen Bereich

Dr.-Ing. Rolf Wieland
GeTec GmbH Aachen

Dipl.-Ing. Anja Knipfer
TU Bergakademie Freiberg

Überreicht durch

**GeTec Ingenieurgesellschaft
für Informations- und
Planungstechnologie mbH**

Head Office

D-52068 Aachen, Rotter Bruch 26a

☎ +49 241 406607

Fax +49 241 406609

E-mail: getec@getec-ac.de

Rhein-Main Office

☎ +49 69 8010 6624

Fax +49 69 8010 4977

www.getec-ac.de

Fachaufsatz MTÜ 04-01D

Möglichkeiten einer prädikativen Beurteilung von gefährdeten Objekten infolge Tunnelvortrieben im innerstädtischen Bereich

Dr.-Ing. Rolf Wieland / Dipl.-Ing. Anja Knipfer, GeTec GmbH Aachen / TU Bergakademie Freiberg

Die zunehmende urbane Bebauung und der gleichzeitige Ausbau der Infrastruktur haben bereits im letzten Jahrhundert zu territorialen Engpässen in innerstädtischen Bereichen geführt. Mit einer Verlagerung des Schienen- und Verkehrsnetzes in den Untergrund wird dieser Zwiespältigkeit entgegengewirkt.

Die Erstellung von oberflächennahen Tunneln in überbauten Gebieten bringen Probleme mit sich. Während der Tunnelauffahrung verändert das umgebende Gebirge seinen Spannungszustand. Es beginnt zu konvergieren und bewegt sich in Richtung des geschaffenen Hohlraumes. Diese Bewegungen setzen sich bis zur Tagesoberfläche hin fort und führen zu Spannungsänderungen im Gründungsbereich der darüber liegenden Gebäude. Dieses Erscheinungsbild kann negative Auswirkungen auf die Stabilität und Nutzung des Bauwerkes haben.

In diesem Zusammenhang wurden und werden auf verschiedene Weise Verfahren zur Vorausberechnung des Bewegungsfeldes für den oberflächennahen Tunnelbau entwickelt, die jedoch vielfach nur eine Betrachtungsweise im ebenen Halbraum d.h. eine zweidimensionale Betrachtungsweise erlauben.

In Rahmen einer Diplomarbeit wurde daher das markscheiderische, auf der stochastischen Theorie basierende Bodenbewegungsmodell, das gegenwärtig mit Erfolg im bergmännischen Tiefbau eingesetzt wird, für eine Anwendung im oberflächennahen Tunnelbau untersucht. Unter Zuhilfenahme des Programmsystems CadBERG sollten zudem Aussagen über die Gefährdung von Bauwerken getroffen werden, die nicht nur als Grundlage zur Ergreifung von geeigneten Schutzmaßnahmen, sondern auch zur Optimierung messtechnischer Überwachungssysteme dienen.

Einflussparameter im Tunnelbau

Die Ursache der Bodenbewegung ist die Konvergenz des Ausbruchhohlraumes. Sie wird im wesentlichen durch die Standfestigkeit des umgebenden Gebirges und der Steifigkeit des Tunnelausbaus bestimmt. Die stattfindenden Spannungsumlagerungen rufen Bodenbewegungen hervor, die sich bis zur Tagesoberfläche auswirken. Die Verformungen an der Tagesoberfläche sind von der Steifigkeit des überlagernden Bodens sowie dessen Belastung abhängig. Auf die Konvergenz und damit auf das Bewegungspotential haben folgende geomechanischen Gegebenheiten Einfluss:

<ul style="list-style-type: none">• Verformungseigenschaften des Gebirges• Verformungseigenschaften des Tunnelausbaus• Größe des unverbauten Hohlraumes• Vortriebsgeschwindigkeit• Ortsbrustabstützung	Untersuchungen in situ
<ul style="list-style-type: none">• Qualität der Bauausführung	Erfahrungswert

Die zuerst aufgeführten Einflussparameter lassen sich aus Untersuchungen in situ bestimmen. Die Qualität der Bauausführung ist hingegen ein Erfahrungswert und wird im wesentlichen von folgenden situationsabhängigen Begebenheiten bestimmt:

- die Ortsbrustabstützung,
- der Zeitraum zwischen Hohlraumausbruch und Einbringen des Ausbaus,
- die unverbaute Abschlagslänge,
- eine unvollständige Ringspaltverpressung,
- die Vortriebsgeschwindigkeit,
- Überschnitt.

In Analogie zu bergbaubedingten Senkungströgen bildet sich auch bei der Erstellung von unterirdischen Hohlräumen infolge Tunnelauffahrungen an der Tagesoberfläche eine Senkungsmulde aus, die in ihrer flächenhaften Ausdehnung größer ist, als der erstellte Hohlraum. Das Senkungsvolumen ist je nach geomechanischen Auflockerungen gleich oder kleiner dem Konvergenzvolumen des Hohlraums. Die Senkungsbeträge nehmen vom Muldeninneren bis zum Randbereich nichtlinear ab. Denkt man sich einen Schnitt durch die Senkungsmulde, so wird die Ausformung der Profillinie deutlich. Die konvexe Krümmung im Muldenzentrum geht im Randbereich in eine konkave Krümmung über. Mathematisch kann dieser Verlauf annähernd über die e-Funktion wiedergegeben werden.

Modellansätze

Der geomechanische Zusammenhang von Ursache und Wirkung lässt sich nur schwer vollständig mathematisch beschreiben, da hierzu eine genaue Kenntnis über die Bodenverhältnisse notwendig ist. Es müssen also Vereinfachungen und Idealisierungen vorgenommen werden, um ein anwendbares Bewegungsmodell zu erstellen, Abbildung 1. Die Ansätze dafür werden unterschiedlich festgelegt.

