

Entwicklung eines geodätischen Monitoring-Systems und eines Fuzzy-Entscheidungsmodells für den Standort Rabenov

Pavel Hánek

Der Beitrag beschreibt die Entwicklung eines geodätischen Hangrutschungs-Monitoring-Systems für ein rekultiviertes Braunkohlentagebauwerk, das sich nicht weit von der Stadt Ústí nad Labem in der Tschechischen Republik befindet. Es werden Verfahren zur Bearbeitung und Bewertung der Messungen sowie das mathematische Modell, das auf der Fuzzy-Logik beruht, beschrieben. Weitergehende Informationen können der Dissertation des Autors Hánek (2009a) entnommen werden.

Schlüsselbegriffe: Fuzzy-Logik, Monitoring

This article shows the development of a geodetical hillside-slide-monitoring-system for a revegetated area of brown coal open-cast mining nearby the town of Ústí nad Labem in the Czech Republic. Methods of processing and interpreting of measurements are described, also the mathematical model based on Fuzzy-Logic. Further information can be taken from the author's dissertation (2009 a).

Keywords: Fuzzy-Logic, monitoring

1 Einleitung

Dieser Beitrag schließt an den Artikel von *Bubeník u. a. (2006)* an, der in dieser Zeitschrift bereits veröffentlicht wurde. In diesem Beitrag wurden Methoden zur Überwachung von Hangrutschungen beschrieben und die Anlage des Grundlagnetzes einschließlich der Vermarkung der Fest- und Objektpunkte dargestellt. Weiterhin wurden die ersten vier Messepochen hinsichtlich der eingesetzten Auswertemethoden und erzielten Ergebnisse diskutiert und bewertet. Aus diesem Grund wird hier das Messgebiet nur kurz dargestellt.

Der Standort Rabenov liegt nahe der nordböhmisches Bezirksstadt Ústí nad Labem und ist ein Teil des ehemaligen Tagebaues Chabařovice. An diesem Standort wird erstmalig die Rekultivierung eines großen Tagebaues in Tschechien durchgeführt. Deshalb wird der Standort auch als

Testgebiet für notwendige Informationen über Rekultivierungen und deren Abläufe genutzt. Bei dieser Rekultivierung kommt es nach Abschluss des Bergbaus und den folgenden Sanierungs- und Rekultivierungsarbeiten zur Flutung des Tagebaurestloches. Wenn die Flutung beendet ist, entsteht das Reservoir Milada mit einer Ausdehnung von 247,6 ha und einem Wasservolumen von 34,4 Mio. m³ (Abb. 1, *Quelle: www.mapy.cz*).

2 Charakteristik des Netzes

Im Raum der Rutschung des rekultivierten vulkanischen Hügels Rovný wurde 2003 das räumliche Festpunktnetz Rabenov mit vier Punkten (Abb. 2) angelegt. Die geodätischen Arbeiten wurden vom Lehrstuhl für Spezielle Geodäsie der Bauakultät der TU Prag durchgeführt. Das Netz

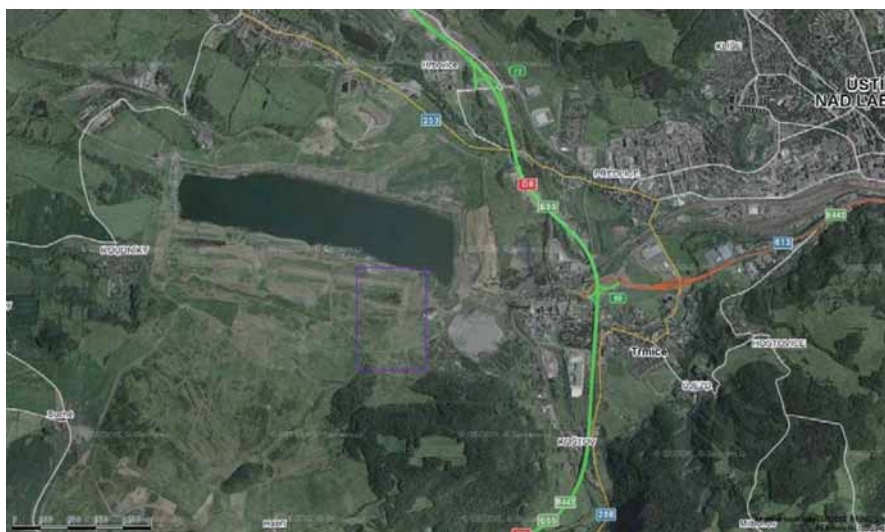


Abb. 1: Luftaufnahme des Untersuchungsgebietes

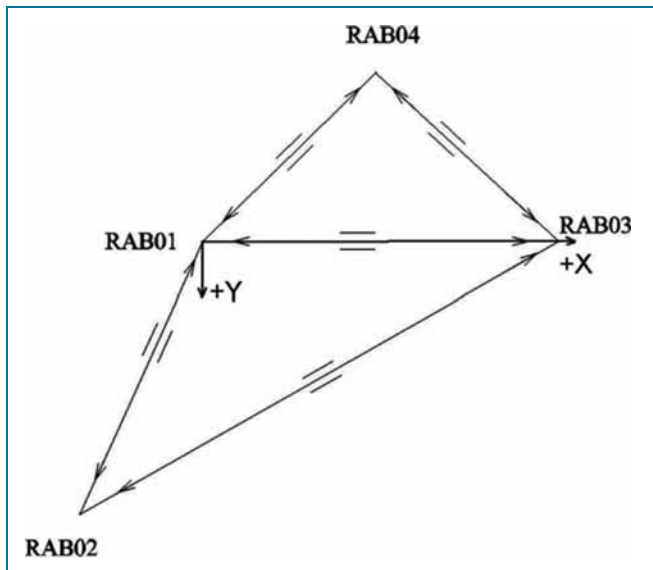


Abb. 2: Konfiguration des Netzes

hat eine Trapez-Form, in der aufgrund der Topographie außer den Außenseiten nur die Diagonale RAB01 – RAB03 mit einer Länge von 419 m gemessen wird. Diese Diagonale verläuft ungefähr horizontal.

