



Munich Personal RePEc Archive

## **A Bayesian network for analysing the risk of falling from height in scaffolding**

Oepping, Hardy

Jade Hochschule Wilhelmshaven, Fachbereich Management,  
Information, Technologie

30 August 2016

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/73602/>  
MPRA Paper No. 73602, posted 10 Sep 2016 13:19 UTC

# ***Ein Bayes-Netz zur Analyse des Absturzrisikos im Gerüstbau***

Hardy Oepping  
Jade Hochschule Wilhelmshaven

**Abstract:** Das Risiko, beim Aufbau eines Gerüsts abzustürzen, ist ein schwerwiegendes operatives Risiko eines Gerüstbauunternehmens. Es ist für das Risikomanagement daher von entscheidender Bedeutung, die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Risikos unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren und möglicher Bewältigungsmaßnahmen bewerten zu können. Im Rahmen der vorgestellten Untersuchung werden die folgenden Thesen diskutiert:

1. Die Länge eines Gerüsts erhöht das Absturzrisiko stärker als seine Höhe
2. Wechselnde Mitarbeiter erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines Absturzes
3. Mit zunehmendem Baufortschritt verringert sich das Absturzrisiko

Die Thesen werden mit Hilfe eines Bayes-Netzes analysiert, das geeignete Hypothesen über die Höhe der Absturzwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit relevanter Einflussfaktoren enthält. Der Modellentwicklungsprozess und der Aufbau des Modells werden vorgestellt und diskutiert. Theoretische Implikationen, Probleme sowie mögliche Lösungsansätze für die Entwicklung und Anwendung des Risikomodells werden ausführlich beschrieben.

**Keywords:** Gerüstbau, Absturz, Risikoanalyse, Risikomodell, Bayes-Netz

## 1. Einleitung

Das Risiko, beim Aufbau eines Gerüsts abzustürzen, ist ein schwerwiegendes operatives Risiko eines Gerüstbauunternehmens. Es ist daher für das Risikomanagement von entscheidender Bedeutung, die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Risikos unter Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren und möglicher Bewältigungsmaßnahmen bewerten zu können. Im Rahmen der vorgestellten Untersuchung werden die folgenden Thesen diskutiert:

1. Die Länge eines Gerüsts erhöht das Absturzrisiko stärker als seine Höhe
2. Wechselnde Mitarbeiter erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines Absturzes
3. Mit zunehmendem Baufortschritt verringert sich das Absturzrisiko

Damit die o.g. Thesen analysiert und bewertet werden können, wird ein Risikomodell in Form eines Bayes-Netzes entwickelt, das die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der für die vorliegende Untersuchung relevanten Eigenschaften eines Gerüstbauprojekts möglichst gut abbildet. Zur Entwicklung des Risikomodells wurde ein Team aus Modellierungs- und Gerüstbauexperten gebildet, das sich an der von Fenton/Neil (2013, S. 162 ff.) vorgeschlagenen Vorgehensweise orientiert und das Modell nach dem folgenden Prozess entwickelt hat.

- Identifikation der relevanten Zufallsvariablen
- Modellierung der Abhängigkeiten zwischen den Zufallsvariablen
- Identifikation der relevanten Ausprägungen der Zufallsvariablen
- Schätzung der bedingten Wahrscheinlichkeiten

Um die Praktikabilität des Modells sicherzustellen, sind bei der Entwicklung die folgenden Zielsetzungen verfolgt worden:

- Begrenzung der Anzahl abzubildender Zufallsvariablen
- Operationalisierbarkeit der Ausprägungen der Zufallsvariablen
- Begrenzung der Anzahl zu schätzender Wahrscheinlichkeiten

In den weiteren Abschnitten werden dieser Modellentwicklungsprozess und die sich anschließende Risikoanalyse beschrieben. Die dabei aufgetretenen Probleme einer praxisgerechten Umsetzung der theoretischen Anforderungen sowie die beschrittenen Lösungsansätze werden diskutiert. Zufallsvariablen werden in den folgenden Betrachtungen mit einem großen Buchstaben, ihre jeweiligen Ausprägungen mit einem kleinen Buchstaben bezeichnet. Sei  $A^i$  die  $i$ -te diskrete Zufallsvariable des Modells, dann bezeichnet  $a_j^i$  die  $j$ -te Merkmalsausprägung dieser Zufallsvariable.