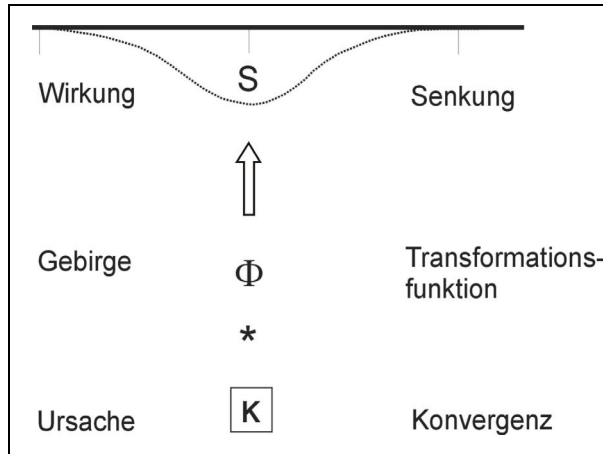


Abbildung 1: Ursache-Wirkungs-Prinzip, [SROKA, 1996]

Wie aus der Bergschadenkunde bekannt, werden zur Vorausberechnung von Bodenbewegungen dreidimensionale, auf der stochastischen Theorie basierende Bodenbewegungsmodelle angewendet. Die Modellparameter wurden und werden aus der Analyse gemessener Senkungslinien gewonnen. Bisher wurden diese Verfahren vorwiegend im bergmännischen Tiefbau eingesetzt. Die dafür gewonnenen Parameter beschreiben somit nicht das Bewegungsfeld einer oberflächennahen Tunnelauffahrung. Für eine Parameteranalyse dieser Problematik stehen gegenwärtig nur unzureichende Untersuchungen in situ zu Verfügung. Es sollte daher ein anderer Weg gefunden werden, die dreidimensionalen Senkungserscheinungen im oberflächennahen Tunnelbau mit dem markscheiderischen Modell vorzuberechnen.

Getrennt zu den Untersuchungen in der Bergschadenkunde wurden in der Vergangenheit im Bauingenieurwesen semi-empirischen Verfahren für den oberflächennahen Tunnelbau entwickelt. Diese berücksichtigen zum Teil bodenmechanische Kennwerte und geomechanische Spannungszustände bzw. Spannungszustandsänderungen. Die Berechnung erfolgt eben in einem Halbraummodell, was den entscheidenden Nachteil einer zweidimensionalen Betrachtungsweise in sich birgt. Bewegungseinflüsse, die außerhalb der Betrachtungsebene existieren, können nicht berücksichtigt werden. Auf diesem Wissenschaftsgebiet sind eine Vielzahl von Verfahren entwickelt worden, die das Senkungsverhalten mehr oder weniger gut wiedergeben.

Die Lösungsidee lag darin, ein Halbraummodell zu analysieren, das ausreichende geomechanische Parameter enthält, um die Senkungen nachzubilden. Aus der berechneten Profillinie der Bodenbewegungen sollten dann die Modellparameter für das stochastische Modell abgeleitet werden.

Das stochastische Modell

Das Senkungsverhalten wird über ein Volumenintegral entlang des aufgefahrenen Hohlraums wiedergegeben. Modellparameter sind der Wirkungswinkel und der Absenkungsfaktor. Ersterer beschreibt die grundrissliche flächenhafte Ausdehnung des Senkungsbereiches zur Hohlraumkontur über die Teufe. Der Absenkungsfaktor bestimmt sich aus

dem Verhältnis von Konvergenzvolumen zu Senkungsvolumen. Beide Modellparameter werden aus der Analyse gemessener Senkungen gewonnen.

Der Modellansatz ist die stochastische Beschreibung des physikalischen Masseausgleichsprozesses bei Gebirgs- und Bodenbewegungen, Abbildung 2. Bei einer vereinfachten, diskretisierten Betrachtungsweise werden der Abbauhohlraum und die überlagernden Horizonte in Volumeneinheiten zerlegt. Durch die Entnahme eines Abbauelementes verfüllen die darüber liegenden Elemente mit gleicher oder ungleicher Wahrscheinlichkeit den entstandenen Hohlraum. Diese auf den dreidimensionalen Raum erweiterbare Vorstellung der Bewegungsübertragung bildet die Basis für das stochastische Bewegungsmodell.

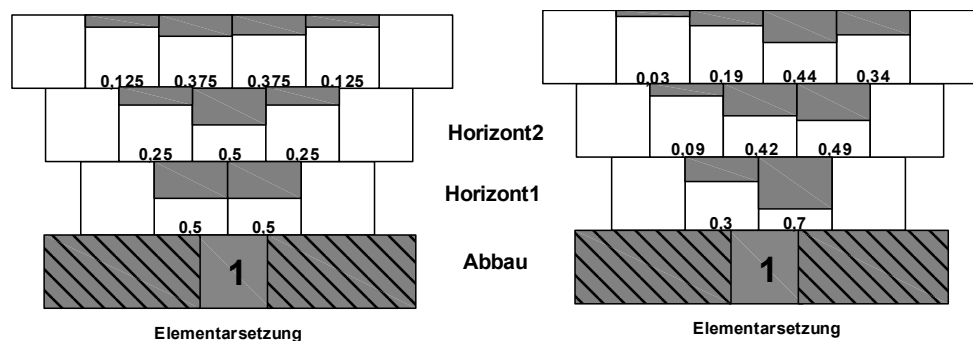


Abbildung 2: Bewegungsmodell nach der stochastischen Theorie [WIELAND, 1999]

Auf die mathematische Herleitung des Modells wird an dieser Stelle nicht eingegangen, sondern auf die Fachliteratur verwiesen, [WIELAND, 1984].

Das semi-empirische Halbraummodell

Nach Vergleichsbetrachtungen von bekannten Modellen im Bauingenieurwesen hat sich das Balkenmodell nach LEONHARDT als aussagekräftig erwiesen. Dieses Verfahren stellt das überlagernde Gebirge als einen schubsteifen Balken (G) dar, der auf den Tunnelhorizont (C) gebettet ist, Abbildung 3. Im Modell werden einflussreiche geomechanische Parameter berücksichtigt. Folgende Festlegungen werden für das Berechnungsverfahren getroffen:

- Der Überlagerungsbereich G wird als „schubsteifer Balken“ aufgefasst, der inkompressibel ist und ausschließlich Scherverformungen des Bruchmechanismus erfährt.
- Die Auflockerungen über der Tunnelfirste werden vernachlässigt, das Gebirge verhält sich volumenkonstant.
- Der Bereich C_B neben der Tunnelröhre wird als Bettung des schubsteifen Balkens angesehen.
- Der Tunnelausbau wird ebenfalls als Bettung aufgefasst, in dem die seitliche Stützung durch den Erddruck und der Bettungsreaktionsdruck berücksichtigt wird.
- Das Gesamtverhalten des Gebirges wird durch ein Ersatz-E-Modul dargestellt.