Demgegenüber liegen die Punkte RAB02 und RAB04 ungefähr 65,5 m höher und haben einen gegenseitigen Abstand von 693 m. Die Punkte RAB01, RAB02 und RAB03 wurden als Rohrfestpunkte bis zu einer Tiefe von 21 m angelegt. Die räumlichen Verformungen der Rohre können mit Hilfe geotechnischer Verfahren, z. B. Inklinometersonden, bestimmt werden. Die geotechnischen Messungen wurden vom Lehrstuhl für Geotechnik der Bauakademie der TU Prag durchgeführt, der auch weitere 34 Objektpunkte erkundet und vermarktet hat. Der heute nicht mehr existierende Rohrfestpunkt RAB04 wurde für diese Arbeiten nur als Oberflächenpunkt im Betonsäulenfuß eines Mastes neu vermarktet.

Im Folgenden wird darauf eingegangen, inwiefern sich die Mess- und Auswerteverfahren seit den ersten Messungen (seit 2006) verändert haben, und es werden die inzwischen eingetretenen Geländeänderungen und deren Auswirkungen angesprochen.

3 Änderungen in der Konfiguration des Festpunktnetzes und in den Messpunkten

Im Jahre 2007 kam es aufgrund der Ergebnisse der geotechnischen und geodätischen Messungen zu einer bedeutenden Projektänderung der Rekultivierung. Es mussten an den Stellen, die durch Rutschungen und durch Senkungen, hervorgerufen durch inhomogene Aufschüttungen, bedroht waren, Pfahlankerauflagerwände eingebaut werden. Außerdem waren auch Bereiche betroffen, die aufgrund der durch Bodendruck verursachten Senkungen bzw. durch maschinelle Abtragung des Geländes zur Stabilisierung des Abhangs um 1 m bis 5 m reduziert worden sind. Der Boden des Geländes am Südufer des Wasserbeckens wird zusätzlich belastet. Infolge der Geländeänderungen

kam es zur Zerstörung von fast allen Objektpunkten und des Standpunktes RAB04. Mit Rücksicht darauf, dass die Umgebung des Standpunktes von RAB04 nach den durchgeführten Sanierungsarbeiten für stabil gehalten wird, handelt es sich um kein kritisches Problem.

Der einzige bedeutende Schaden ist die Beschädigung von Ausmaß und Form des ursprünglichen Netzes. Im Falle der Zerstörung der meisten Detailpunkte handelt es sich um ein größeres Problem, weil damit die Kontinuität der Beobachtung der Hangrutschungen beeinträchtigt wird. Da dies nicht vermieden werden konnte, wird es notwendig sein, neue Detailpunkte aufzubauen. Im Zusammenhang mit der durchgeführten Sanierungsmaßnahme wurde das Untersuchungsgebiet für das Monitoring des Abhangs in Richtung des Sees erweitert. Es wurden drei neue Beobachtungsrohre (Rohrfestpunkte) für geotechnische Messungen errichtet, von denen eines als neuer Standpunkt dienen sollte. Dadurch bekommt das Überwachungsnetz eine neue Form; es entsteht ein neues Festpunktnetz, ergänzt durch eine Anzahl neuer Objektpunkte. Seit 2007 werden infolge der oben beschriebenen Veränderungen terrestrische Messungen mit der Totalstation der Firma Leica Geosystems nur im „erhaltenen“ Teil des Messnetzes und dann erstmalig auf dem erweiterten Messgebiet in der Nähe des Sees durchgeführt. Im Netz mit den Punkten RAB01, RAB02 und RAB03 werden weitere Messungen vorgenommen, um die Verwendung von Universal- oder Zielpunkten bei der Distanzmessung zu testen. Im neuen Untersuchungsgebiet konnten wegen der noch nicht beendeten Geländearbeiten weder die neuen Objektpunkte vermarktet noch der neue Standpunkt örtlich festgelegt werden. Daher werden zurzeit Messungen zur Bestimmung des 3D-Geländemodells und von Längsprofilen durchgeführt, um aus den zeitlichen Veränderungen der Geländeoberfläche den Erfolg der Geländeregulierungsmaßnahmen beurteilen zu können.

Außerdem werden im Netz weiterhin Beobachtungen mit GNSS-Geräten (GNSS = Globales Navigationssatellitensystem, hier konkret GPS) der Firma Trimble ausgeführt, um das bisher lokale Koordinatensystem in die Staatsreferenzsysteme, die als S-JTSK bzw. Bpv bezeichnet werden, transformieren zu können.