## 2. Entwicklung des Risikomodells

### 2.1. Identifikation der relevanten Zufallsvariablen

Die im Modell abzubildenden statistischen Beziehungen zwischen den relevanten Eigenschaften eines Gerüstbauprojekts sollen als kausale Beziehungen verstanden werden können und von den Ursachen zu den Wirkungen gerichtet sein. Da sich kausale Abhän-

gigkeiten auch als statistische Abhängigkeiten offenbaren, stellt ein Kausalmodell sicher, dass die in der kausalen Modellstruktur implementierten Abhängigkeiten auch in der abzubildenden Wahrscheinlichkeitsverteilung gelten.

Sofern die kausalen Abhängigkeiten durch das Modell vollständig abgebildet werden, ist zudem sichergestellt, dass die Unabhängigkeiten in der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung in der Modellstruktur verankert sind und nicht mehr über die zu schätzenden Parameter abgebildet werden müssen. Die bedingte Wahrscheinlichkeit für den Eintritt direkter Wirkungen bei Vorliegen bestimmter Ursachen ist zudem von den beteiligten Fachexperten einfacher abzuschätzen als für beliebigen andere statistische Zusammenhänge zwischen den Zufallsvariablen des Modells.

Durch die konsequente Beschränkung auf Ursache-Wirkungsbeziehungen ist es darüber hinaus möglich, die beeinflussbaren Ursachen für das Absturzereignis als Instrumente für eine Risikobewältigung aufzufassen und das Modell damit nicht nur zur Ermittlung und Analyse von a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für den Absturz oder anderer Projekt ereignisse, sondern auch zur Analyse der Wirkungen geeigneter Maßnahmen für die Risikobewältigung zu verwenden.

Das mit dem Modell zu analysierende Risikoereignis wird definiert als „Absturz beim Aufbau eines längenorientierten Standgerüsts“ (DIN 2004, S.4).

Damit die o.g. Thesen analysiert und bewertet werden können, muss die Eintrittswahrscheinlichkeit des Absturzes mit Hilfe des Modells für unterschiedliche Höhen und Längen eines Gerüsts, für den Aufbau des Gerüsts durch unterschiedliche Mitarbeiter sowie für die Projektrestlaufzeit zu Zeitpunkten eines unterschiedlichen Baufortschritts ermittelt werden können. Damit muss das Modell als relevante Zufallsvariablen mindestens das Absturzereignis sowie die genannten Einflussfaktoren enthalten. Sonstige Einflussfaktoren auf das Absturzereignis, deren Verteilung sich unter den an das Modell gestellten Abfragen nicht ändert, müssen nicht explizit als Zufallsvariablen modelliert werden. Stattdessen kann ihr Einfluss auch durch eine Anpassung der zu schätzenden bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten aller direkt von ihnen abhängigen Zufallsvariablen wie folgt im Modell abgebildet werden (vgl. Druzdzel/Suermond 1994).

Sei das durch die Zufallsvariable  $E$  repräsentierte Projekt ereignis direkt von den durch die Zufallsvariablen  $A^i$  und  $B^j$  repräsentierten Ursachen abhängig. Wenn die Ursachen  $B^j$  nicht als Zufallsvariablen im Modell enthalten sind, dann müssen die Beziehungen zwischen der Zufallsvariable  $E$  und den  $A^1, \dots, A^n$  durch die zu schätzenden bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p(E|A^1, \dots, A^n)$  so abgebildet werden, dass sie den Beziehungen zwischen dem Ereignis  $E$  und den Ursachen  $A^1, \dots, A^n$  eines Modells entsprechen, in dem die Ursachen  $B^j$  explizit modelliert worden sind. Nur dann werden die Beziehungen zwischen den Ereignissen  $A^1, \dots, A^n$  und dem Ereignis  $E$  so wiedergegeben, als ob die Ursachen  $B^j$  explizit modelliert worden wären. Für die  $p(E|A^1, \dots, A^n)$  muss dann gelten:

$$p(E|A^1, \dots, A^n) = \frac{p(E, A^1, \dots, A^n)}{p(A^1, \dots, A^n)} = \sum_{l_1} \dots \sum_{l_m} \frac{p(E, A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m)}{p(A^1, \dots, A^n)} \quad (1)$$

$$= \sum_{l_1} \dots \sum_{l_m} \frac{p(E|A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m) \cdot p(A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m)}{p(A^1, \dots, A^n)} \quad (2)$$

$$= \sum_{l_1} \dots \sum_{l_m} \frac{p(E|A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m) \cdot p(b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m | A^1, \dots, A^n) \cdot p(A^1, \dots, A^n)}{p(A^1, \dots, A^n)} \quad (3)$$

$$= \sum_{l_1} \dots \sum_{l_m} p(E|A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m) \cdot p(b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m | A^1, \dots, A^n). \quad (4)$$