- Die Streuungen der Stoffgesetze realer Böden werden nach DUDDECK linearisiert, wobei kriechfähige Böden unberücksichtigt bleiben.
- Es erfolgt eine ebene Betrachtung.

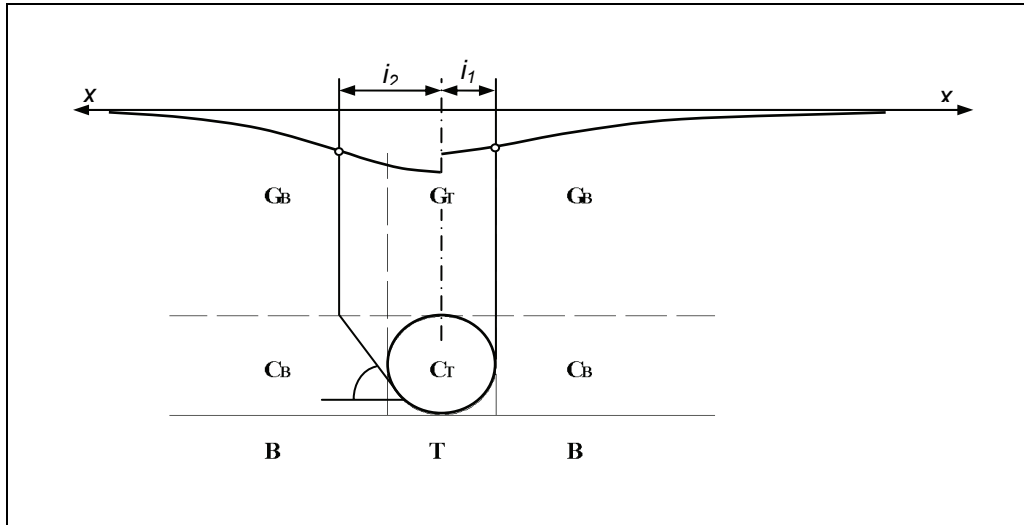


Abbildung 3: Modell des schubsteifen Balkens [LEONHARDT, 1988]

Die Baugrundverformungen werden über zwei Einflussfunktionen dargestellt. Im Bereich von $0 \leq x \leq i$ wird die Senkungsmulde mit einer quadratischen, im Bereich von $x > i$ mit einer exponentiellen Funktion simuliert. Der Inflexionspunkt i liegt über der Hohlraumkontur, der Nullpunkt in der Tunnelachse. Beide Funktionen bestimmen sich aus der Senkung $v_z(i)$ an der Stelle i , die über das Modell des schubsteifen Balkens ermittelt wird. Beide Funktionen haben an dieser Stelle einen stetigen Übergang.

$$v_z(x) = \frac{v_z(i)}{2\omega} \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{i} \right)^2 + 2\omega \right) \quad 0 \leq x \leq i \quad (1)$$

$$v_z(x) = v_z(i) \cdot \exp\left(\frac{i-x}{i \cdot \omega}\right) \quad x > i \quad (2)$$

ω - Gebirgskennzahl
 x - Laufvariable
 i - Inflexionspunkt

Die Gebirgskennzahl ω spiegelt das Steifigkeitsverhältnis zwischen dem Tunnelausbau, dessen Bettung und der Verformbarkeit und Belastung der Überlagerung wieder. Für die Herleitung der Gebirgskennzahl wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen, [LEONHARDT, 1988].

Modellanpassung

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der vorgestellten Modelle wurden Berechnungen anhand eines praktischen Beispiels durchgeführt. Für einen Tunnelvortrieb in Frankfurt standen die geometrischen Verhältnisse, geomechanische Gegebenheiten und Senkungsbeobachtungen zur Verfügung, [CHAMBOSSÉ, 1971]. Aus der Geometrie und der analysierten Senkungslinie lassen sich die Parameter für das stochastische Modell ableiten.

Für die Berechnungen mit dem stochastischen Modell müssen zuvor noch Geometrie-
anpassungen durchgeführt werden, da die die Bewegung verursachenden Volumenteilchen in Quadern zu definieren sind. Der Hohlraum wird daher durch ein flächengleiches Rechteck idealisiert, deren horizontale Breite dem Tunneldurchmesser entspricht, Abbildung 4.

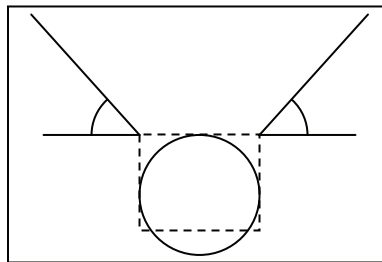


Abbildung 4: Geometrievereinfachung für das stochastische Modell

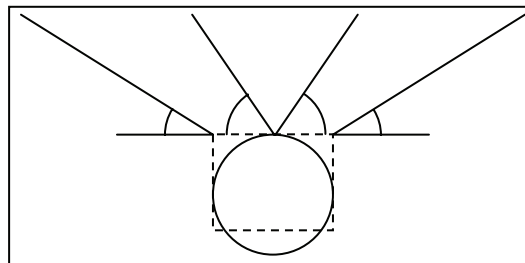


Abbildung 5: Wirkungswinkelansatz nach Erstberechnung

Nach einer ersten vergleichenden Berechnung wurde der wahre Senkungsverlauf nur unzureichend vom stochastischen Modell erfasst (gestrichelte Linie, Abbildung 6). Dies war einerseits auf die Idealisierung des Abbauquerschnittes und andererseits auf anfänglich einfachen Ansatz der Modellparameter zurückzuführen. Verschiedenen Untersuchungen führten letztlich zu einem differenzierter Ansatz des Wirkungswinkels und nachweislich guten Ergebnissen, (Abbildung 5 und Abbildung 7). Ein steilerer Winkelansatz über der Tunnelfirste verstärkt die Senkungswirkung im Muldeninneren. Der flachere Winkelansatz über dem Tunnelstoß bewirkt ein flacheres Auslaufen der Senkungslinie. Mit dieser Modellmodifikation kann die Senkungserscheinung im oberflächennahen Tunnelbau nachgebildet werden.