Bis September 2009 wurden insgesamt 14 Epochen terrestrisch und 12 Epochen mit GNSS/GPS gemessen. Für den Punkt RAB02 wurde eine durchschnittliche Standardabweichung in der Lage von 2,4 mm und in der Höhe von 2,8 mm erreicht. Verschiebungen desselben Punktes, die auf die Nullmessung bezogen sind, erreichen in Richtung der Y-Achse Beträge bis zu +42 mm, in Richtung der X-Achse bewegen sie sich abhängig von den Jahreszeiten und vom Grundwasserspiegel zwischen –58 mm bis +37 mm, in Richtung der Z-Achse von –28 mm bis zu +38 mm. Die GPS-Messung wird durch die durchschnittliche Standardabweichung aller gemessenen Punkte in der Lage von 3,1 mm und in der Höhe von 4,8 mm charakterisiert. Die jahreszeitlichen Änderungen der heute nicht mehr existierenden Objektpunkte erreichten Werte von +184 mm bis –104 mm in den Koordinaten Y und X sowie Werte von +45 mm bis –180 mm in der Koordinate Z.

4 Bearbeitung von Messungen

4.1 Ausgleichung des Netzes

Das Netz wird als ein freies räumliches Netz ausgeglichen mit einem Festpunkt RAB01 und einer Richtung, die durch die Verbindungsgerade der Punkte RAB01 und RAB03 gegeben ist. Im Punkt RAB01 ist der Nullpunkt des lokalen orthogonalen rechtsdrehenden Koordinatensystems gelegt. Die Verbindungsgerade der Punkte RAB01 und RAB03 stellt die +X-Achse dar. Aufgrund dessen, dass sie fast in der Horizontalen liegt, verläuft die +Y-Koordinatenachse praktisch in der Falllinie des Geländes. Die Lagerung des Netzes soll auch durch die Ergänzung des Netzes um einen weiteren Standpunkt nicht verändert werden.

4.2 Transformation in die staatlichen Referenzsysteme

Die Transformation in die Referenzsysteme wird für die Höhe- und Lagekoordinaten des Punktes getrennt durchgeführt. Ausführlichere Informationen zur Transformation sind in *Bubeník (2007)* dargestellt. Für die Höhen transformation in das Staatssystem, bezeichnet als *Bpv*, wird der durchschnittliche Verschiebebetrag der Koordinatensysteme, abgeleitet aus identischen Punkten, verwendet. Die Objektpunkte des Netzes werden angepasst nach:

$$Z_b = \Delta_Z + Z_b^p$$

wobei Z_b die Höhe des Detailpunktes im Zielkoordinatensystem (Höhensystem),

Z_b^p die Höhe des Detailpunktes im ursprünglichen Koordinatensystem,

Δ_Z die durchschnittliche Höhenverschiebung sind.

Die durchschnittliche Höhenverschiebung wird berechnet:

$$\Delta_Z = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{Z_i}}{n}$$

wobei δ_{Z_i} der Höhenunterschied des i-fachen identischen Punktes,

n die Anzahl der identischen Punkte sind.

Der Höhenunterschied des i-fachen identischen Punktes wird berechnet:

$$\delta_{Z_i} = Z_i - Z_i^p$$

wobei Z_i die Höhe des identischen Punktes im Zielkoordinatensystem,

Z_i^p die Höhe des identischen Punktes im ursprünglichen Koordinatensystem sind.

4.2.1 Lage-Transformation

Die Lage-Transformation in das nationale System mit der Bezeichnung *S-JTSK* erfolgt in zwei Schritten. Aufgrund der umfassenden Untersuchungen ist es im vorliegenden Fall vorteilhaft, den ersten Transformationsschritt mit der Helmert-Kongruenztransformation *Soukup (2005)* durchzuführen; sie entspricht der klassischen Helmert-Ähnlichkeitstransformation mit der Ausgleichung der Koeffizienten nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Die Helmert-Transformation wird in der Geodäsie häufig zur verzerrungsfreien Umrechnung von einem in ein anderes dreidimensionales System genutzt. Der ursprüngliche (Netz-) Maßstab bleibt jedoch erhalten. Damit wird auch die innere Genauigkeit des lokalen Netzes bei dessen Transformation ins Referenzsystem erhalten. Nach der Helmert-Transformation wird als zweiter Schritt die Jung-Transformation *Hánek et al. (2008)* verwendet. Hierbei wird aus den Restabweichungen an den identischen Punkten eine zusätzliche Korrektur abgeleitet, so dass an den identischen Punkten die Restabweichungen null werden; d. h., die Koordinaten der identischen Punkte bleiben im ursprünglichen Referenzsystem erhalten.

4.3 Berechnung der Koordinaten und der Neigung der Punktvermarkungen

Die räumliche Neigung einer jeden Punktvermarkung kann bei Verwendung eines speziellen Signalstabes mit zwei Universalprismen *Bubeník et al. (2006)* aus den Messungen mit einer Totalstation bestimmt werden.

Aus den räumlichen Neigungsänderungen kann auf die Richtung des Erddrucks in der oberen Schicht der Erdoberfläche eines jeden Objektpunktes geschlossen werden. Die Neigungsänderung eines Vermarkungspunktes wird immer zwischen zwei Etappen berechnet. Zur Berechnung der Koordinaten des zu bestimmenden Punktes und der Neigung des Vermarkungszeichens werden Gleichungen der analytischen Geometrie im Raum angewendet. Die Raumkoordinaten des oberen und unteren Prismas einer Signalvorrichtung werden mit der 3D-Polarmethode berechnet. Danach kann man aus den berechneten Prismenkoordinaten und den bekannten Abmessungen der Signalvorrichtung die Koordinaten der zu bestimmenden Objektpunkte berechnen, die durch die Vegetation oder durch Geländeunebenheiten „verborgen“ sind. Zu deren Berechnung wird eine entsprechend angepasste Formel, bekannt in der analytischen Geometrie als Berechnung eines Punktes an der Linie, geteilt im Verhältnis r/s , verwendet:

