

Beitrag zur Vorausberechnung bergbaubedingter Bodenbewegungen bei diskontinuierlichem Abbaufortschritt

HEINZ-JÜRGEN KATELOE

Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau, RWTH Aachen University, Germany

Kurzfassung

Mithilfe dynamischer Modelle wird in diesem Beitrag der zeitliche Verlauf des Senkungsprozesses betrachtet. Die auf einen Tagespunkt bezogenen Simulationsberechnungen zeigen bei einem nicht verzögerten Bewegungsablauf sowie einer während der Arbeitswoche konstanten Abbaugeschwindigkeit den Einfluss regelmäßiger zweitägiger Wochenend-Abbaustillstände bereits anhand der treppenartig verlaufenden Kurven der betrachteten zeitlichen Bodenbewegungselemente, deren Beschleunigungskurven in diesem Fall zwischen positiven und negativen Werten oszillieren. Die abbaudynamische Wirkung der Wochenend-Abbaustillstände ist bei langsamerem Bewegungsablauf weniger deutlich. Auch der Einfluss ungleichmäßiger Abbaufortschritte und unregelmäßiger Abbaustillstände ist bei nicht verzögertem Bewegungsablauf sehr deutlich in der Zeit-Senkungs-Kurve erkennbar.

Schlagworte: Abbaugeschwindigkeit, Abbaustillstände, Zeitliche Bodenbewegung, Bodenbewegungsgeschwindigkeit, Bodenbewegungsbeschleunigung

1. Stochastisches Gebirgs- und Bodenbewegungsmodell

Basierend auf der Theorie der stochastischen Medien (Knothe, 1953; Litwinišyn, 1956) und am Beispiel eines simulierten Strebbaus behandelt dieser Beitrag die Vorausberechnung der zeitlichen Senkung, Schiefelage und Zerrung/Pressung (Kateloe, 2002).

Dem ursächlichen Abbaugeschehen werden hierbei unter Einsatz der modifizierten Gauß'schen Dichtefunktion der Normalverteilung, die eine Fundamentallösung bei physikalischen Ausgleichsprozessen darstellt, die Gebirgs- und Bodenbewegungen als Wirkungen zugeordnet. Die elementare Senkungsfunktion dient der Berechnung der elementaren Senkung innerhalb der durch ein einzelnes Abbauelement dV erzeugten Elementarmulde (Abb. 1). Der elementare Senkungsbetrag ist abhängig von der horizontalen Distanz r des Berechnungspunktes zum Zentrum der Elementarmulde, das sich bei horizontal geschichtetem Gebirge lotrecht über dem Abbauelement befindet.

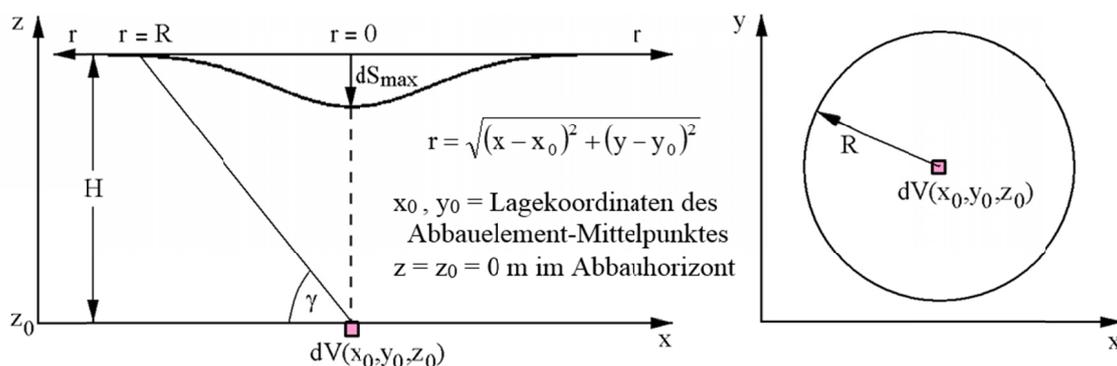


Abb. 1. Schematische Darstellung der von einem Abbauelement dV an der Tagesoberfläche erzeugten rotationssymmetrischen Elementarmulde. Links: Darstellung im Vertikalschnitt. Rechts: Darstellung im Grundriss

Wird ein infinitesimales Abbauelement dV in der Praxis der Bodenbewegungsvorausberechnung durch ein endliches Abbauelement ΔV ersetzt, so kann die elementare Senkungsfunktion in folgender Form angegeben werden:

$$\Delta S(x, y, z) = -\frac{k}{\pi} \cdot \frac{a \cdot \Delta V}{(R(z))^2} \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{(R(z))^2}\right) \quad (1)$$

$$k = -\ln 0.01 = 4.60517,$$

R = Haupteinwirkungsradius.

Nach dem Superpositionsprinzip können die den einzelnen Abbauelementen zuzuordnenden Elementarmulden zu einer Gesamtmulde aufaddiert werden. Ausgehend von der elementaren Senkungsfunktion können die Funktionen weiterer Bodenbewegungselemente abgeleitet werden (Sroka und Schober, 1986).

2. Modellierung der zeitlichen Entwicklung der Senkungsmulde

Die zeitliche Entwicklung der Senkungsmulde wird in diesem Beitrag mithilfe dynamischer Modelle, die auf dem Wachstumsgesetz von Mitscherlich basieren, in die Vorausberechnung integriert. Schwerpunkt der Betrachtungen ist der Einfluss der Abbaugeschwindigkeit und der Abbaustillstände auf den Bodenbewegungsprozess.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Verhieb eines Abbauelementes in einem Moment erfolgt (Sprungmodell). In der Vorausberechnungspraxis entspricht der Verhiebszeitpunkt der halben Herstellungszeit des elementaren Hohlraumes.

Das dynamische Zwei-Parameter-Modell von Sroka und Schober beschreibt das zeitliche Konvergenzverhalten im Abbaubereich sowie die Verzögerungseigenschaften des überlagernden Gebirges (Schober, 1982; Schober und Sroka, 1983; Kwinta et al., 1996). Für das Sprungmodell lautet die Zeitfunktion von Sroka und Schober:

$$\Phi(\Delta t) = 1 + \frac{\xi}{f - \xi} \exp(-f \cdot \Delta t) - \frac{f}{f - \xi} \exp(-\xi \cdot \Delta t) \quad (2)$$

Δt = Einwirkungszeit eines Abbauelementes,

ξ, f = Zeitkoeffizienten.

Demgegenüber enthält die Zeitfunktion von Knothe nur einen Zeitkoeffizienten c (Kwinta et al., 1996):

$$z(\Delta t) = 1 - \exp(-c \cdot \Delta t) \quad (3)$$

Wird gemäß Abbildung 1 im Abbauhorizont $z = z_0 = 0$ m festgelegt, dann wird der Zeitkoeffizient c im Gebirgshorizont z nach folgender Gleichung berechnet:

$$c(z) = c(H) \cdot \left(\frac{H}{z}\right)^n \quad ; \quad n \in [0.5; 0.6] \quad (4)$$

$c(H)$ = Zeitkoeffizient an der Tagesoberfläche.

Die beiden genannten Zeitfunktionen verlaufen prinzipiell qualitativ gleichwertig, Abweichungen ergeben sich jedoch insbesondere für Einwirkungszeiten nahe Null. Die erste und die zweite Ableitung (Geschwindigkeit, Beschleunigung) der Zeitfunktion des Zwei-Parameter-Modells zeigen Kurvenverläufe, die den realen Verhältnissen mehr entsprechen als dies beim Ein-Parameter-Modell der Fall ist (Kwinta et al., 1996).