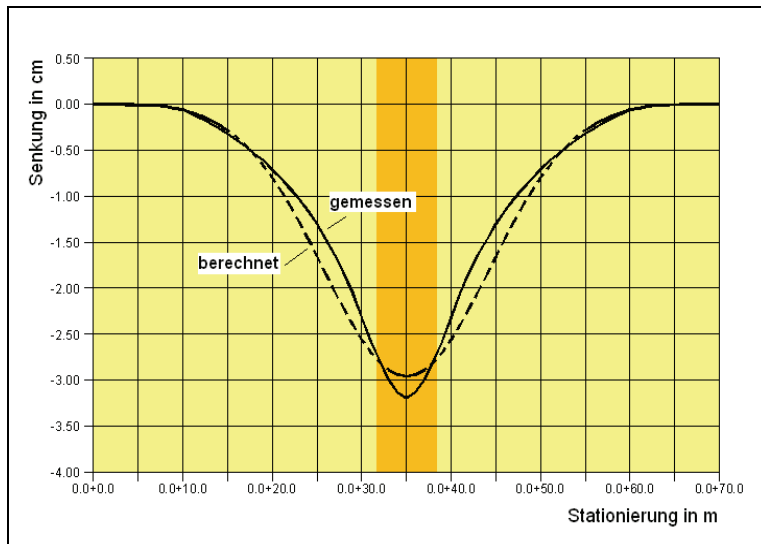


Abbildung 6: Ergebnis Erstberechnung

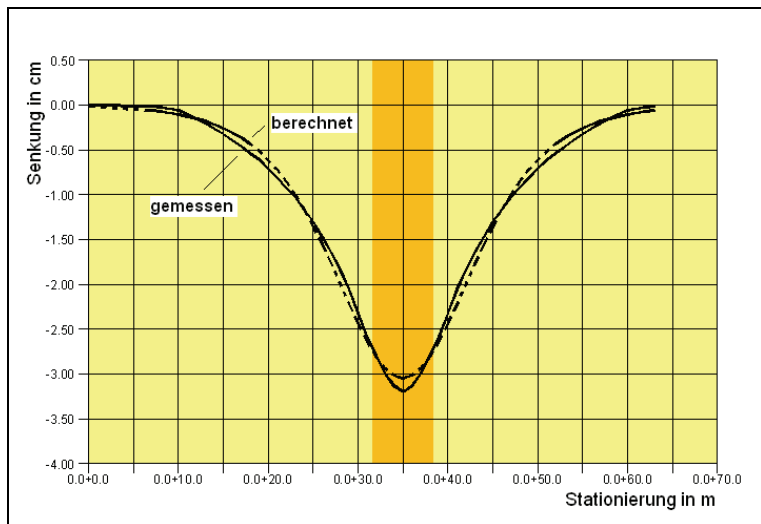


Abbildung 7: Ergebnis mit differenziertem Wirkungswinkelansatz

Für die Berechnungen mit dem Balkenmodell nach LEONHARDT wurden die Ergebnisse aus den geomechanischen Baugrunduntersuchungen verwendet. Das Berechnungsergebnis ist grafisch in der Abbildung 8 dargestellt.

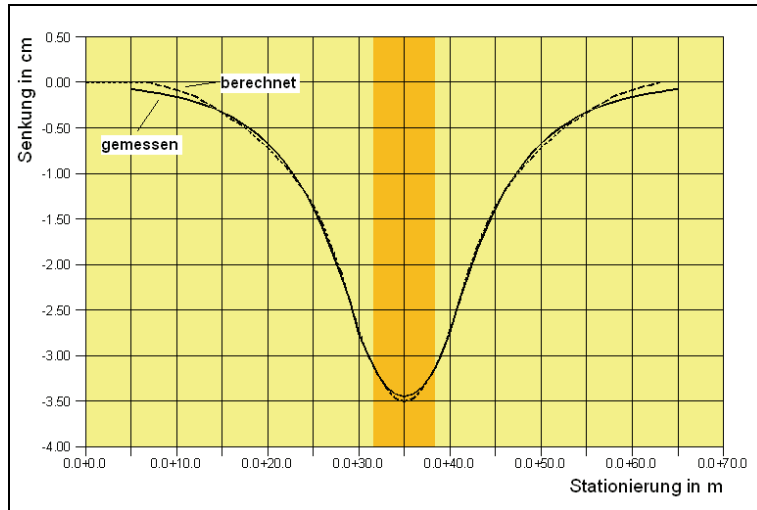


Abbildung 8: Berechnungsergebnis des Balkenmodells

Als erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass sowohl das stochastische Modell wie auch das Balkenmodell in der Lage ist, die Senkungserscheinungen bei ausreichender Kenntnis der jeweiligen Modellparameter im oberflächennahen Tunnelbau zufriedenstellend zu beschreiben.

Modellüberführung

Tabelle 1: Geomechanische Beeinflussung der stochastischen Parameter

Stochastische Parameter		Absenkungs- faktor	Wirkungs- winkel
Geomechanische Parameter			
Verformungsmodul der Überlagerung	E_G	-	x
Verformungsmodul im Tunnelniveau	E_B	x	x
Gleitflächenwinkel	v_a	-	x
Ruhedruckbeiwert	K_0	x	-
Überlagerungshöhe	$H_{\dot{u}}$	-	x
Auflast der Überlagerung	A	x	-
Tunneldurchmesser	D	-	x
Ringsteifigkeit	S_R	x	-
Qualitative Einflüsse	α	x	-

Während bei dem Balkenmodell zur Parametrisierung der Berechnung geomechanische Größen verwendet werden, fließen in dem stochastischen Berechnungsverfahren die generalisierten Einflussgrößen Wirkungswinkel und Absenkungsfaktor ein. Es stellte sich nun die Frage, inwieweit letztere ebenfalls mit Hilfe von geomechanischen Werten bestimmt werden können, um letztlich mittels des markscheiderischen Berechnungsverfahrens neben den Senkungen auch sämtliche dreidimensionalen Bewegungselemente ermitteln zu können. Aus dieser Überlegung heraus wurden Abhängigkeiten der stochastischen Parameter von den geomechanischen Einflussgrößen untersucht.

Dabei wurde unterschieden, ob die Änderung des geomechanischen Inputs Einfluss auf den Wirkungswinkel und/oder den Absenkungsfaktor hat, Tabelle 1.

Aus den Untersuchungsergebnissen wurden Kennliniendiagramme entwickelt, die es zum einen ermöglichen, die stochastischen Parameter für die jeweilige Situation abzuschätzen, zum anderen die Beeinflussung dieser durch den geomechanischen Input darlegen. Zur überschlägigen Ableitung der stochastischen Parameter aus den Diagrammen, wird der unverbesserte Wert aus dem jeweils ersten Diagramm abgelesen und mit den Faktoren aus den weiteren Diagrammen multipliziert, (Abbildung 9, Abbildung 10).