$$X_b = \left(\frac{r}{s} + 1\right) X_{h_D} - \frac{r}{s} X_{h_H}; \quad Y_b = \left(\frac{r}{s} + 1\right) Y_{h_D} - \frac{r}{s} Y_{h_H};$$

$$Z_b = \left(\frac{r}{s} + 1\right) Z_{h_D} - \frac{r}{s} Z_{h_H}$$

wobei X_b, Y_b, Z_b die gesuchten Koordinaten eines Objektpunktes,

$X_{h_D}, Y_{h_D}, Z_{h_D}, X_{h_H}, Y_{h_H}, Z_{h_H}$ die Koordinaten der beiden Prismen,

r, s konstante Entfernungen und zwar vom Fuß der Vorrichtung bis zur Mitte des unteren Prismas bzw. zwischen den Mittelpunkten der beiden Prismen sind.

Die analytische Geometrie im Raum ermöglicht auch die Bestimmung der Neigungsänderung des Vermarkungselementes zwischen den Epochen, womit die Monitoringinformation durch einen weiteren interessanten Parameter ergänzt wird, der über die Prozesse im oberen Teil der Böden informiert.

5 Fuzzy-Entscheidungssystem

Die in der Praxis übliche Unterscheidung der Qualität der Punkte im Sinne der Booleschen Logik (ja – nein) ist für die Bildung von voraussagenden Handlungsmodellen nicht geeignet. Solche „Schwarz-Weiß-Punktsortierung“ nach stabilen und nicht-stabilen Punkten ist manchmal bei der Interpretation der Ergebnisse zwischen den Fachleuten aus verschiedenen Fachgebieten auch irreführend. Bei Verwendung eines geeigneten mathematischen Modells können bewertete Punkte und deren Verschiebungen in eine größerer Anzahl von Kategorien aufgeteilt werden und so weitaus besser nachvollzogen werden als im Falle der Booleschen Logik. Dadurch können spezifische Anforderungen der Nutzer der Ergebnisse geodätischer Messungen entsprechend berücksichtigt werden und es kann zur Bildung von besseren voraussagenden Handlungsmodellen führen, unter Einbeziehung relevanter Informationen aus verschiedenen Bereichen. Nicht zuletzt scheint das Einführen moderner Entscheidungsmethoden in der Geodäsie geeignet zu sein, um die künstliche Intelligenz in Produktions- und Leitungsprozessen einzusetzen. Im vorliegenden Artikel wird versucht, die Anwendungsmöglichkeiten eines mathematischen Modells mit Verwendung der Fuzzy-Mengen bzw. Fuzzy-Logik für das geodätische Monitoring einer Hangrutschung aufzuzeigen *HáneK (2009a), HáneK (2009b)*. Das mathematische Modell wird zur Bestimmung der Verschiebungen diskreter Punkte genutzt.

5.1 Fuzzy-System

Die Operationen eines Fuzzy-Systems sind in drei Schritte einzuteilen:

1. Fuzzyfikation,
2. Inferenz und
3. Defuzzyfikation.

Fuzzyfikation stellt einen Prozess zur Bestimmung eines Zugehörigkeitsgrades von Eingangswerten in die Fuzzy-Mengen mittels Fuzzy-Funktionen dar. Im Rahmen der Inferenz werden entscheidende Regeln auf Eingang-Fuzzy-Mengen angewendet. Auf diese Weise gewinnt man eine Ausgangsmenge bzw. Mengen. Bei der Defuzzyfikation ist es möglich, der Ausgang-Fuzzy-Menge einen bestimmten Wert bzw. einen exakt definierten Term zuzuordnen. Unter dem Begriff Term versteht man eine Menge linguistischer Werte, die einer linguistischen Variablen in einer Sprache *Novák (2000)* entsprechen.

5.1.1 Eingangsvoraussetzungen für die Entscheidung über die Punkttransformationen

Voraussetzungen, die die resultierende Aussage über die Qualität der Punkteinnahme beeinflussen, kann man in objektive und subjektive einteilen. Zu den objektiven Gesichtspunkten gehören die räumliche Standardabweichung des zu bestimmenden Punktes (durch eine andere Messmethode kann die Bestimmung der Punktgenauigkeit ersetzt werden) in einzelnen Messepochen, die Qualität der Vermarkungen der Punkte *S*, die Gewichtung der beobachteten Punkte *V*, die Qualität bzw. der persönliche

Fehler des Beobachters *M*.¹ Ein weiterer objektiver Gesichtspunkt sind klimatische Bedingungen während der Vermessungen *P*. Subjektive Gesichtspunkte werden dann durch Erfahrungswerte der die Vermessungsarbeiten Ausführenden spezifiziert, z.B. Bewertung der Umgebung des Punktes im Gelände *O* (gilt für jede Epoche) oder die Messerfahrung des Beobachters *C*.

5.1.2 Fuzzyfikation

Für alle festgelegten Umstände (Voraussetzungen) werden Fuzzys der Menge (Mengenfuzzys) definiert und die Funktionszugehörigkeit der einzelnen Beobachtungen in die zuständigen Mengen bestimmt.

Fuzzy-Menge für die räumliche Standardabweichung A
Definiert wird die Fuzzy-Menge *A* für die räumliche Standardabweichung δ_{R_b} , deren Universum $U_A \in R$ ist. Für sie legt man die Zugehörigkeitsfunktion fest, die die folgende Form hat:

$$\mu_A(\delta_{R_b}) = \max\left(\min\left(\frac{\delta_{R_b} - a_4}{a_3 - a_4}, 1\right), 0\right)$$

wobei $a_3 = \delta_{R_b \max - 5\%}$ und $a_4 = \delta_{R_b \max + 5\%}$.