Für einen Strebabbau ist in Abbildung 2 die Wirkungsweise der Zeitkoeffizienten dargestellt: Bei konstanter Abbaugeschwindigkeit wächst das Abbauvolumen $V(t)$ mit fortschreitendem Abbau bis zu dem Endvolumen V^E bei Beendigung des Abbaus an (lineares Abbaumodell, vgl. Schober und Sroka 1983). Nach einer kurzen Anlaufzeit des Strebges verlaufen die Zeitkurven des Abbauvolumens $V(t)/V^E$, des Konvergenz-

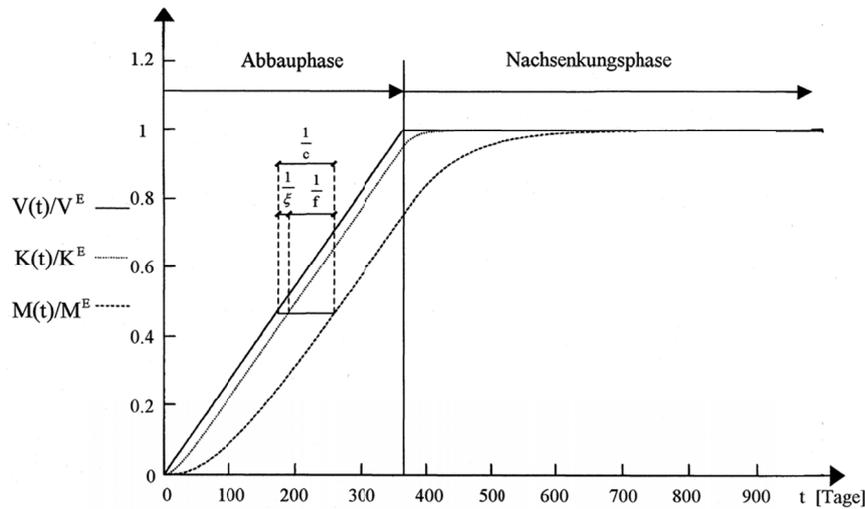


Abb. 2. Relatives Abbau-, Konvergenz- und Muldenvolumen in der Abbau- und in der Nachsenkungsphase ($\xi = 20 \text{ Jahr}^{-1}$, $f = 5 \text{ Jahr}^{-1}$) (nach Sroka et al., 1987)

volumens $K(t)/K^E$ und des Muldenvolumens $M(t)/M^E$ parallel zueinander. Die Volumenverzögerung $\Delta t_{V,M}$ entspricht dem Kehrwert des Zeitkoeffizienten c :

$$\Delta t_{V,M} = \frac{1}{c} = \frac{1}{\xi} + \frac{1}{f} = \frac{f + \xi}{f \cdot \xi} \quad (5)$$

Der Zeitkoeffizient c beschreibt auch den Zuwachs des relativen Muldenvolumens in der Nachsenkungsphase. Im Falle $c = \infty \text{ Jahr}^{-1}$ würden Ursache und Wirkung zeitgleich eintreten ($\Delta t_{V,M} = 0 \text{ Tage}$), es käme also zu einer nicht verzögerten Bildung der Senkungsmulde.

3. Zeitliche Senkung, Schiefelage und Zerrung/Pressung über einem durch Wochenend-Abbaustillstände unterbrochenen Strebbau

Die im Folgenden beschriebenen dynamischen Simulationsberechnungen (Kateloe, 2002) setzen voraus, dass der Verhieb eines endlichen Abbauelementes ΔV in einem Moment erfolgt (Sprungmodell). Um den Einfluss der Wochenend-Abbaustillstände aufzeigen zu können, wird die Begrenzung der Abbauelemente anhand des täglichen Abbaufortschrittes vorgenommen. Die Abbaugeschwindigkeit als eine der grundlegenden Größen zur Beurteilung der Dynamik der Gebirgs- und Bodenbewegungen wird somit unmittelbar in die Berechnung einbezogen. Anhand eines im Verlaufe der Arbeitswoche mit konstanter Geschwindigkeit fortschreitenden Abbaus (Abb. 3) wird der Einfluss zweitägiger Wochenend-Abbaustillstände auf den zeitlichen Bewegungsablauf des Tagespunktes P untersucht.

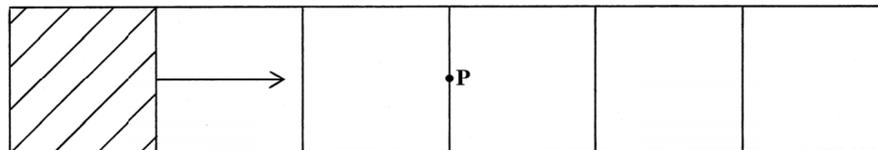


Abb. 3. Grundrissliche Darstellung einer Abbausituation mit monatlichen Strebbständen bei gleichmäßigem Abbaufortschritt

Die Berechnungen der dynamischen Größen wurden mithilfe eines an der RWTH Aachen entwickelten EDV-Programms (Kateloe et al., 2002) sowie mit folgenden Eingangswerten durchgeführt:

- Abbaulänge: 1800 m
- Streblänge: 300 m
- Abbaugeschwindigkeit: 10 m/Fördertag
- Abbauteufe: 1000 m, söhliche Lagerung
- Abbaumächtigkeit: 2.0 m

- Absenkungsfaktor: 0.9
- Tangens des Grenzwinkels: 2
- Haupteinwirkungsradius: 500 m
- Abstand des Tagespunktes P von der Anlaufkante: 900 m
- Abstand des Tagespunktes P von den Abbaubegleitstrecken: 150 m
- Koeffizienten der Zeitfunktion von Sroka und Schober:
 - $\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$ (nicht verzögerter Bewegungsablauf)
 - $\xi_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}, f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$ (für die Abbau- und Gebirgsverhältnisse des Ruhrbergbaus typische Verzögerung des Bewegungsablaufes).

Die Senkung des Tagespunktes P zum Zeitpunkt t entspricht der Summe der anhand der Gleichung 1 berechneten und mit den zugehörigen Zeitfaktoren $\Phi(\Delta t_i)$ (Gl. 2, Zeitfunktion von Sroka und Schober) multiplizierten elementaren Endsenkungen $\Delta S_{P,i}$:

$$S_P(t) = \sum_{i=1}^q (\Delta S_{P,i} \cdot \Phi(\Delta t_i)) \quad (6)$$

q = Anzahl der Abbauelemente

$\Delta t_i = t - T_i$ = Einwirkungszeit des jeweiligen Abbauelementes

T_i = Vertriebszeitpunkt des jeweiligen Abbauelementes

Diese Vorgehensweise – Addition der mit den jeweils zugehörigen Zeitfaktoren multiplizierten elementaren Bodenbewegungsendwerte – wird auch bei der Ermittlung der auf den Berechnungspunkt bezogenen zeitlichen Schiefelage und Zerrung/Pressung angewandt. Beschreibt hierbei ein Abbaustreifen den an einem Arbeitstag erfolgten Fortschritt der Strebfront, so ist die Einwirkungszeit der in diesem Abbaustreifen enthaltenen Abbauelemente identisch.

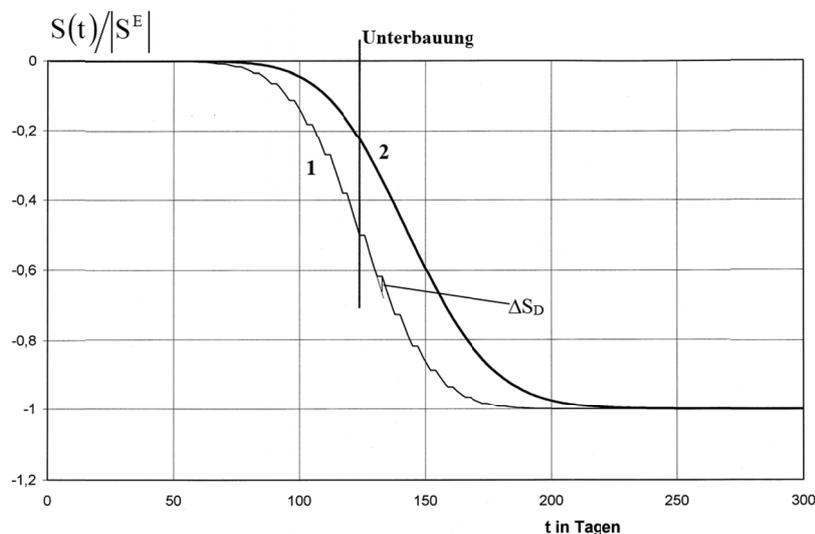


Abb. 4. Zeit-Senkungs-Kurven des Tagespunktes P bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

Abbildung 4 enthält die auf den Tagespunkt P bezogene und mit den Zeitkoeffizienten $\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$ berechnete zeitliche Endsenkungs-Kurve (=Zeit-Senkungs-Kurve 1) unter Berücksichtigung zweitägiger Wochenend-Abbaustillstände, das heißt die auf den Abbaustand zum jeweiligen Zeitpunkt t bezogenen Summen der Senkungspotenziale der gewonnenen Abbaustreifen. Der Bodenbewegungsvorgang unterliegt hier also keinerlei Verzögerung und führt zu einem treppenartigen Verlauf der Zeit-Senkungs-Kurve 1. Die halbe Endsenkung des Tagespunktes P wird zum Zeitpunkt der Unterbauung erreicht. Abweichend von Kurve 1 nimmt die Zeit-Senkungs-Kurve 2 ($\xi_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}, f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$) aufgrund des zeitlichen Konvergenzprozesses im Abbauniveau und den Verzögerungseigenschaften des überlagernden Gebirges den dargestellten verzögerten Verlauf. Hier wird, im Gegensatz zur Kurve 1, zum Zeitpunkt der Unterbauung noch nicht die halbe Endsenkung des Tagespunktes erreicht, und das Abklingen der Senkung erfolgt erst später.