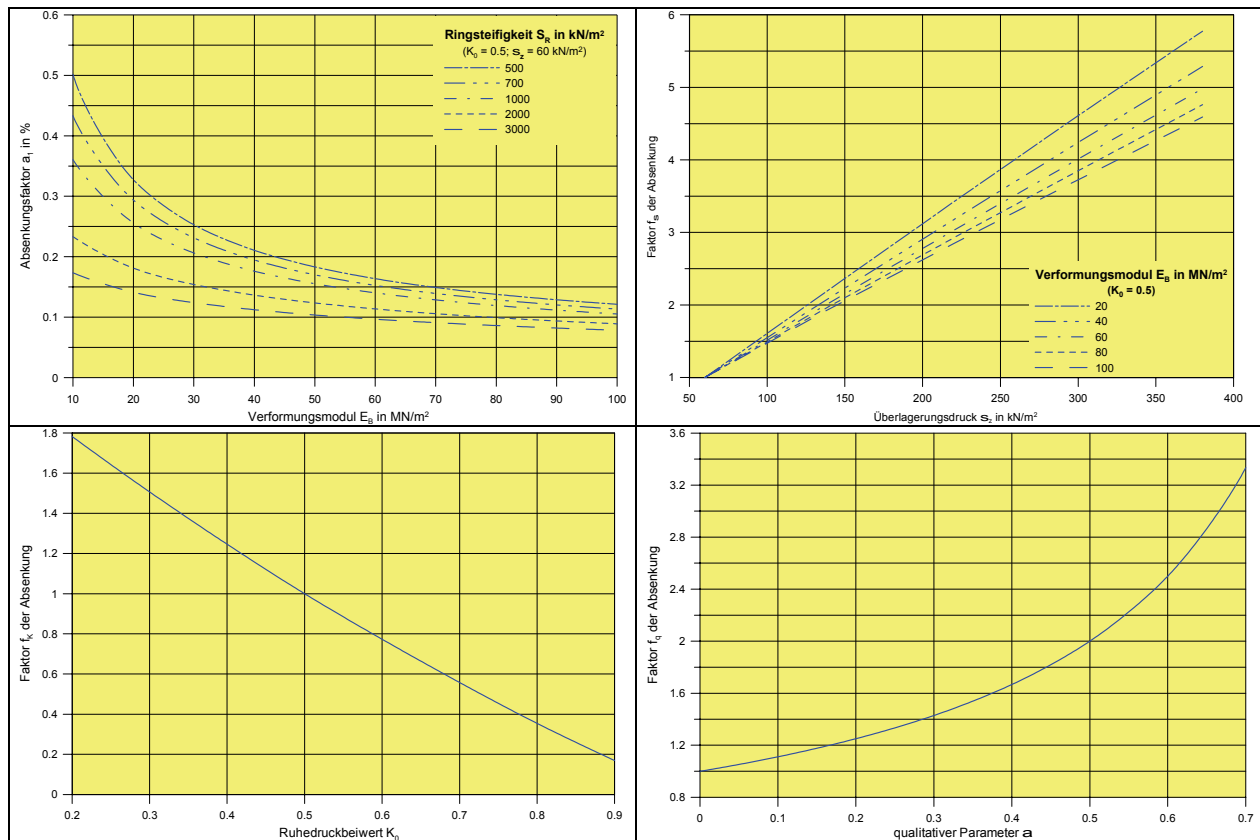


Abbildung 9: Kennliniendiagramme zur Ableitung des Absenkungsfaktors

Die Kurvenverläufe spiegeln physikalische Grundüberlegungen wieder. Wie aus den Diagrammen ersichtlich, bewirkt ein verformungsweicher Tunnelausbau und/oder Bettungsboden eine starke Konvergenz und somit einen großen Absenkungsfaktor. Weiterhin erzeugt der Überlagerungsdruck bestehend aus dem Deckgebirge und der darüber liegenden Bebauung eine Zunahme der Konvergenz bei einem weichen Bettungsboden und einem geringen Ruhedruckbeiwert.