Damit wird also der Zugehörigkeitsgrad δ_{R_b} in die Fuzzy-Menge *A* festgelegt.

Beispiel 1.: Nehmen wir Einmessungspunkte *A, B, C, D, E*, die durch räumlichen Standardabweichungen $\delta_{R_A} = 8,5 \text{ mm}$, $\delta_{R_B} = 10,0 \text{ mm}$, $\delta_{R_C} = 11,5 \text{ mm}$, $\delta_{R_D} = 9,5 \text{ mm}$, $\delta_{R_E} = 10,5 \text{ mm}$ charakterisiert werden. Die räumliche Grenzstandardabweichung ist $\delta_{R_{\max}} = 10,0 \text{ mm}$. Für jeden Punkt berechnen wir den Zugehörigkeitsgrad in die Menge *A*; berechnete Werte und Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion sind in Abb. 3 dargestellt.

Fuzzy-Menge für die Bestimmung der Qualität der Vermarkung des Punktes S

Für die Vermarkung erwäge man drei Zugehörigkeitsgrade, die gewöhnlich der verwendeten Bezeichnung entsprechen:

- schwere,
- dauerhafte und
- temporäre Vermarkung.

Somit gilt für die Fuzzy-Menge, wo $p_1, \dots, p_n \in U_s$ und $s_1, \dots, s_n \in <0;1>$.

Die Menge *S* wird definiert:

Element	schwere Vermarkung	dauerhafte Vermarkung	temporäre Vermarkung
μ_s	1	0,5	0

Fuzzy-Menge für die Bestimmung der Punktwichtung V
Ähnlich wie bei der Bestimmung der Qualität der Punktvermarkung wird die Menge *V* für die Bestimmung der Punktwichtung festgelegt. Es sind verschiedene Skalen mit unterschiedlicher Anzahl der Grade zu verwenden. Dafür geeignet ist die Verwendung einer Fünf- oder Dreigradskala. Die Fünfgradskala kann für den Punkt wie folgt aussehen:

¹ Anmerkung: Im Falle automatisierter Vermessungen kann man als Fehler das automatische Anzielen des Gerätes klassifizieren.

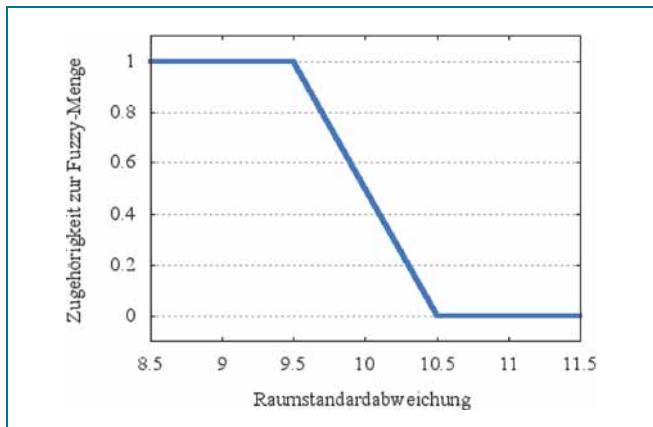


Abb. 3: Diagramm der Zugehörigkeitsfunktion der Menge A

- sehr bedeutsam,
- bedeutsam,
- üblich,
- unbedeutsam,
- sehr unbedeutsam.

Die Menge V wird also folgend definiert:

Element	sehr bedeutsam	bedeutsam	üblich	unbedeutsam	sehr unbedeutsam
μ_V	1	0,75	0,5	0,25	0

Für ein Beispiel wird die Menge auf die Dreigradmenge vereinfacht, und es werden folgende Terme verwendet:

- bedeutsam,
- üblich,
- unbedeutsam.

Die Menge V wird danach definiert:

Element	bedeutsam	üblich	unbedeutsam
μ_V	1	0,5	0

Fuzzy-Menge für Klimabedingungen P

Die Zugehörigkeitsfunktion für die Menge P, die den Einfluss der Klimabedingungen auf die Vermessung ausdrückt, ist folgend zu charakterisieren:

$$\mu_P(t) = \max\left(\min\left(\frac{t - a_1}{a_2 - a_1}, \frac{t - a_4}{a_3 - a_4}, 1\right), 0\right)$$

wobei $a_1 = m$, $a_4 = M$ Grenzwerte für die Verwendung der Geräteausrüstung,

$a_2 = d$, $a_3 = h$ untere und obere Grenzen des idealen Temperaturbereichs des Beobachters sind und t die Temperatur während der Vermessungen ist.

Bei dieser Menge ist der Temperatureinfluss auf die Funktionseigenschaften der Instrumente zu berücksichtigen, vor allem sind aber die klimatischen Bedingungen zu beachten, denen der Beobachter aufgrund von Temperaturschwankungen ausgesetzt ist.

Beispiel 2: Eine Totalstation wird im Temperaturbereich von -20°C bis $+50^\circ\text{C}$ eingesetzt und von zwei Vermessungsingenieuren benutzt. Der erste hält die Temperaturen im Intervall von $+15^\circ\text{C}$ bis $+25^\circ\text{C}$ (rot) für ideal und der zweite im Intervall von $+5^\circ\text{C}$ bis $+30^\circ\text{C}$ (grün). In Abb. 4 ist der Funktionsverlauf des Zugehörigkeitsgrades

von Temperaturen für jeden Beobachter in der Menge P dargestellt.