Die Wochenend-Abbaustillstände verursachen ein Senkungsdefizit ΔS_D (Abb. 4), das zu Beginn der Arbeitswoche gegenüber der ohne Abbaustillstand sich ergebenden Zeit-Senkungs-Kurve vorliegt. Nach Sroka (1999) gilt:

$$\Delta S_D \approx \dot{S}(T) \cdot \Delta t_{WE} \quad \text{für } c = \infty \text{ Jahr}^{-1} \quad (7)$$

$$\Delta S_D \approx c \cdot \dot{S}(T) \cdot \frac{\Delta t_{WE}^2}{2} \quad \text{für } c \ll \infty \text{ Jahr}^{-1} \quad (8)$$

$\dot{S}(T)$ = Senkungsgeschwindigkeit zu Wochenendbeginn
 Δt_{WE} = Anzahl der Tage des Abbaustillstandes
 c = Zeitkoeffizient nach Knothe.

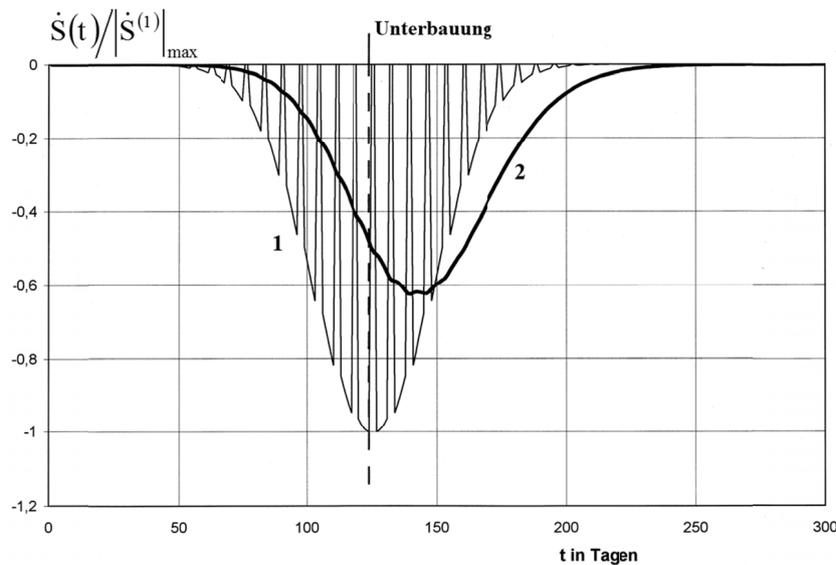


Abb. 5. Zeitliche Senkungsgeschwindigkeit des Tagespunktes P bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

Die Kurve 2 der zeitlichen Senkungsgeschwindigkeit des Tagespunktes P (Abb. 5, $\zeta_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$) lässt den Einfluss der Abbaustillstände insbesondere im Bereich des Kurvenmaximums erkennen. Der Maximalbetrag der für nicht verzögerten Bewegungsablauf berechneten Kurve 1 ($\zeta_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) tritt früher – zum Zeitpunkt der Unterbauung – ein als der geringere Maximalbetrag der Kurve 2. An den Wochenenden geht die Senkungsgeschwindigkeit bei nicht verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 1) jeweils auf Null zurück.

Der Einfluss der Abbaustillstände überlagert den grundlegenden Verlauf (Abb. 6) der mit den Zeitkoeffizienten $\zeta_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$ und $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$ berechneten Kurve 2 der zeitlichen Senkungsbeschleunigung des Tagespunktes P . Demgegenüber weist die Kurve 1 ($\zeta \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) eine weit ausgeprägtere Charakteristik auf: Der Verzögerungseffekt der Abbaustillstände ist durch eine starke Verlangsamung des Senkungsprozesses zu Beginn des Wochenendes und eine erneute starke Beschleunigung bei Wiederaufnahme der Gewinnung erkennbar. Daher oszilliert die Beschleunigungskurve hier zwischen positiven Werten (=Verzögerung am Wochenende) und negativen Werten (=Beschleunigung des Senkungsprozesses insbesondere zu Beginn der Arbeitswoche). Da die Beträge der zeitlichen Senkungsbeschleunigung im Falle der Kurve 2 sehr viel geringer sind als im Falle der Kurve 1, wurde bei der Kurve 2 der Faktor 30 eingeführt.

Als weiteres Bodenbewegungselement wird die zeitliche Entwicklung der Schiefelage in Abbaurichtung betrachtet. Abbildung 7 zeigt die auf den betrachteten Tagespunkt bezogene zeitliche Endschieflage-Kurve (=Zeit-Schieflage-Kurve 1, $\zeta_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) und die mit den Zeitkoeffizienten $\zeta_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$ und $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$ berechnete Zeit-Schieflage-Kurve 2. Der den Einfluss der Abbaustillstände verdeutlichende treppenartige Verlauf der Kurve 1 wird unter Berücksichtigung der für die Abbau- und Gebirgsverhältnisse des Ruhrbergbaus typischen Verzögerung des Bewegungsprozesses (Kurve 2) vergleichmäßigt, wobei das Maximum der Kurve 2 zu einem späteren Zeitpunkt eintritt als das betragsmäßig größere Maximum der Kurve 1.

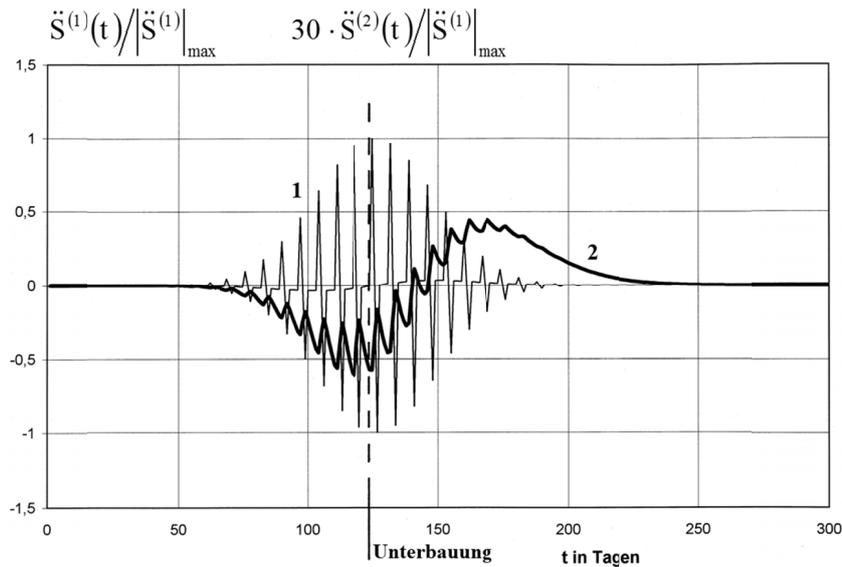


Abb. 6. Zeitliche Senkungsbeschleunigung des Tagespunktes P bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

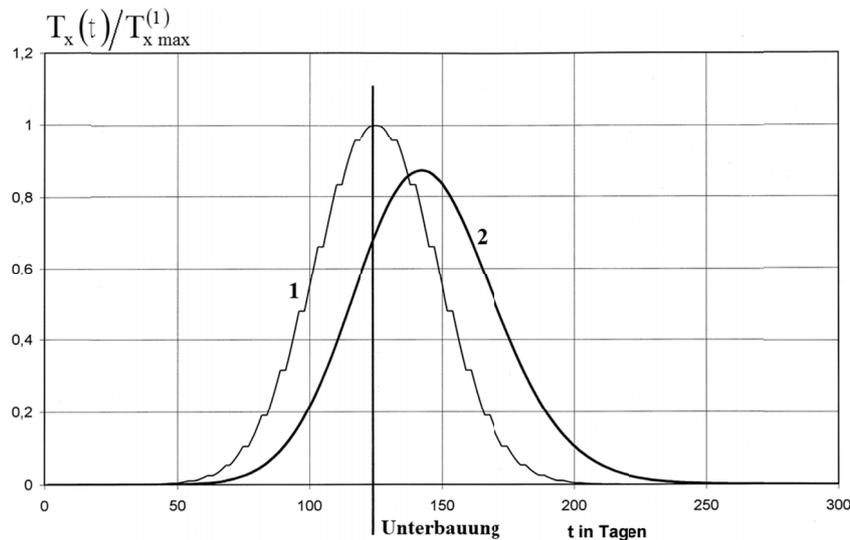


Abb. 7. Auf den Tagespunkt P bezogene Zeit-Schiefage-Kurven in Abbaurichtung bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

Da die maximale Schiefage zum Zeitpunkt der Unterbauung des betrachteten Tagespunktes (Kurve 1 in Abb. 7, $\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) beziehungsweise 18 Tage später (Kurve 2 in Abb. 7, $\xi_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$) eintritt und bis zum Erreichen des Abbaues die Schiefage in Abbaurichtung auf Null zurückgeht, weist die Schiefagegeschwindigkeit zum Zeitpunkt der Unterbauung (Kurve 1 in Abb. 8) bzw. 18 Tage später (Kurve 2 in Abb. 8) einen Vorzeichenwechsel auf. Im Falle der Kurve 1 ($\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) geht die Schiefagegeschwindigkeit an den Wochenenden jeweils auf Null zurück. Kurve 2 zeigt den Einfluss der Wochenend-Abbaustillstände weit weniger deutlich (vgl. Abb. 5).