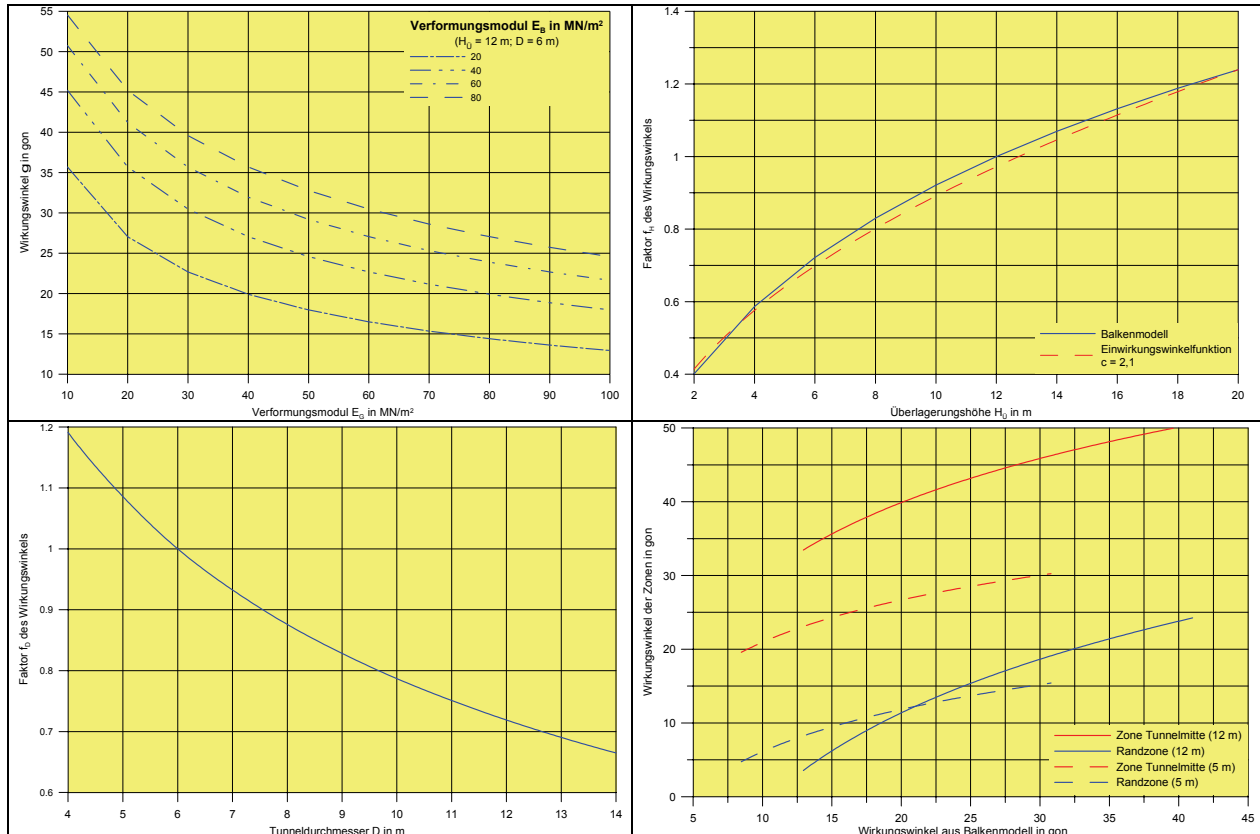


Abbildung 10: Kennliniendiagramme zur Ableitung der Wirkungswinkel

Ähnlich plausible Erklärungen sind aus den Diagrammen für den Wirkungswinkel abzuleiten. Je verformungsweicher sich das Deckgebirge darstellt, um so kleiner ist der Einwirkungsbereich. Ein steifer Boden biegt sich demzufolge bei gleichem Absenkungsfaktor nicht so stark durch, erzeugt aber einen größeren Einwirkungsbereich. Der Verlauf des Wirkungswinkels ist, wie aus den Einwirkungsfunktionen in der Bergschadenslehre bekannt, von der Teufe abhängig.

Mit Bekanntgabe der geomechanischen Einflussgrößen können nun Berechnungen für den oberflächennahen Tunnelbau über das stochastische Modell durchgeführt werden.

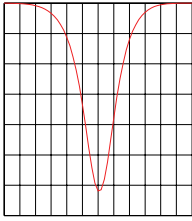
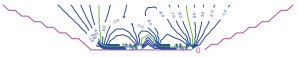
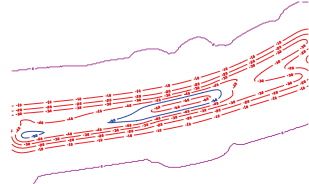

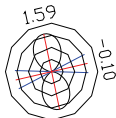
Bauwerksüberwachung

Die Bodenbewegungen aus dem Tunnelvortrieb wirken als Lastantrag im Gründungsbereich von Gebäuden. Durch das Eigengewicht des Bauwerkes werden über das Fundament Spannungen auf den Boden übertragen. Diese Pressungen des Bodens werden im Grundbau als Sohlspannungsverteilungen bezeichnet und über verschiedene Ansätze berechnet. Horizontal wird ein im Boden eingebettetes Bauwerk vom Erddruck belastet. Auf diese Spannungszustände wirken die aus dem Tunnelvortrieb induzierten Bodenbewegungen als Zusatzlast ein. Es ist von der Steifigkeit des Gebäudes abhängig, inwieweit es diesen Zustand ausgleichen kann bzw. standhält.

Wirken auf ein Bauwerk gleichmäßige Verschiebungen, so wird es zwar in seiner Lage, nicht aber in seiner Stabilität beeinflusst. Verschiebungsunterschiede hingegen wirken sich vertikal auf die Auflagerungsbedingung des Fundamentes und horizontal auf die Gegendrücke durch das Erdreich aus.

Mit den Berechnungen nach der stochastischen Methode erhält man nach der Volumendefinition Bodenbewegungsangaben im dreidimensionalen Bereich. So können Bewegungsfelder als auch Punktdefinitionen mit Bewegungsbeträgen und Bewegungsunterschieden angegeben werden. Das stochastische Modell wurde von WIELAND in das praktikable und aussagekräftige Programmsystem CadBERG überführt, Tabelle 2. Durch die Verknüpfung der Berechnungsergebnisse mit einer graphisch dargestellten Situation können verschiedenste Frage- und Problemstellungen analysiert werden.

Tabelle 2: Darstellungsformen im Programmsystem CadBERG

	Senkung	Verschiebung	Längenänderung	Schiefelage	Krümmung	Darstellungsform
<u>Schnittdarstellung</u> in definierter Richtung	x	x	x	x	x	
<u>Isoliniendarstellung</u> im definiertem Vertikalraster	x	x	x	x	x	
<u>Isoliniendarstellung</u> im definierten Horizontalraster	x	x	x	x	x	
<u>Vektordarstellung</u> für definierte Punktlage		x	x	x		
<u>Ellipsendarstellung</u> für definierte Punktlage			x	x	x	

Diese Möglichkeiten sollen an einem praktischen Beispiel verdeutlicht werden. Das Bau-los Linie 306 bezeichnet eine Tunnelauffahrung in der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) zur Erweiterung des Stadtbahnnetzes in Bochum. Die geplante und zum Teil aufgefahrne Trasse verläuft unter der städtischen Bebauung. Es ist daher von großer Wichtigkeit, die voraussichtlichen Bodenbewegungen zu erfassen. Das Tunnelbauwerk befindet sich ca. 12 m unter der Tagesoberfläche.

Eine besondere Problematik liegt bei der Unterfahrung einer Tiefgarage, deren Fundament nur 3 m über der Tunnelfirste liegt. Die Gründung besteht aus einer rasterförmigen Anordnung von Einzelfundamenten, deren Unterkante ca. 1 m unter der Bodenplatte liegen, Abbildung 11. Das Tunnelbauwerk wird in einer verwitterten Tonmergelschicht aufgefahren, die im Firstbereich durch eine bis zum Fundamentboden reichende Schluff-Sand-Schicht abgelöst wird. Belastungen erfährt es durch das Gewicht der überlagernden Schichten und des Gebäudes.