Man erkennt, dass  $p(E|A^1, \dots, A^n)$  das gewichtete Mittel der  $p(E|A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m)$  darstellt, wobei  $p(b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m | A^1, \dots, A^n)$  die Gewichtungsfaktoren bilden. Sofern die  $B^j$  für gegebene Werte der  $A^i$  bedingt unabhängig sind, gilt

$$p(b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m | A^1, \dots, A^n) = p(b_{l_1}^1 | A^1, \dots, A^n) \cdot \dots \cdot (b_{l_m}^m | A^1, \dots, A^n) \quad (5)$$

und wenn die  $B^j$  auch von den  $A^i$  unabhängig sind, gilt:

$$p(b_{l_1}^1 | A^1, \dots, A^n) \cdot \dots \cdot (b_{l_m}^m | A^1, \dots, A^n) = p(b_{l_1}^1) \cdot \dots \cdot p(b_{l_m}^m) \quad (6)$$

Damit berechnet sich  $p(E|A^1, \dots, A^n)$  einfacher als

$$p(E|A^1, \dots, A^n) = \sum_{l_1} \dots \sum_{l_m} p(E|A^1, \dots, A^n, b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m) \cdot p(b_{l_1}^1) \cdot \dots \cdot p(b_{l_m}^m). \quad (7)$$

Es sei noch darauf hingewiesen, dass mit dieser Vorgehensweise auch sämtliche Ursachen eines Ereignisses eliminiert werden können. In diesem Fall wären im oben dargestellten Beispiel keine explizit modellierten Ursachen  $A^i$  vorhanden und die a-priori-Wahrscheinlichkeit der Zufallsvariable  $E$  würde sich nach Eliminierung voneinander unabhängiger Ursachen  $B^j$  berechnen als

$$p(E) = \sum_{l_1} \dots \sum_{l_m} p(E|b_{l_1}^1, \dots, b_{l_m}^m) \cdot p(b_{l_1}^1) \cdot \dots \cdot p(b_{l_m}^m). \quad (8)$$

Sofern die geschätzten Wahrscheinlichkeiten  $p(E|A^1, \dots, A^n)$  bzw.  $p(E)$  in einem Modell mit fehlenden Zufallsvariablen  $B^j$  diese Bedingung erfüllen, sind die gemeinsamen a-priori-Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zufallsvariablen  $A^i, E$  in beiden Modellen gleich. Dies gilt aber nur, solange sich die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $p(B^1, \dots, B^m | A^1, \dots, A^n)$  bzw. - bei entsprechenden Unabhängigkeiten - die Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $p(B^j)$  nicht verändern, da eine Veränderung dieser Verteilungen eine erneute Schätzung der  $p(E|A^1, \dots, A^n)$  bzw.  $p(E)$  erforderlich macht.

Eine Veränderung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $p(B^1, \dots, B^m | A^1, \dots, A^n)$  bzw.  $p(B^j)$  kann sich jedoch einstellen, wenn im Rahmen von Abfragen an das Modell a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten  $p(Y^1, \dots, Y^r | X^1, \dots, X^q)$  berechnet werden sollen und die Verteilungen  $p(B^1, \dots, B^m | A^1, \dots, A^n)$  bzw.  $p(B^j)$  von den  $X^1, \dots, X^q$  abhängig sind. Wenn in diesem Fall die Verteilungen  $p(Y^1, \dots, Y^r | X^1, \dots, X^q)$  von der Zufallsvariable  $E$  abhängig sind, würde die Abfrage  $p(Y^1, \dots, Y^r | X^1, \dots, X^q)$  in einem Modell mit vorhan-

denen Zufallsvariablen  $B^j$  und einem Modell mit fehlenden Zufallsvariablen  $B^j$  unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Sofern bei der Modellbildung die später durchzuführenden Abfragen und damit die aktiven Pfade für diese Abfragen noch nicht bekannt sind, können daher zunächst nur solche Zufallsvariablen in der oben erläuterten Weise aus dem Modell eliminiert werden, die Projekteigenschaften repräsentieren, deren spezifischer Einfluss auf andere Projekt ereignisse entweder nicht untersucht werden muss, deren a-posteriori-Wahrscheinlichkeit im Rahmen der Risikoanalysen nicht interessiert oder die keinen Vorgänger und nur einen Nachfolger haben. Unter diesen Bedingungen ist es ausgeschlossen, dass sich durch eine Abfrage ihre Verteilung verändert und sie zugleich das Abfrageergebnis beeinflussen.