Die zeitliche Schiefagebeschleunigung (Abb. 9) weist bei nicht verzögertem Bewegungsablauf einen oszillierenden Kurvenverlauf auf (Kurve 1, $\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$), der sich aus der starken Bewegungsverzögerung zu Beginn des Wochenendes und der erneuten Bewegungsbeschleunigung zu Beginn der Arbeitswoche ergibt. Aufgrund des Erreichens des auf die Abbaurichtung bezogenen dynamischen Schiefagemaximums zum Zeitpunkt der Unterbauung (s. Kurve 1 in Abb. 7) des betrachteten Tagespunktes und dem damit verbundenen Vorzeichenwechsel der zeitlichen Schiefagegeschwindigkeit geht die Oszillation der Zeit-Schiefagebeschleunigungs-Kurve 1 in Abbildung 9 zu diesem Zeitpunkt stark zurück. Auch die Kurve 2 der zeitlichen Schiefagebeschleunigung ($\xi_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$) zeigt deutlich den Einfluss

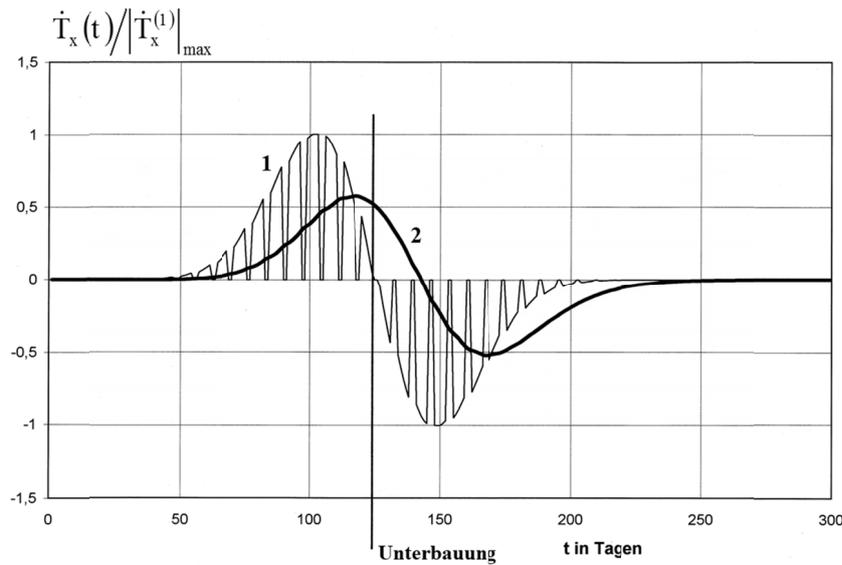


Abb. 8. Auf den Tagespunkt P bezogene zeitliche Schiefegegeschwindigkeit in Abbaurichtung bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

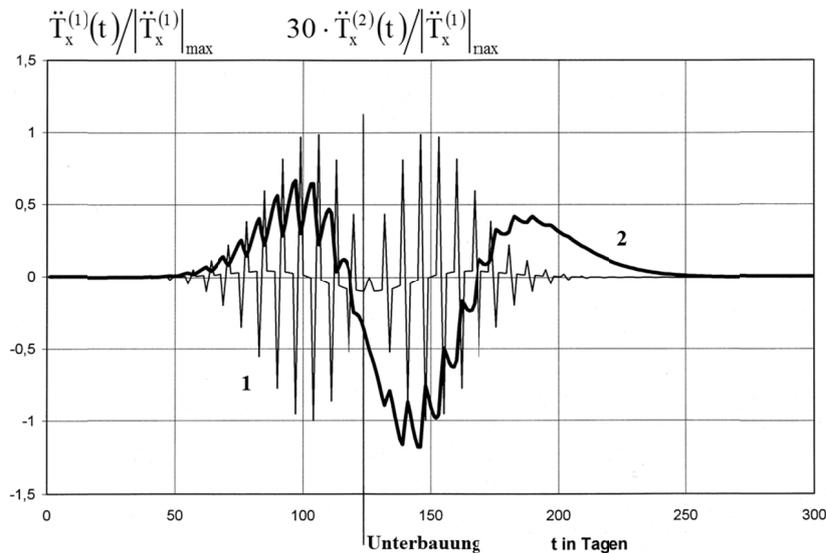


Abb. 9. Auf den Tagespunkt P bezogene zeitliche Schiefegebeschleunigung in Abbaurichtung bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

der Wochenend-Abbaustillstände, jedoch wurde aufgrund der gegenüber der Kurve 1 wesentlich geringeren Beschleunigungsbeträge wiederum der Faktor 30 eingeführt (vgl. Kurve 2 in Abb. 6).

Abbildung 10 zeigt den jeweiligen Verlauf der auf die Abbaurichtung bezogenen Zeit-Zerrungs-/Pressungs-Kurven (Kurve 1: $\zeta_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$; Kurve 2: $\zeta_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$). Der Übergang von Zerrung in Pressung findet im Falle der Kurve 1, deren treppenartiger Verlauf den Einfluss der Wochenend-Abbaustillstände verdeutlicht, zum Zeitpunkt der Unterbauung des Tagespunktes P statt. Die bezüglich des betrachteten Tagespunktes bei nicht verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 1) berechneten Maximalwerte der zeitlichen Zerrung bzw. Pressung werden im Falle der Kurve 2 nicht erreicht. Gleichzeitig ist als Folge eines verzögerten Bewegungsvorganges das Zerrungsmaximum der Kurve 2 betragsmäßig etwas größer als ihr Pressungsmaximum.

Der bezüglich des betrachteten Tagespunktes berechnete Maximalbetrag der zeitlichen Zerrungs-/Pressungsgeschwindigkeit wird zum Zeitpunkt der Unterbauung (Kurve 1 in Abb. 11) beziehungsweise 16 Tage später (Kurve 2) erreicht. Die Abbaustillstände bewirken, dass die Kurve 1 an den Wochenenden jeweils auf Null zurückgeht. Die unter Berücksichtigung der für die Abbau- und Gebirgsverhältnisse des Ruhrbergbaus typischen Verzögerung des Bewegungsprozesses ($\zeta_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, $\zeta_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$) berechnete Kurve 2 lässt den Einfluss der Abbaustillstände weniger deutlich erkennen (vgl. Kurve 2 in Abb. 5).