Fuzzy-Mengen der Qualitätsbewertung der Vermesser M
Das Festlegen der Fuzzy-Menge M ist durch zugängliche Informationen über die Beobachter beeinflusst. Im Falle, dass ihre persönlichen Fehler bekannt sind, kann man die Zugehörigkeitsfunktion mithilfe der Vorschrift festlegen

$$\mu_M(\sigma_m) = \max\left(\min\left(\frac{\sigma_m - a_4}{a_3 - a_4}, 1\right), 0\right)$$

wo wir $a_3 = \sigma_{pr.m.-5\%}$, $a_4 = \sigma_{pr.m.+5\%}$ als Durchschnittswert aller beteiligten Beobachter berechnen, vergrößert bzw. verkleinert um 5 % dieses Wertes.

Im Falle, dass der persönliche Wert der Beobachter nicht bekannt ist, kann man die Vermessungsingenieure den unterschiedlichen Qualitätskategorien zuordnen, je nach ihren Messerfahrungen und persönlichen Eigenschaften. Man kann sie dann in überdurchschnittliche und durchschnittliche Beobachter einteilen. Es wäre auch möglich, eine sanftere Skala zu wählen. In diesem Fall wird die Menge M definiert:

Element	Überdurchschnittlicher Beobachter	durchschnittlicher Beobachter
μ_M	1	0,5

Die die Punktumgebung O bewertende Fuzzy-Menge

Für die Fuzzy-Menge O, die den subjektiven Parameter der Bewertung der Punktumgebung repräsentiert, werden hier vier Bewertungsgrade in Betracht gezogen:

- in Ordnung,
- verdächtig,
- beschädigt,
- zerstört.

Die Menge O ist definiert:

Element	in Ordnung	verdächtig	beschädigt	zerstört
μ_O	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0

Fuzzy-Menge des Gefühls des Vermessers bei der Messung C

Für den nächsten subjektiven Parameter, der das Gefühl des Beobachters während der Einmessung angibt, werden drei Bewertungsgrade zugrunde gelegt:

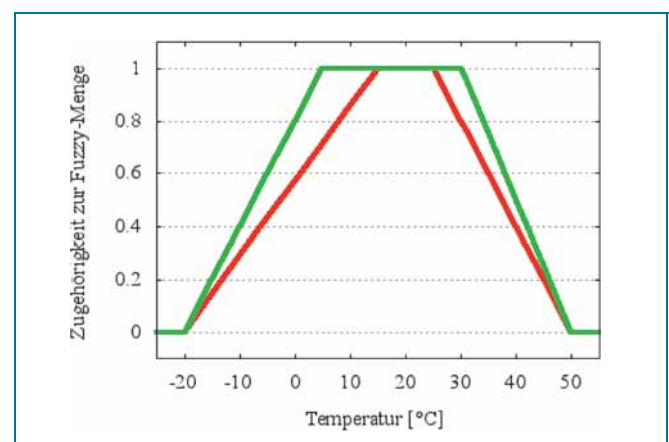


Abb. 4: Diagramm der Zugehörigkeitsfunktion der Menge P

- ausgezeichnet,
- gut,
- schlecht.

Allgemein ist hier die Fünf-Grad-Skala geeignet, ergänzt durch die Grade: sehr gut und sehr schlecht. Diese Einteilung ist aber hier mit Rücksicht auf die angegebenen Beispiele und deren Umfang nicht anwendbar. Die Fuzzy-Menge C wird definiert:

Element	ausgezeichnet	gut	schlecht
μ_C	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$

Fuzzy-Menge für die Punkttransformation D

Für die zu bestimmenden Parameter der Transformation (Deformation) eines Punktes wird nun die Fuzzy-Menge D definiert, deren Universum $U_D \in \mathbb{R}$ ist mit der Zugehörigkeitsfunktion $D: U_D \rightarrow \langle 0; 1 \rangle$, die die folgende Form hat:

$$\mu_D(d_i) = \max \left(\min \left(\frac{d_i - a_4}{a_3 - a_4}, 1 \right), 0 \right)$$

wobei $a_3 = u_{M-5\%}$,

$a_4 = u_{M+5\%}$,

d_i die berechnete Verschiebung,

u_M der Wert der bewiesenen Verschiebung ist.

5.1.3 Inferenz-Fuzzy-Regeln

Für die Zusammensetzung des Mechanismus für die Entscheidung ist es notwendig, richtige und funktionelle Fuzzy-Regeln festzulegen. Die Komplexität und der Umfang von Regeln sind von der Anzahl und vom Typ der festgelegten Kriterien abhängig, aber auch vom zu erwartenden Ausgang nach dessen Anwendung bzw. von der Komplexität des ganzen Entscheidungsmodells.

5.2 Regel zur Bestimmung der Qualität des Punktes K

FALLS die Vermarkung des Punktes S , die Bedeutung des Punktes V und die Umgebung des Punktes O sind, DANN ist die Qualität des Punktes K

$$k = S \times_p V \times_p O,$$

wobei das Symbol $\times_p$ das Produkt bezeichnet.

Nach der Anwendung dieser Regel gewinnt man die Menge „Qualität des Punktes K “, die durch den Wert k bestimmt wird, der den Zugehörigkeitsgrad der einzelnen beobachteten Punkte zu dieser Menge repräsentiert. Auch für diese Menge gilt, dass die Zugehörigkeitsfunktion im geschlossenen Intervall $\langle 0; 1 \rangle$ liegt.