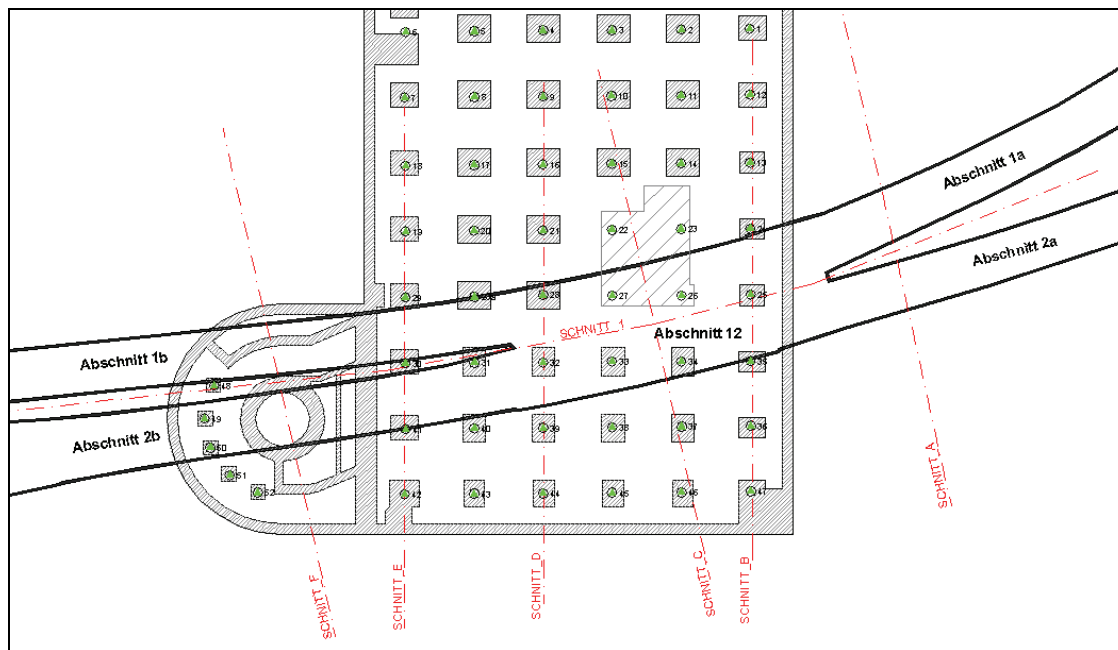


Abbildung 11: Situation Tunnelauffahrung unter der Tiefgarage

Die Abbildung 12 veranschaulicht die Profillinie der Senkung und der Schiefelage entlang verschiedener Schnittdefinitionen. Der Schnitt A und F verdeutlicht die Beeinflussung der Senkung durch die zweite Tunnelröhre.

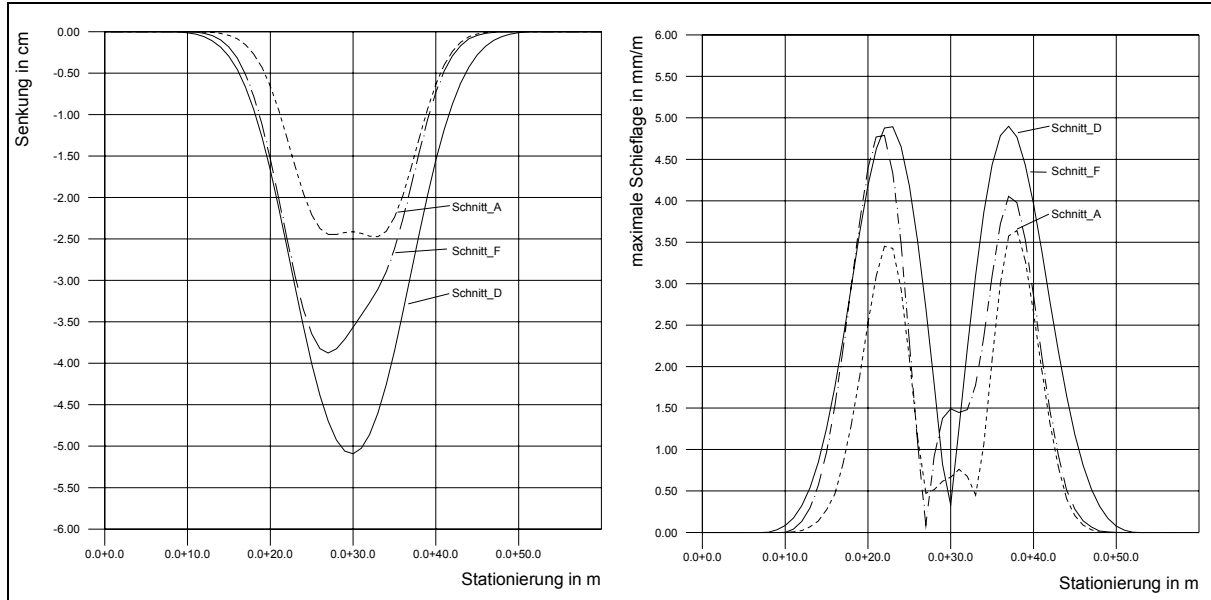


Abbildung 12: Schnittdarstellung des Senkungs- und Schieflagenverlaufes

Die Abbildung 13 zeigt eine punktdefinierte Auswertung für horizontale Längenänderungen. Die Umrechnung von vertikalen in horizontale Bodenbewegungen erfolgt über einen definierten Proportionalitätsfaktor. Horizontale Pressungen und Zerrungen des Bodens bewirken an den Vertikalflächen der Fundamente Änderungen des Erdrucks. Über die punktdefinierte Auswertung können Richtung und Betrag der Bodenbewegungen angegeben und daraus die Spannungsänderungen ermittelt werden.

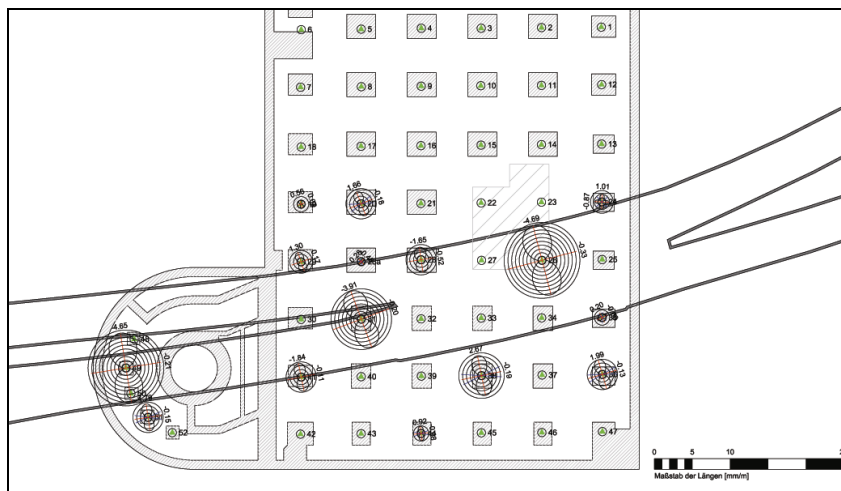


Abbildung 13: Punktweise Darstellung der horizontalen Längenänderungen

Über eine Rasterung des Berechnungshorizontes können flächenhafte Darstellungen erzeugt werden, Abbildung 14. Aus dieser Darstellungsform lassen sich Gefährdungsbereiche analysieren. Die Maximalen Senkungsunterschiede treten über den Tunnelstößen auf.