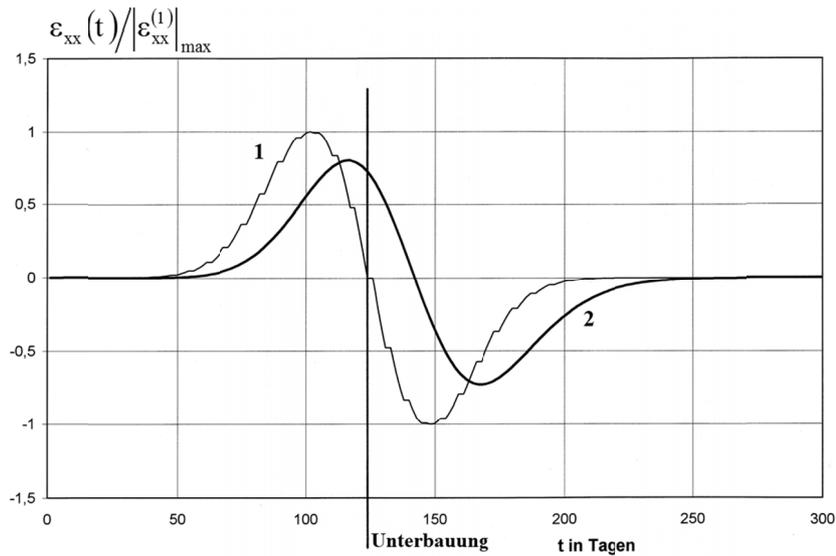


Abb. 10. Auf den Tagespunkt P bezogene Zeit-Zerrungs-/Pressungs-Kurven in Abbaurichtung bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

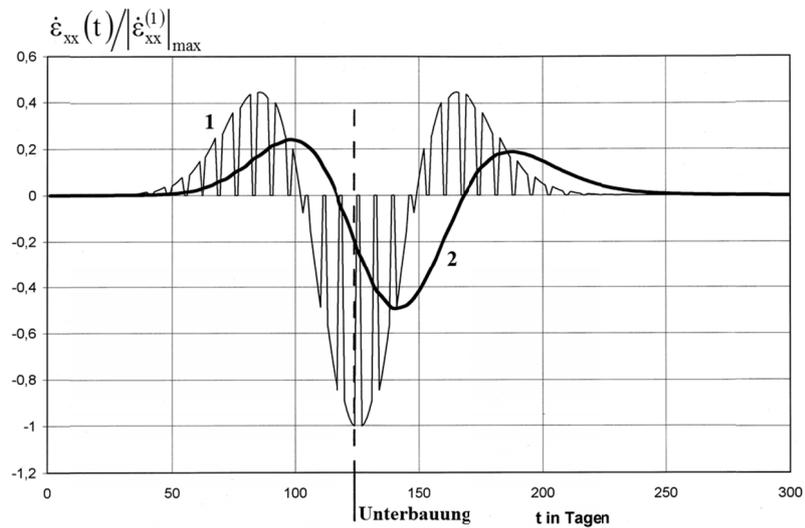


Abb. 11. Auf den Tagespunkt P bezogene zeitliche Zerrungs-/Pressungsgeschwindigkeit in Abbaurichtung bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

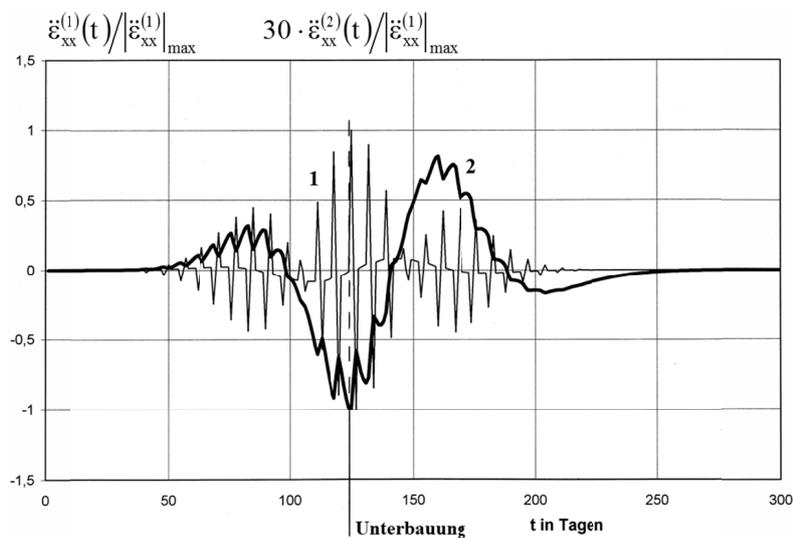


Abb. 12. Auf den Tagespunkt P bezogene zeitliche Zerrungs-/Pressungsbeschleunigung in Abbaurichtung bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

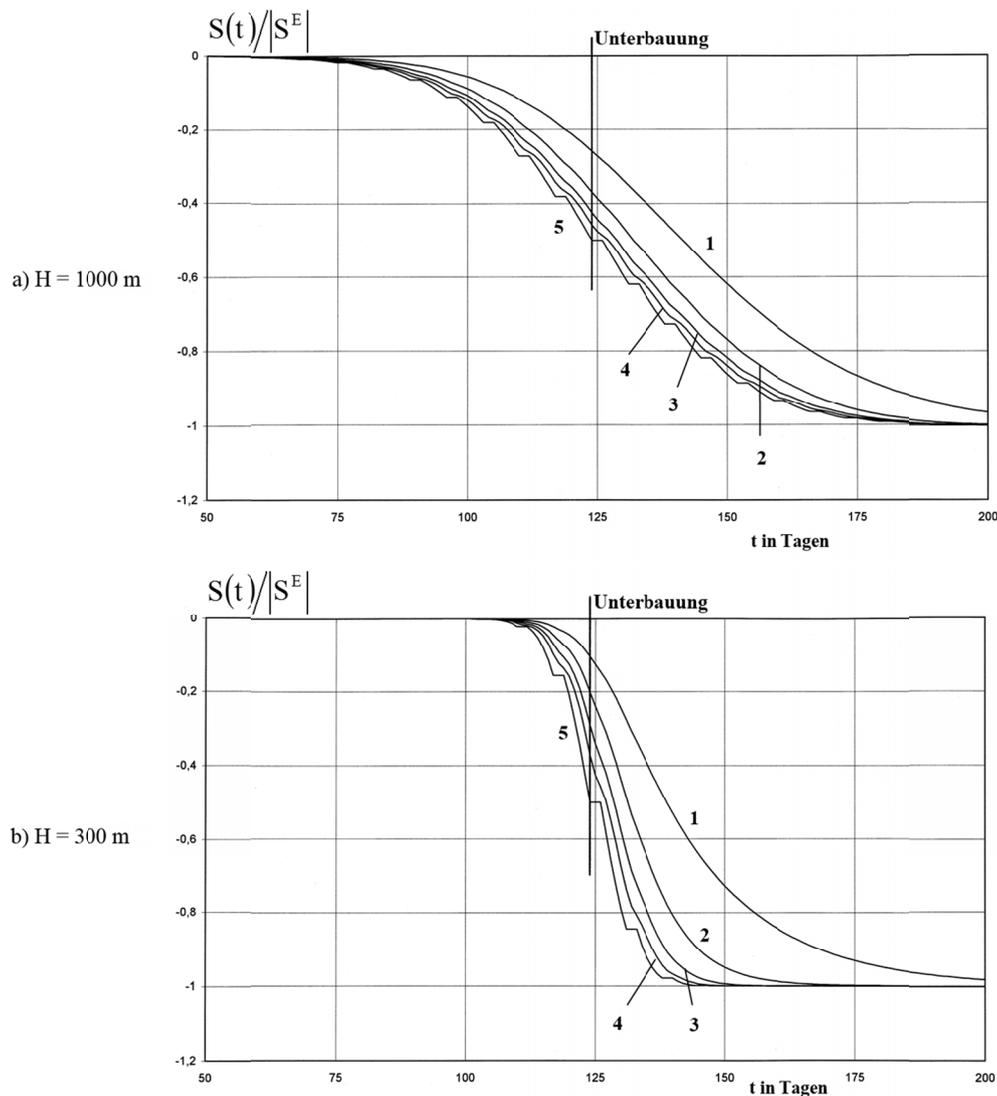


Abb. 13. Zeit-Senkungs-Kurven des Tagespunktes P;
 Kurve 1: $c = 20 \text{ Jahr}^{-1}$, Kurve 2: $c = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, Kurve 3: $c = 100 \text{ Jahr}^{-1}$,
 Kurve 4: $c = 200 \text{ Jahr}^{-1}$, Kurve 5: $c = \infty \text{ Jahr}^{-1}$ (Zeitfunktion von Knothe)

Die Kurve 1 der auf die Abbaurichtung bezogenen zeitlichen Zerrungs-/Pressungsbeschleunigung (Abb. 12, $\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) weist die größte, durch die Abbaustillstände bewirkte Oszillation zum Zeitpunkt der Unterbauung des betrachteten Tagespunktes auf. Im Falle der Kurve 2 ($\xi_2 = 50 \text{ Jahr}^{-1}$, $f_2 = 30 \text{ Jahr}^{-1}$), die den Einfluss der Wochenend-Abbaustillstände ebenfalls deutlich erkennen lässt, wurde aufgrund der wesentlich kleineren zeitlichen Beschleunigungsbeträge der Faktor 30 eingeführt (vgl. Abb. 6 und 9).