Beispiel 3: Hier wird eine Punktdatensatz, in der alle möglichen Varianten aufgrund der Definition von Mengen S , V , O vertreten sind, verwendet. Für diese Punkte berechnet man die Zugehörigkeitswerte zur Menge K . Die Definition der Mengen ist ähnlich wie oben im Text. Für das Vereinfachen des Beispiels gegenüber dem theoretischen Teil Háneĳ (2009a) wurden die Mengen O und V vereinfacht, d. h. sie haben eine kleinere Anzahl von Bewertungsgraden. Im folgenden Diagramm (Abb. 5) sind einzelne Zugehörigkeitswerte zur Fuzzy-Menge an den Punkten veranschaulicht, die die Zugehörigkeit zur Menge K unterschiedlich von Null haben.

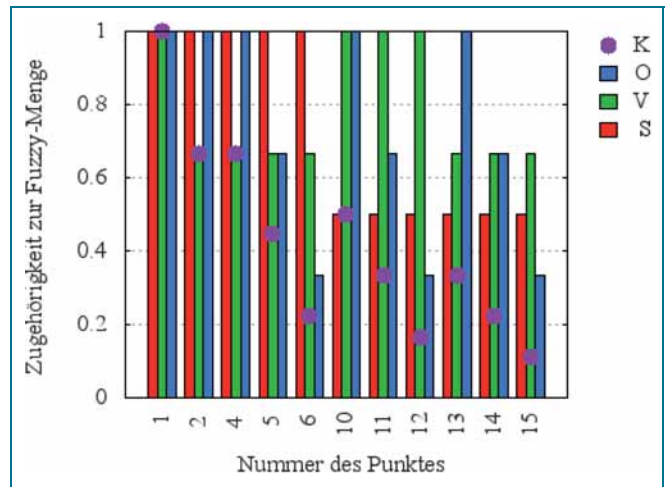


Abb. 5: Diagramm des Verlaufs der Qualität des Punktes K

Regeln für Bestimmung von Bedingungen bei der Einmessung Z

FALLS die klimatische Bedingung P , Informationen über den Beobachter M und die Erfahrung des Beobachters C sind, DANN die Bedingungen von Einmessung Z ist z ,

$$z = P \times_p M \times_p C.$$

Beispiel 4: Auch in diesem Beispiel bildet man eine Punktdatensatz, in der alle möglichen Kombinationen mit Rücksicht auf die Definitionen der Mengen P , M , C vertreten sind. Auf diese Datensatz wendet man die Regeln für die Menge Z an. In Abb. 6 sind wieder nur die Punkte angeführt, die den Zugehörigkeitswert zur Menge Z unterschiedlich von Null haben. Die Tabellen mit Daten einschließlich der Punkte, die die Null-Zugehörigkeit erreichen, sind wieder in Háneĳ (2009a) aufgeführt. Der Bereich der Betriebstemperaturen einer Totalstation ist -20°C bis $+50^\circ\text{C}$. Die Beobachter halten Temperaturen im Intervall von $+15^\circ\text{C}$ bis $+25^\circ\text{C}$ für ideal.

Regeln für die Bestimmung der Verschiebung Q

FALLS die Punktqualität K gleich 0 ist, DANN ist die Bestimmung der Verschiebung von Q von „schlechter Qualität des Punktes“

ODER

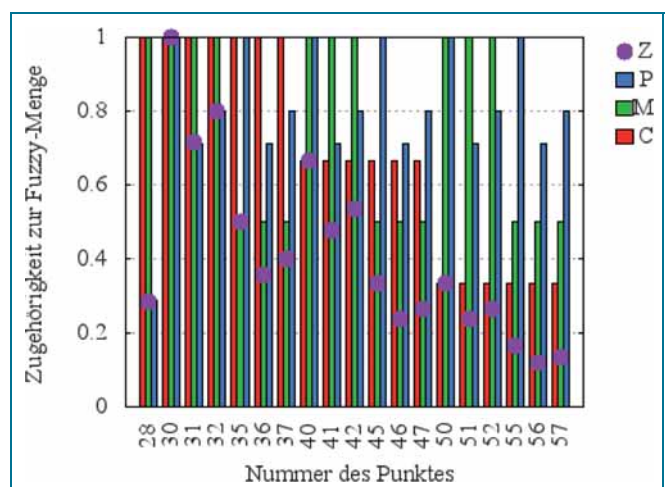


Abb. 6: Diagramm von Bedingungen bei der Einmessung Z

FALLS die Bedingung bei Einmessung Z gleich 0 ist, DANN stellt die Bestimmung der Verschiebung Q „ungünstige Bedingungen bei der Vermessung“ dar ODER

FALLS die Raum-Standardabweichung A , die Objektumformung D , die Punktqualität K , Einmessungsbedingungen Z sind, DANN ist die Bestimmung der Verschiebung Q der Wert q :

$$q = \frac{\sum_i^n \alpha_i \mu_i}{\sum_i^n \alpha_i}$$

wobei α_i das Gewicht der Menge zur Entscheidung (in dieser Applikation $\alpha_A = \alpha_D = 2$, $\alpha_K = \alpha_Z = 1$), μ_i der Zugehörigkeitsgrad zur Menge ist.