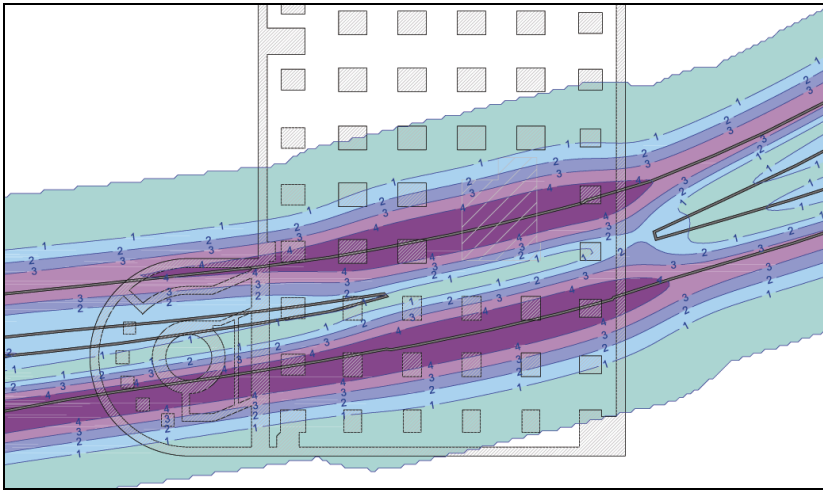


Abbildung 14: Rasterauswertung der Schiefelage

Zusammenfassung

Die Untersuchungen beschäftigen sich mit der Anwendbarkeit des stochastischen Bodenbewegungsmodells auf Verformungserscheinungen im oberflächennahen Tunnelbau. Die Bewegungsanalyse wird über die Parameter Wirkungswinkel und Absenkungsfaktor determiniert, deren Größe für die Verformungserscheinungen im oberflächennahen Tunnelbau unbekannt sind. Zur Ableitung dieser Werte muss das geomechanische Verhalten bei der Hohlraumerstellung erfasst werden. Wie aus Studien im Tunnelbau bekannt ist, hängt das Bewegungsverhalten von der Verformbarkeit des Lockergebirges ab.

Die Überführung der geomechanischen Gegebenheiten in das stochastische Berechnungsmodell geschieht über die Analyse eines zweidimensionalen Balkenmodells aus dem Bauingenieurwesen. Dieses Verfahren stellt das überlagernde Gebirge als einen schubsteifen Balken dar, der auf den Tunnelhorizont gebettet ist. Alle wichtigen beeinflussenden geomechanischen Größen werden im Berechnungssystem erfasst. Die Anwendbarkeit dieses Balkenmodells wurde anhand gemessener Senkungen am Beispiel eines Tunnelvortriebes in Frankfurt überprüft und für aussagekräftig befunden. Aus den Ergebnissen des Balkenmodells werden die stochastischen Parameter bestimmt und deren Abhängigkeit von den geomechanischen Inputwerte über Kennliniendiagramme aufgezeigt.

Mit Kenntnis der stochastischen Parameter kann eine dreidimensionale Bodenbewegungsberechnung erfolgen. Über die programmtechnische Realisierung in Cad-BERG ist es möglich, komplexe Geometrieverhältnisse, wie sie im innerstädtischen Bereich häufig vorkommen, sehr leicht zu erfassen und in der Berechnung zu berücksichtigen.

Die Arbeit basiert auf einer Modellanpassung durch ein anderes Modell und bedarf deshalb noch Überprüfungen und eventuell Anpassungen durch weitere Vergleiche mit dem Bewegungsfeld in situ. Dies gilt zum einem für die Annahme des Proportionalitätsfaktors zwischen der Schiefelage und den horizontalen Verschiebungen, zum anderen für die Abschätzung von Bewegungseinflüssen, die von der Qualität der Tunnelauffahrung abhängig sind.

Über die Anpassung des stochastischen Modells unter Berücksichtigung des Verformungsverhaltens bei der Tunnelauffahrung ist es gelungen, eine interdisziplinäre Verbindung zwischen der Bergschadenskunde und dem Bauingenieurwesen herzustellen. Die dreidimensionale Betrachtungsweise und komplexe Erfassung der Situation bietet eine Alternative zu FEM-Modellen.

Literaturangaben

- [CHAMBOSSE, 1971] Chambosse, G.: Untersuchung über die Auswirkung von Spritzbeton als Tunnelauskleidung im Vergleich zur Schildbauweise bei geringer Überdeckung im Lockergestein. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, F4 / 1969, 1971
- [LEONHARDT, 1988] Leonhardt, G.: Gebirgsdruckumlagerung und Geländesenkung bei Tunneln - das technische Modell des Schubsteifen Balkens in seiner Anwendung auf Fragen des Tunnelbaus. Grundbau, Bodenmechanik und unterirdisches Bauen, Heft 7, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, 1988
- [SROKA, 1996] Sroka, A.: Deformationsmessungen und –analysen zur Parameteridentifikation Geometrischer Bodenbewegungsmodelle im Markscheidewesen. International Symposium on Deformation Measurements (FIG), Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Hannover, 1996
- [WIELAND, 1984] Wieland, R.: Ein Verfahren zur Senkungsvorausberechnung über Abbauen in flachgelagerten Flözen auch unter Berücksichtigung der Besonderheiten eines durchbauten Gebirgskörpers. Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen der RWTH Aachen, 1984
- [WIELAND, 1999] Wieland, R.: Aspekte zur Wirkungsweise der Modellparameter bei der Vorausberechnung von Gebirgs- und Bodenbewegungen. Vortrag anlässlich der 42. Wissenschaftlichen Tagung des DMV in Cottbus, 1999