Für unterschiedliche Werte des Koeffizienten c der Zeitfunktion von Knothe ergaben sich die in der Abbildung 13 dargestellten Zeit-Senkungs-Kurven des Tagespunktes P unter Berücksichtigung zweitägiger Wochenend-Abbaustillstände. Bei einer Abbauteufe von 1000 m (Abb. 13a) zeichnet sich der Einfluss der Abbaustillstände in den Kurven 3 bis 5 ($c = 100, 200, \infty \text{ Jahr}^{-1}$) deutlich ab. Die für eine Abbauteufe von 300 m (Abb. 13b) durchgeführten Berechnungen ergaben, dass im Zeitintervall $t = 110 \dots 125$ Tage auch die Zeit-Senkungs-Kurve 2 ($c = 50 \text{ Jahr}^{-1}$) den Einfluss der Abbaustillstände erkennen lässt.

4. Zeitliche Senkung bei ungleichmäßigen Abbaufortschritten und unregelmäßigen Abbaustillständen

Weitere Simulationsberechnungen veranschaulichen den Einfluss ungleichmäßiger Abbaugeschwindigkeit und unregelmäßiger Abbaustillstände (Abb. 14 a). Für den Tagespunkt P wurden Zeit-Senkungs-Kurven (Abb. 14 b) sowie Zeitkurven der Senkungsgeschwindigkeit (Abb. 15) und der Senkungsbeschleu-

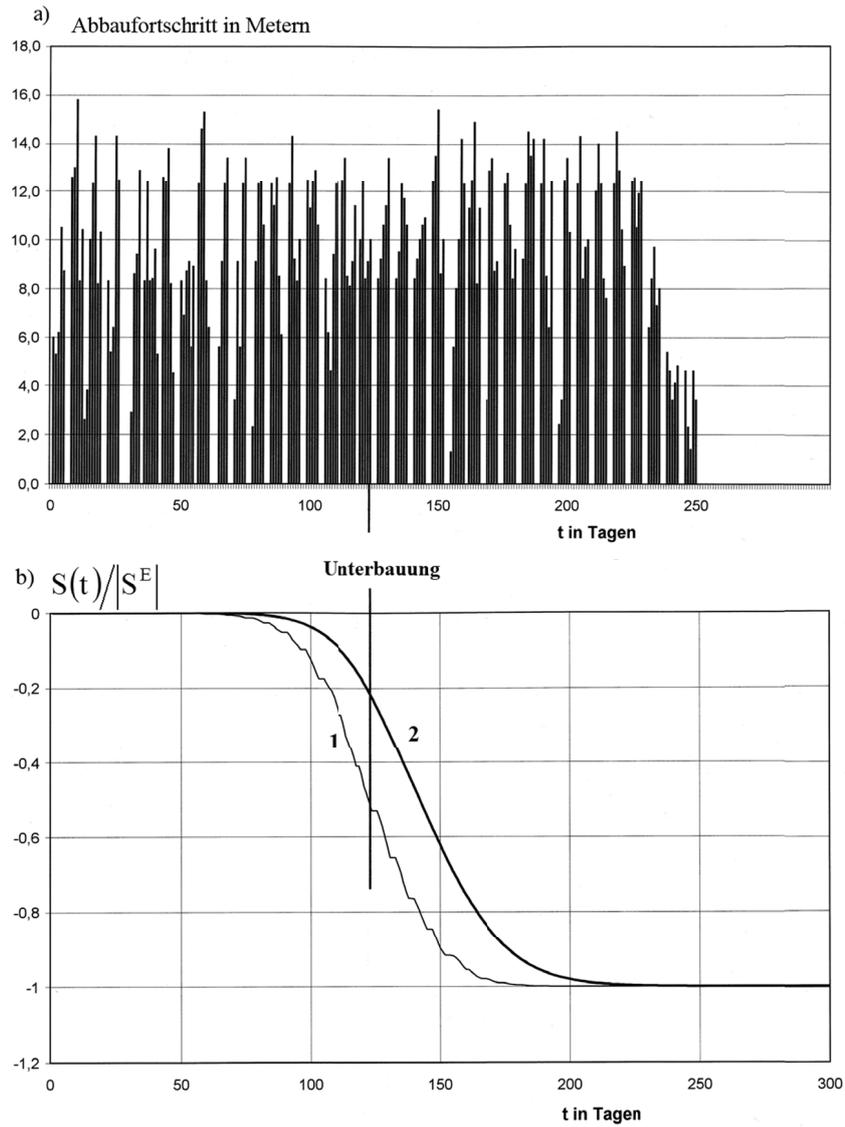


Abb. 14. a) Täglicher Abbaufortschritt und b) Zeit-Senkungs-Kurven des Tagespunktes P bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

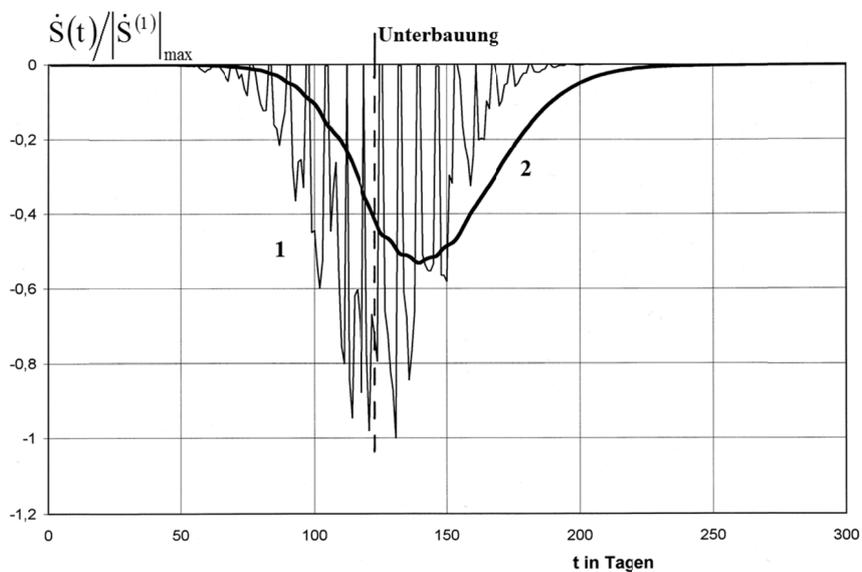


Abb. 15. Zeitliche Senkungsgeschwindigkeit des Tagespunktes P bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

nigung (Abb. 16) ermittelt. Bei nicht verzögertem Bewegungsablauf lässt die Zeit-Senkungs-Kurve 1 ($\xi_1 \cong f_1 = \infty \text{ Jahr}^{-1}$) den ungleichmäßigen Abbaufortschritt deutlich erkennen (vgl. Abb. 4). Der Verlauf der Zeitkurven der Senkungsgeschwindigkeit und der Senkungsbeschleunigung ist ebenfalls durch den ungleichmäßigen Abbaufortschritt gekennzeichnet (vgl. Abb. 5 und 6).

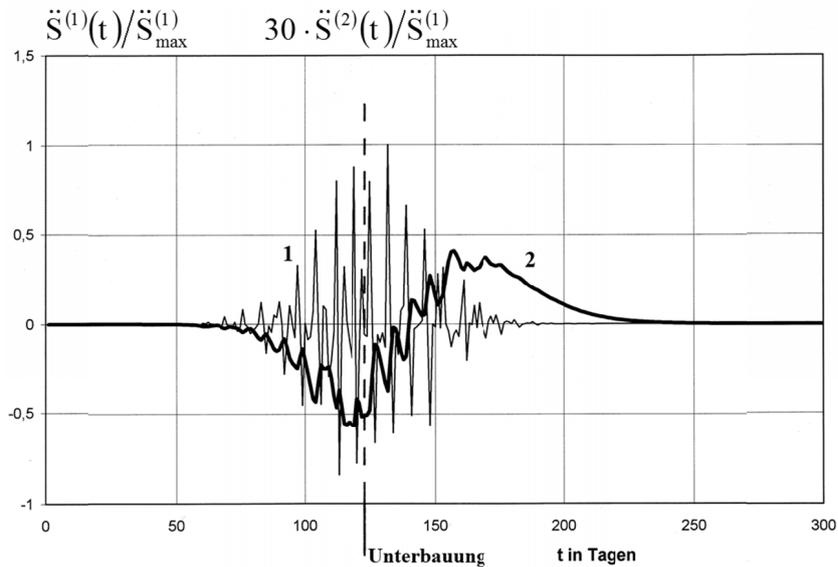


Abb. 16. Zeitliche Senkungsbeschleunigung des Tagespunktes P bei nicht verzögertem (Kurve 1) sowie bei verzögertem Bewegungsablauf (Kurve 2)