Weiterhin können Zufallsvariablen ohne weitere Modellanpassungen unberücksichtigt bleiben, wenn sie Eigenschaften des Gerüstbauprojekts repräsentieren, die selbst keine Ursachen für andere relevante Projekt ereignisse darstellen („barren nodes“) und die Eintrittswahrscheinlichkeiten anderer Projekt ereignisse auch nicht für spezielle Ausprägungen dieser Projekteigenschaften untersucht werden sollen (vgl. Lin/Druzdzal, 1997 und Shachter, 1986). Darüber hinaus müssen auch solche Zufallsvariablen („d-separated nodes“) für einzelne Abfrage nicht in das Modell aufgenommen werden, die unter den mit dieser Abfrage gesetzten Projektbedingungen keine Auswirkungen auf die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit der in der Abfrage betrachteten Ereignisse haben (vgl. Pearl, 1986, S. 247-249). Eine Identifikation dieser d-separierten Zufallsvariablen ist nur für eine konkrete Abfrage und eine bekannte Modellstruktur möglich und kann daher in der Phase der Modellentwicklung noch nicht erfolgen.

Für das hier vorgestellte Risikomodell sind die in Tabelle 1 dargestellten Eigenschaften eines Gerüstbauprojekts als Einflussfaktoren für den Absturz vom Gerüst identifiziert worden. Die Bezeichnung erfolgt derart, dass Einflussfaktoren, die eine risikoe erhöhende Eigenschaft repräsentieren, als Risikofaktoren und Zufallsvariablen, die eine risikomindernde und zugleich direkt beeinflussbare Eigenschaft repräsentieren, als Bewältigungsmaßnahmen bezeichnet werden.

Risikofaktoren	
RF1	Die Beläge sind vereist
RF2	Die Beläge sind schneebedeckt
RF3	Der Himmel ist bewölkt
RF4	Die Montagetätigkeiten erfolgen nachts
RF5	Auf der Baustelle herrscht Starkwind
RF6	Der Monteur kommt alkoholisiert auf die Baustelle
RF7	Der Monteur hat nicht ausreichende Leistungsfähigkeit/ Ausdauer
RF8	Der Monteur hat mangelhafte Erfahrung/ Ausbildung
RF9	Der Monteur hat geringe Körpergröße
RF10	Der Monteur ist involviert in Rauferei, Streiche oder Streiterei
RF11	Der Monteur ist abgelenkt
RF12	Der Monteur ist nicht motiviert
Bewältigungsmaßnahmen	
BM1	Stahlböden werden als Belag verwendet
BM2	Rutschhemmende Sohlen werden verwendet
BM3	Eine künstliche Beleuchtung wird bei Bedarf installiert
BM4	Die Baustelle wird bei Starkwind geschlossen
BM5	Der Monteur zur Belagsmontage wird nach Größe ausgewählt
BM6	Es werden Alkoholtests durchgeführt

Tabelle 1: Explizit modellierte Ursachen für das Absturzrisiko

Die Eigenschaften Länge und Höhe des Gerüsts sowie der Baufortschritt werden nicht als Zufallsvariablen im Modell abgebildet. Stattdessen wird eine sinnvollere Methode angewendet, mit der der Einfluss dieser Projekteigenschaften auf das Absturzrisiko analysiert werden kann. Die Gründe für diese Entscheidung und die Art der Abbildung dieser Einflussfaktoren im Risikomodell erfolgt in den Abschnitten 2.2 und 3.2.

## 2.2. Modellierung der Beziehungen zwischen den Zufallsvariablen

Damit die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Zufallsvariablen des Modells möglichst zutreffend durch die Modellstruktur repräsentiert werden kann, sollten die Unabhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren sowie ihr gemeinsamer Wirkmechanismus durch die Struktur des Modells möglichst zutreffend abgebildet werden.