5.2.1 Defuzzifikation

Nachdem der Zugehörigkeitswert zur Fuzzy-Menge Q berechnet wurde, kann man deren Defuzzifikation durchführen. Defuzzifikation ist eine Operation, die den Zugehörigkeitswert zur Fuzzy-Menge auf einen konkreten Ausgangswert transformiert, d.h. auf einen eindeutigen Schluss, den man anwenden kann. In diesem Fall wurde für die Defuzzifikation die Methode DEE (Defuzzification of Evaluating Expressions) verwendet. Anschließend wird der Typ der Zugehörigkeitsfunktion klassifiziert werden; hier geht es nach Novák (2000) um den Typ S+. Die Zugehörigkeitsfunktion und deren Verlauf werden definiert:

$$Q(Q_i) = \begin{cases} 0,9 \leq Q_i \leq 1, & \text{stabiler Punkt} \\ 0,8 \leq Q_i < 0,9, & \text{wahrscheinlich stabiler Punkt} \\ 0,6 \leq Q_i < 0,8, & \text{verdächtiger Punkt} \\ 0 \leq Q_i < 0,6, & \text{instabiler Punkt.} \end{cases}$$

Beispiel 5: Nach der Durchführung der Defuzzifikation mithilfe der oben angeführten Vorgänge und Beispiele enthält das mathematische Modell für den Entscheidungsfall in der Ebene einer Koordinatenachse 3240 Lösungen, wobei 14 Punkte stabil, 125 Punkte wahrscheinlich stabil, 782 Punkte als instabil verdächtigt und 447 Punkte instabil sind. Die restlichen 1872 Varianten sind nicht klassifizierbare Fälle, d.h. solche Fälle, die bei realen Vermessungen nicht vorkommen sollen (z.B. Nicht-Einmessung des Punktes, Überschreiten des Temperaturbereichs usw.).

6 Zusammenfassung

Bei dieser Art und Weise der Festlegung der Aussage über die Punkttransformation mit dem vorgestellten Modell, z.B. beim Aufbau eines neuen Detailpunktnetzes, werden kleine Korrekturen im Messverfahren verlangt. Das heißt, gegenüber der üblichen Erfassung der Messdaten soll man bei allen Punkten die äußeren Einflüsse und die Erfahrung des Beobachters während der Messung zusätzlich berücksichtigen. Bis jetzt wurde nur der „ungünstige Zustand“ bei diesen Charakteristiken verzeichnet. Ebenfalls wäre es geeignet, einen Test der Beobachter durchzuführen,

für die dann ein persönlicher Fehler bestimmt würde, bzw. man sollte Kriterien bestimmen, nach denen sie klassifiziert und zur bestimmten qualitativen Gruppe zugeteilt würden. Für den Fall der Registrierung von Messdaten in Totalstationen sollte dann ein Decodierungsschlüssel festgelegt werden.

Eine andere geeignete Optimierung der Messungen könnte unter Berücksichtigung der Entwicklung des Netzaufbaues von Permanentstationen für GNSS-Messungen die Prüfung von Möglichkeiten des Ersatzes der eigenen Referenzstation durch eine virtuelle Referenzstation (VRS) des Netzes CZEPOS (Tschechisches Permanentstationsnetz für Lagenbestimmung) sein. Eine solche Verwendung von VRS würde bei der gegenwärtigen Ausstattung vor allem zeitliche und wirtschaftliche Ersparnisse bringen.

Dieser Text ist ein Teil der Lösung eines Forschungsvorhabens des Ministeriums für Schulwesen und Jugend der Tschechischen Republik Nr. VZ 01 MSM 6840770001 Verlässlichkeit, Optimierung und Beständigkeit von Baumaterialien und Konstruktionen.

7. Literatur

- [1] Bubeník, F.; Hánek, P. (Jr.); Hánek, P.; Janžurová, I.: Geodätische Messungen von Hangrutschungen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 113, 2006, No. 8-9, S. 310-315, ISSN 0002-5968.
- [2] Bubeník, F.; Hánek, P. (Jr.); Hánek, P.; Janžurová, I.: Terrestrial and GPS Measurements of Slope Slides at Localities of Reclamation of an Open-Cast Mine. Forum Internationales Vermessungswesen INTERGEO 2007, DVW, Leipzig, 2007.
- [3] Hánek, P. (Jr.): Využití matematických postupů v inženýrské geodézii. (Ausnutzung von mathematischen Verfahren in der Ingenieurgeodäsie.) Dissertationsarbeit. TU Prag, 2009.
- [4] Hánek, P. (Jr.): Fuzzy logika v matematickém modelu stability měřického bodu. (Fuzzy-Logik im mathematischen Modell der Stabilität des Messpunktes.) Geodetický a kartografický obzor 55 (97), 2009, No. 5, S. 106-110, ISSN 0016-7096.
- [5] Hánek, P.; Maříšková M.; Hánek, P.(Jr.): Geodézie pro pozemkové úpravy a převody nemovitostí. (Geodäsie für Grundstückregelungen und Liegenschaftstransaktionen.) Südböhmische Universität, České Budějovice 2008, ISBN 978-80-7394-086-7.
- [6] Novák, V.: Základy fuzzy modelování. (Grundlagen der Fuzzy-Modellierung.) Praha, Vydavatelství BEN, 2000, ISBN 80-7300-009-1.
- [7] Soukup, L.: Shodnostní Helmertova transformace. (Helmert-Kongruenztransformation.) http://slon.fsv.cvut.cz/vyuka/LS/gde4/studijni_materialy/shodnostniHelmertovka.pdf, TU Prag, 2005.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Pavel Hánek
VÚGTK v.v.i. - Forschungsinstitut für Geodäsie,
Topographie und Kartographie in Zdiby
CZ-25066 Zdiby, Ústecká 98
E-Mail: pavel.hanek@vugtk.cz