5. Fallstudie

Im Ruhrbergbau wurde die in der Abbildung 17 schraffiert dargestellte Bauhöhe 2 abgebaut und durch Bodenbewegungsmessungen begleitet (Fischer et al., 1997). Die Abbaumächtigkeit von zunächst 1.4 m

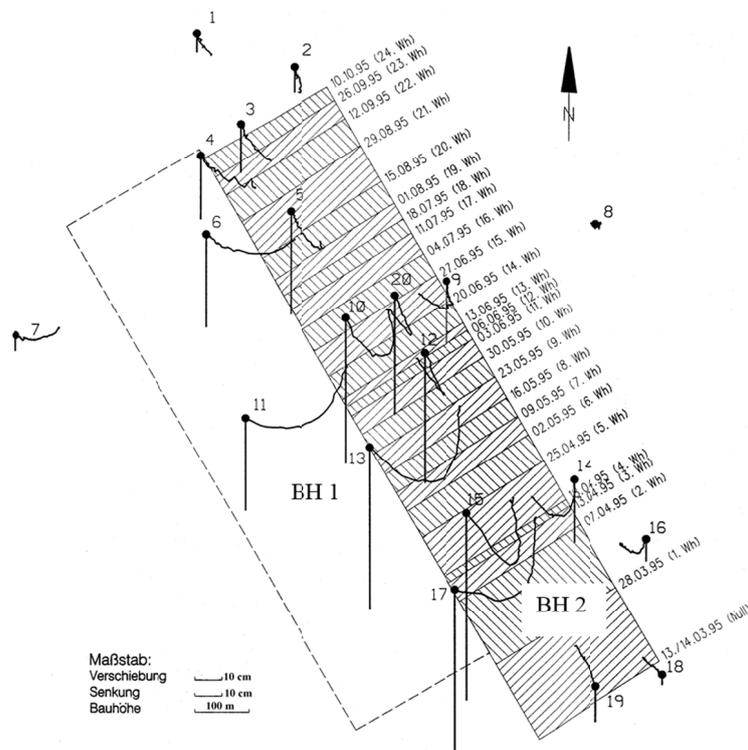


Abb. 17. Senkungen und Horizontalverschiebungen über Abbau in einem Bergwerk der Deutschen Steinkohle AG (Korittke et al., 1996); den Messzeitpunkten zuzuordnende Abbaustände der Bauhöhe 2

stieg im letzten Drittel des Abbaus wegen erhöhten Nachfalls aus dem Hangenden um 35 cm an, um zum Abbauende hin wieder auf 1.5 m abzunehmen. Die Breite des Abbaus betrug 265 m, die Baulänge 1250 m bei einer Teufe zwischen 780 m am Anlaufstoß und 910 m bei Abbauende. Zuvor wurde in demselben Flöz die umrissene gekennzeichnete Bauhöhe 1 abgebaut.

Die dynamischen Punktbewegungen der in der Abbildung 17 gekennzeichneten Objektpunkte 1 bis 20 wurden mit Hilfe von GPS-Messungen erfasst. Nach der Nullmessung zum Zeitpunkt des Abbaubeginns der Bauhöhe 2 erfolgten mit fortschreitendem Abbau 24 Wiederholungsmessungen sowie 3 weitere Messungen nach Beendigung des Abbaus. Fünf Referenzpunkte befanden sich außerhalb des Abbaubereiches.

Die an den 20 Objektpunkten beobachteten Horizontalverschiebungen zeigen eine auf die Mittellinie der Bauhöhe 2 gerichtete Bewegung. Demgegenüber ist jedoch eine deutliche Nachsenkung über der Bauhöhe 1 erkennbar. Dies führte zu der Überlegung, auch die Bauhöhe 1 mit einem geringen Absenkungsfaktor a_1 in die Nachberechnungen des zeitlichen Senkungsverhaltens der Objektpunkte 5, 12, 15 einzubeziehen sowie eine 30 m breite Abbaurandzone ($a_0 = 0$) zu berücksichtigen. Die Zuordnung der unterschiedlichen Absenkungsfaktoren kann der Abbildung 18 entnommen werden. Die oben genannten Schwankungen der Abbaumächtigkeit sowie der Abbauteufe wurden bei den Berechnungen berücksichtigt.

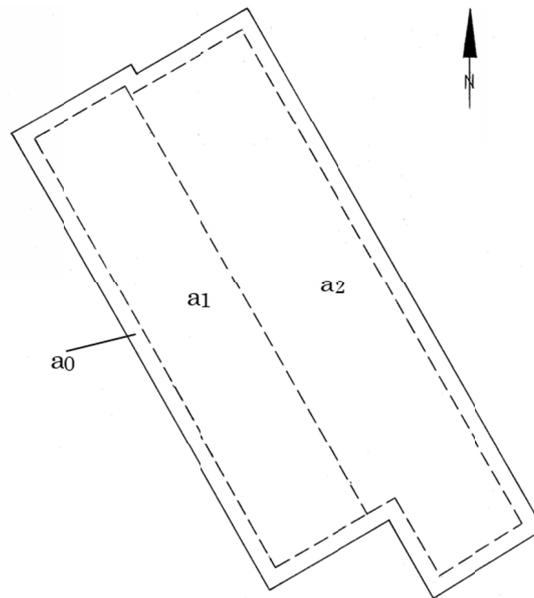


Abb. 18. Zuordnung der Absenkungsfaktoren bei Berücksichtigung einer Abbaurandzone

Im Zuge der Nachberechnung war es erforderlich, objektpunktbezogene Grenzwinkel und Absenkungsfaktoren zu bestimmen. Die nachberechneten Zeit-Senkungs-Kurven wurden unter Anwendung der Zeitfunktion von Knothe an die Messwerte angepasst (s. Abb. 19 bis 21). Bezüglich der ausgewählten Objektpunkte wurde der Zeitkoeffizient $c = 30 \text{ Jahr}^{-1}$ ermittelt. Es konnte also eine gleichmäßige Senkungsverzögerung in dem untersuchten Bereich nachgewiesen werden.

6. Zusammenfassung

Durch Simulationsberechnungen bezüglich eines Strebabbaus wurde in diesem Beitrag der verzögerte sowie der nicht verzögerte Bewegungsverlauf eines Tagespunktes analysiert. Hierbei wurde die Zwei-Parameter-Zeitfunktion von Sroka und Schober eingesetzt. Um bei der Berechnung der auf den betrachteten Tagespunkt bezogenen Zeitkurven der Bodenbewegungselemente den Einfluss der Abbaugeschwindigkeit und der Abbaustillstände aufzeigen zu können, erfolgte die Begrenzung der Abbauelemente anhand des täglichen Abbaufortschrittes.

Die für einen nicht verzögerten Bewegungsablauf sowie eine während der Arbeitswoche konstante Abbaugeschwindigkeit durchgeführten Berechnungen zeigen den Einfluss regelmäßiger zweitägiger Wochenend-Abbaustillstände bereits anhand der treppenartig verlaufenden Kurven der betrachteten zeitlichen Bodenbewegungselemente, deren Beschleunigungskurven zwischen positiven und negativen Werten oszillie-

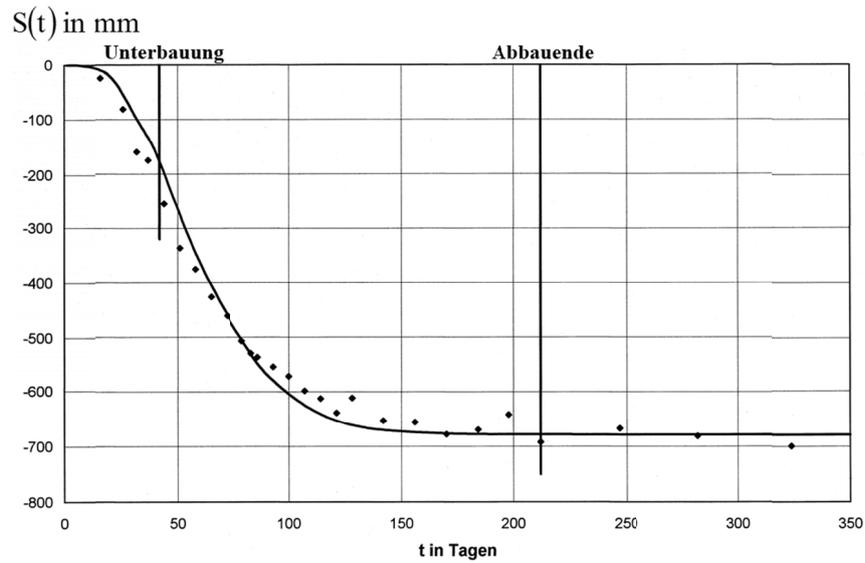


Abb. 19. Gemessene und nachberechnete zeitliche Senkung des Punktes 15; $\gamma = 60$ gon, $a_1 = 0.30$, $a_2 = 0.90$, $c = 30$ Jahr⁻¹