Eine erste Idee der Modellierung besteht darin, eine direkte gemeinsame Wirkung aller Einflussfaktoren auf das Absturzereignis anzunehmen. Eine solche Modellstruktur unterstellt zutreffend einen noch nicht näher spezifizierten Mechanismus der Wirkung aller modellierten Einflussfaktoren auf das Absturzereignis, macht jedoch auch die unrealistische Annahme der Unabhängigkeit aller Einflussfaktoren. Daher müssten die vorliegenden Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren noch durch weitere kausale Abhängigkeitsstrukturen zwischen den Einflussfaktoren im Modell abgebildet werden.

Sofern jede Zufallsvariable nur zwei mögliche Ausprägungen annähme, ergäben sich bei 12 Risikofaktoren und 6 Bewältigungsmaßnahmen  $2^{12+6} = 2^{18} = 262144$  Projektzustände, für die eine bedingte Absturzwahrscheinlichkeit zu schätzen wäre, um damit den Wirkungsmechanismus der Einflussfaktoren auf das Absturzereignis abzubilden. Ein solcher Modellierungsansatz schließt sich nicht nur aufgrund des dafür erforderlichen zeitlichen Aufwandes sondern auch aufgrund der kognitiven Unmöglichkeit, die erforderlichen bedingten Wahrscheinlichkeiten für jede beliebige Projektsituation angeben zu können, aus. Es ist daher erforderlich, den Wirkungszusammenhang weiter zu analysieren und daraus strukturelle Zusammenhänge für die zu schätzenden bedingten Wahrscheinlichkeiten abzuleiten.

Ein Ansatz besteht darin, die Wirkungen der Einflussfaktoren als Wirkungsketten zu modellieren. Sofern nämlich in den Wirkungsketten von  $n$  Einflussfaktoren ein gemeinsam verursachtes Zwischenereignis enthalten ist, über das sich der Einfluss dieser Faktoren auf das Absturzereignis fortsetzt, wird das Absturzereignis bei bekanntem Zwischenereignis von diesen Einflussfaktoren unabhängig und stattdessen vom Zwischenereignis abhängig. Damit einhergehend wird die Annahme der Abhängigkeit aller Einflussfaktoren in Projekten mit bekanntem Absturzereignis durch die spezifischere Annahme ersetzt, dass die über das Zwischenereignis wirkenden Einflussfaktoren bei bekanntem Absturz- und Zwischenereignis unabhängig von den übrigen Einflussfaktoren sind.

Diese Annahmen haben für den anzuschließenden Schätzprozess die Konsequenz, dass die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Absturzereignis nicht mehr für die 262144 Kombinationen aller Einflussfaktoren, sondern nur noch für Kombinationen aus den übrigen  $18-n$  Einflussfaktoren und dem Zwischenereignis zu schätzen sind. Darüber

hinaus sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt des Zwischenereignisses in Abhängigkeit von  $n$  Einflussfaktoren zu schätzen. Damit reduziert sich die Zahl der für das Modell zu schätzenden bedingten Wahrscheinlichkeiten von  $2^{18}$  auf  $2^{18-n+1} + 2^n$  Wahrscheinlichkeiten. In entsprechender Weise kann der Schätzaufwand weiter reduziert werden, wenn sich auch in den Wirkungsketten anderer Einflussfaktoren gemeinsame Zwischenereignisse befinden oder sich in den Wirkungsketten der Zwischenereignisse gemeinsame nachfolgende Zwischenereignisse identifizieren lassen. Durch die mit dieser Vorgehensweise erreichte Beschränkung auf eine Modellierung von *gemeinsamen* Zwischenereignissen, d.h. von Zwischenereignissen, die in den Wirkungsketten *verschiedener* Ursachen vorkommen, wird die explizite Modellierung von Zufallsvariablen mit nur einem Vorgänger vermieden. Solche Zwischenereignisse würden die Anzahl zu schätzender bedingter Eintrittswahrscheinlichkeiten unnötig erhöhen, ohne einen Mehrwert für die Risikoanalyse darzustellen, wie die nachfolgende Erörterung zeigt.

Sei das Ereignis  $A$  die Ursache des Ereignisses  $C$ . Nach Analyse der Wirkungskette wird ein Zwischenereignis  $B$  identifiziert. Somit sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p(B|A)$  und  $p(C|B)$  zu schätzen. Für dichotome Zufallsvariablen kann die Wirkung von  $A$  auf  $C$  durch die Abfrage  $p(C|A)$  wie folgt aus den geschätzten Wahrscheinlichkeiten  $p(B|A)$  und  $p(C|B)$  berechnet werden:

$$p(C|A) = \frac{p(C, A)}{p(A)} = \frac{p(C, b_1, A) + p(C, b_2, A)}{p(A)} \quad (9)$$

$$= \frac{p(A) \cdot p(b_1|A) \cdot p(C|b_1) + p(A) \cdot p(b_2|A) \cdot p(C|b_2)}{p(A)} \quad (10)$$

$$= p(b_1|A) \cdot p(C|b_1) + p(b_2|A) \cdot p(C|b_2) \quad (11)$$

Wird das Zwischenereignis eliminiert und erfüllen die dann zu schätzenden Wahrscheinlichkeiten  $p(C|A)$  diese Bedingung, dann werden die Beziehungen zwischen  $A$  und  $C$  in beiden Modellen gleichwertig abgebildet. Eine Modellierung dieses Zusammenhangs mit dem Zwischenereignis  $B$  ist nur dann sinnvoll, wenn  $p(B|A)$  und  $p(C|B)$  einfacher zu schätzen sind als  $p(C|A)$ .

Neben der durch die oben erläuterte Modellierungsstrategie erreichten strukturellen Abbildung der bedingten Unabhängigkeiten und der damit einhergehenden Reduzierung der zu schätzenden bedingten Wahrscheinlichkeiten besteht die Aussicht, dass sich für die verbleibenden Ursache-Wirkungsbeziehungen geeignete Annahmen über den Wirkungszusammenhang machen lassen, die sich zur Ableitung von strukturellen Zusammenhängen zwischen den zu schätzenden bedingten Wahrscheinlichkeiten verwenden lassen. In Abschnitt 2.4 wird gezeigt, wie die Annahme eines Wirkungszusammenhangs entsprechend der sog. „noisy-OR“-Beziehung für die Modellbildung in der vorliegenden Untersuchung in dieser Weise genutzt wird.

Die im vorliegenden Risikomodell ergänzten Zwischenereignisse und ihre Abhängigkeiten von den Risikofaktoren und Bewältigungsmaßnahmen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Zwischenereignisse ZE10 bis ZE16 stellen in dem bisher dargestellten Modell die vorläufigen Endpunkte der Wirkungsketten dar.

Zwischenereignisse		Einflussfaktoren
ZE1	Es regnet	RF3
ZE2	Es herrschen ungünstige Wetterbedingungen	RF1, RF2, ZE1
ZE3	Die natürliche Beleuchtung der Baustelle ist nicht optimal	RF3, RF4
ZE4	Rutschgefahr ist vorhanden	ZE2, BM1, BM2
ZE5	Die Ausleuchtung der Baustelle ist unzureichend	ZE3, BM3
ZE6	Der Monteur arbeitet bei Starkwind	RF5, BM4
ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	RF6, BM6
ZE8	Der Belag wird von einer zu kleiner Person montiert	RF9, BM5
ZE9	Der Monteur ist nicht aufmerksam	RF11, RF12
ZE10	Der Monteur hat Gleichgewichtsstörungen	ZE4, ZE7
ZE11	Der Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter	RF8, ZE7, ZE9
ZE12	Der Monteur ist beim Betreten der Lage unsicher	RF7, RF8, ZE4, ZE5, ZE6, ZE7, ZE9
ZE13	Der Monteur ist beim Begehen der Lage unsicher	RF10, ZE4, ZE5, ZE6, ZE7
ZE14	Der Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen	RF8, ZE7, ZE9
ZE15	Der Monteur verliert sein Gleichgewicht bei Übergabe des Seitenschutzes	RF7, RF10, RF11, ZE6, ZE7
ZE16	Der Monteur verlässt den Belag zu Montagezwecken	RF7, ZE7, ZE8

Tabelle 2: Zwischenereignisse und abhängige Risikofaktoren

Soll auch für die Beziehung zwischen den Einflussfaktoren eine kausale Beziehung zugrunde gelegt werden, ist anzunehmen, dass eine statistische Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren nicht auf Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen diesen Einflussfaktoren, sondern auf eine kausale Abhängigkeit von gemeinsamen Ursachen zurückzuführen ist. In diesem Fall wären diese gemeinsamen Ursachen als weitere Zufallsvariablen in das Modell aufzunehmen. Diese Annahme führt zu der Erkenntnis, dass Abhängigkeiten zwischen Einflussfaktoren, die auf gemeinsame Ursachen zurückzuführen sind, immer dann in der Modellstruktur abgebildet sind, wenn alle Ursachen mit mindestens zwei direkten Nachfolgern als Zufallsvariablen im Modell abgebildet werden.