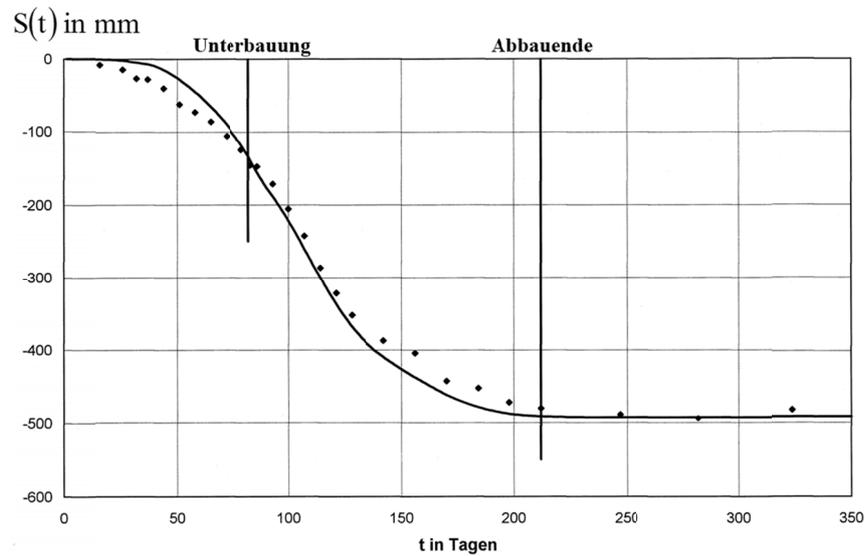


Abb. 20. Gemessene und nachberechnete zeitliche Senkung des Punktes 12; $\gamma = 60$ gon, $a_1 = 0.20$, $a_2 = 0.70$, $c = 30$ Jahr⁻¹

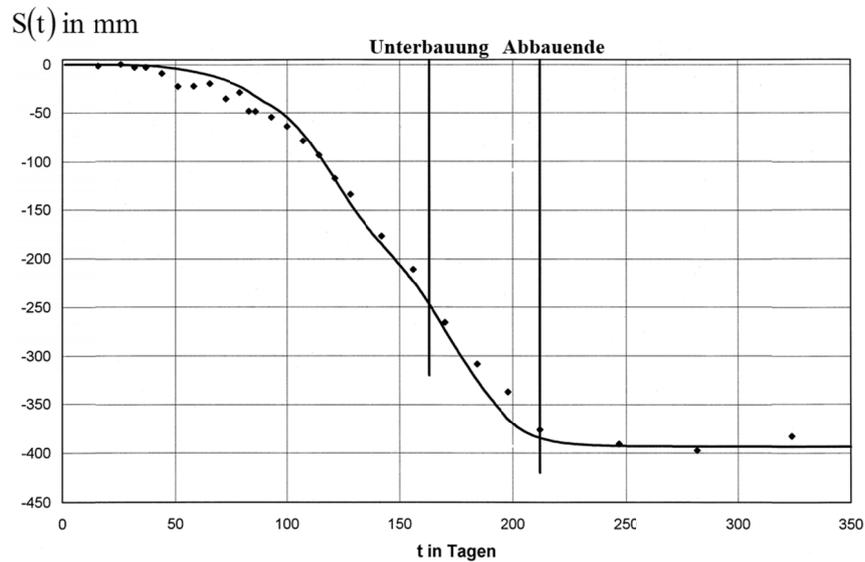


Abb. 21. Gemessene und nachberechnete zeitliche Senkung des Punktes 5; $\gamma = 50$ gon, $a_1 = 0.30$, $a_2 = 0.94$, $c = 30$ Jahr⁻¹

ren. Die abbaudynamische Wirkung der Wochenend-Abbaustillstände ist bei langsamerem Bewegungsablauf weniger deutlich. Auch der Einfluss ungleichmäßiger Abbaufortschritte und unregelmäßiger Abbaustillstände ist bei nicht verzögertem Bewegungsablauf sehr deutlich in der Zeit-Senkungs-Kurve erkennbar.

Unter Einsatz der Zeitfunktion von Knothe durchgeführte Simulationsberechnungen lassen bei einer Abbauteufe von 1000 m den Einfluss zweitägiger Wochenend-Abbaustillstände erst ab dem Zeitkoeffizienten $c = 100 \text{ Jahr}^{-1}$ deutlich in der Zeit-Senkungs-Kurve des betrachteten Tagespunktes erkennen.

Im Rahmen einer Fallstudie wurden einige bergmännisch unterbaute Tagespunkte hinsichtlich ihrer zeitlichen Senkung untersucht.

Quellennachweis

- Dzegniuk B., Fenk J., Pielok J., 1987: *Analyse und Prognose von Boden- und Gebirgsbewegungen im Flözbergbau*. Freiburger Forschungshefte A 729, Bergbau und Geotechnik, Markscheidewesen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Fischer P., Sroka A., Ballhaus N., Korittke N., 1997: *Dreidimensionale Messung von abbaubedingten Bodenbewegungen mit GPS*. VDF Führungskraft, Nr. 11/12.
- Kateloe H.-J., 2002: *Lineare Modellierung der durch Abbaugeschwindigkeit und Abbaustillstände charakterisierten zeitlichen Senkungsmulde in einem stochastischen Medium*. Dissertation RWTH Aachen, 2002. Aachen: Verlag Mainz.
- Kateloe H.-J., Peslak J., Preuß A., 2002: *Bergbauinduzierte Bodenbewegungen. Abschlussbericht zu dem im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG bearbeiteten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben*. RWTH Aachen, Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau, unveröffentlicht.
- Knothe S., 1953: *Die Gleichung der endgültig ausgebildeten Senkungsmulde* (polnisch). Archiwum Górniczo i Hutniczo, Vol. 1, Nr. 1.
- Knothe S., 1957: *Observations of surface movements under influence of mining and their theoretical interpretation*. Proceedings of the European Congress on Ground Movements, Leeds.
- Knothe S., 1984: *Prognose abbaubedingter Gebirgs- und Bodenbewegungen* (polnisch). Wydawnictwo Śląsk, Katowice, ISBN 83-216-0450-1.
- Korittke N., Kalz U., Palte G., 1996: *Dreidimensionale Erfassung von abbaubedingten Bodenbewegungen mit satellitengestützten Messmethoden (GPS)*. DMT, Essen, unveröffentlicht.
- Kwinta A., Hejmanowski R., Sroka A., 1996: *A time function analysis used for the prediction of rock mass subsidence*. In: Mining Science and Technology. Hrsg.: Guo & Golinski. Balkema, Rotterdam.
- Litwiniszyn J., 1956: *Gebirgsbewegungen über einem Abbau als stochastischer Prozess aufgefasst*. Freiburger Forschungshefte C 22.
- Litwiniszyn J., 1957: *The theories and model research of movements of ground masses*. Proceedings of the European Congress on Ground Movements, Leeds.
- Litwiniszyn J., 1957: *Über einige Ergebnisse aus der Gebirgsmechanik*. In: Freiburger Forschungshefte A 57, Markscheidewesen. Berlin: Akademie-Verlag.
- Schober F., 1982: *Die Berechnung von Bodenbewegungen über kavernenartigen Hohlräumen unter Beachtung der globalen Volumenkonvergenz*. Dissertation TU Clausthal.
- Schober F., Sroka A., 1983: *Die Berechnung von Bodenbewegungen über Kavernen unter Berücksichtigung des zeitlichen Konvergenz- und Gebirgsverhaltens*. In: Kali und Steinsalz Bd. 8, H. 10.
- Sroka A., Schober F., 1986: *Beitrag zur Vorausberechnung von Bodenbewegungselementen für rechteckige Abbaufelder, Teil I*. In: Das Markscheidewesen 93, Nr. 4.
- Sroka A., Schober F., Sroka T., 1987: *General relations between chosen volume of extracted cavity and a volume of subsidence surface, using a time function* (polnisch). In: Ochrona Terenów Górniczych, Katowice, Nr. 1.
- Sroka A., 1999: *Dynamika eksploatacji górnictwa z punktu widzenia szkód górniczych*. Habilitationsschrift. Erschienen in der Schriftenreihe: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Polska Akademia Nauk, Kraków, H. 58.