Da es sich bei den möglichen gemeinsamen Ursachen der Risikofaktoren RF1-RF3, RF5 um meteorologische Konstrukte, wie die Wetterlage, und bei den gemeinsamen Ursachen der Risikofaktoren RF6-RF12 um menschliche Konstrukte, wie z.B. die Einstellung, handelt, deren Ausprägungen schwer zu beschreiben und zu messen sind, wird von einer expliziten Modellierung dieser Ursachen abgesehen und daher eine Unabhängigkeit dieser Risikofaktoren angenommen. Diese Annahme führt bei solchen Abfragen an das Modell zu verzerrten Ergebnissen, mit denen der statistische Zusammenhang zwischen Projekt ereignissen analysiert werden soll, in deren Ursachenketten dieses Konstrukt enthalten ist.

Wie in Abschnitt 2.1 bereits angemerkt wurde, sind die Höhe und Länge des Gerüsts als Einflussfaktoren auf das Absturzrisiko nicht als Zufallsvariablen im Modell enthalten. Würde man z.B. ein Modell für Gerüste mit jeweils 10 verschiedenen Höhen und Längen erstellen, dann erhöhte sich bei Abbildung der Höhe und Länge des Gerüsts mit Hilfe von Zufallsvariablen die Anzahl der zu schätzenden bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für jedes im Modell enthaltene Ereignis, das direkt von der Höhe und Länge des Gerüsts abhängt, um den Faktor 100. Neben dieser erheblichen Zunahme der zu schätzenden bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten würde eine solche Modellierung auch voraussetzen, dass der Einfluss unterschiedlicher Höhen und Längen des Gerüsts auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der von ihnen abhängigen Ereignisse im Zusammenwirken mit den jeweiligen anderen Einflussfaktoren von den Gerüstbauexperten überhaupt abgeschätzt werden könnte. Aufgrund dieser Problematik soll daher ein anderer Weg

beschritten werden, um die Höhe und Länge als Einflussfaktoren auf die Absturzwahrscheinlichkeit in das Risikomodell zu integrieren.

Die Größe eines längenorientierten Standgerüsts weist sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung wiederkehrende Strukturen auf. Die in horizontaler Richtung wiederkehrenden Strukturen werden Felder, diejenigen in vertikaler Richtung werden Lagen genannt. Beim Aufbau des Gerüsts wird in der ersten Lage zunächst ein erster Vertikalrahmen gesetzt. Für die Erstellung des ersten Feldes dieser Lage werden dann ein folgender Vertikalrahmen, ein Seitenschutz sowie ein Belag montiert. Der folgende Vertikalrahmen stellt dann das Anbauelement für die Erstellung des zweiten Feldes dieser Lage da, an dem dann erneut ein folgender Vertikalrahmen, ein Seitenschutz sowie ein Belag montiert werden. Dieser Montageprozess wiederholt sich solange, bis alle Felder einer Lage erstellt sind. Danach wird darauf die nächste Lage nach gleichem Muster montiert. Dieser Prozess wiederholt sich mit jeder Lage solange, bis das gesamte Gerüst mit den Feldern der obersten Lage vollständig aufgebaut ist.

Damit lassen sich beim Aufbau eines jeden Gerüsts vier verschiedene Arten von Montagetätigkeiten unterscheiden, die je nach Höhe und Länge des Gerüsts unterschiedlich häufig durchzuführen sind:

- Montage des ersten Vertikalrahmens der Lage (MV1)
- Montage eines folgenden Vertikalrahmens der Lage (MVX)
- Montage eines Seitenschutzes (MS)
- Montage eines Belages (MB)

Für ein Gerüst mit drei Feldern in zwei Lagen sind damit die folgenden Montagetätigkeiten durchzuführen: 2 x MV1, 6 x MVX, 6 x MS und 6 x MB.

Da jeder Absturz beim Aufbau eines Gerüsts bei Durchführung einer dieser Tätigkeiten erfolgt, lässt sich jeder dieser vier Tätigkeiten eine spezifische Wahrscheinlichkeit dafür zuordnen, dass der Monteur bei Durchführung dieser Tätigkeit abstürzt, sofern davon ausgegangen werden kann, dass dieses Risiko unabhängig von der Lage und dem Feld ist, in dem die jeweilige Tätigkeit durchgeführt wird. Die Wahrscheinlichkeit, beim Aufbau des gesamten Gerüsts abzustürzen, kann anschließend durch eine Aggregation der Wahrscheinlichkeiten, bei einer dieser Tätigkeiten abzustürzen, ermittelt werden.

Dazu werden die folgenden tätigkeitsbezogenen Absturzereignisse definiert und ihre Abhängigkeit von den o.g. Zwischenereignissen wie folgt modelliert:

Absturzereignisse		Eltern
AMV1	Der Monteur stürzt bei der Montage des ersten Vertikalrahmens der Lage ab	ZE10, ZE11
AMVX	Der Monteur stürzt bei der Montage eines folgenden Vertikalrahmens ab	ZE12, ZE13, ZE14
AMS	Der Monteur stürzt bei der Montage eines Seitenschutzes ab	ZE15
AMB	Der Monteur stürzt bei der Montage eines Belages ab	ZE16

Tabelle 3: Tätigkeitsbezogene Einzelrisikoereignisse

Soll z.B. ein Risikomodell für ein Gerüst mit einem Feld in drei Lagen erstellt werden, sind die Zufallsvariablen AMV1, AMVX, AMS und AMB jeweils dreimal in das Risikomodell aufzunehmen. Die Struktur des Modells für ein solches Gerüst mit seinen Zufallsvariablen und ihren jeweiligen Abhängigkeiten zeigt Abbildung 1.

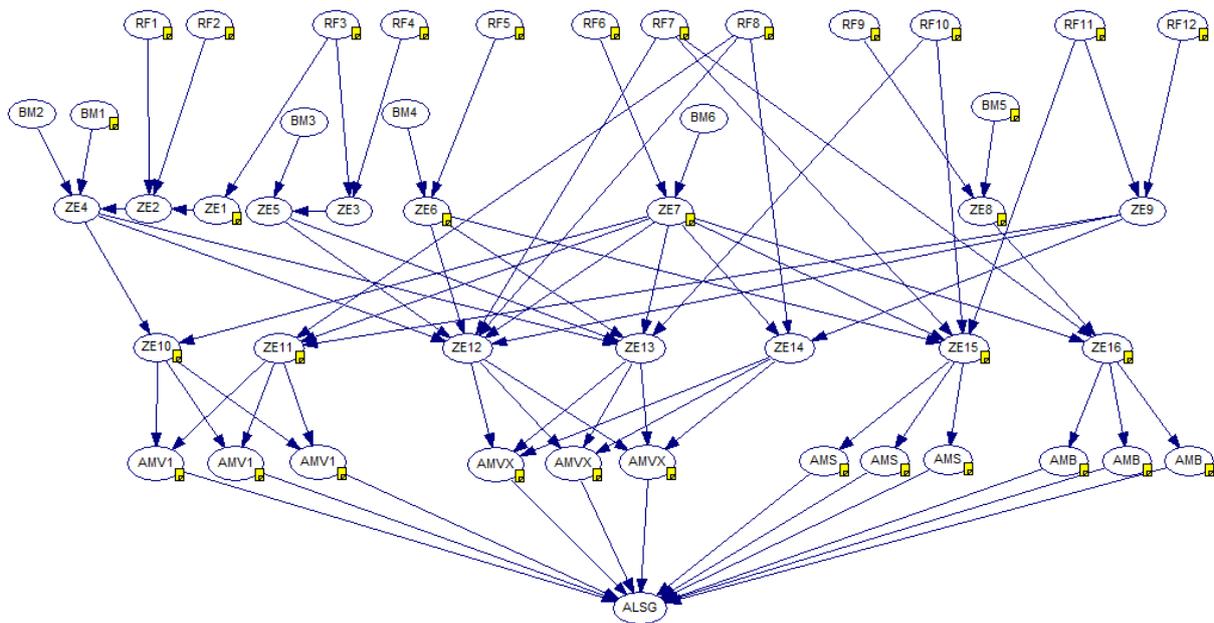


Abbildung 1: Struktur des Risikomodells

Das durch das Risikomodell zu erklärende Ereignis „Absturz vom längenorientierten Standgerüst“ (ALSG) ist durch eine deterministische OR-Beziehung direkt von den modellierten Einzelrisikoereignissen abhängig und tritt genau dann ein, wenn mindestens eines der Einzelrisikoereignisse eingetreten ist.

### 2.3. Identifikation der relevanten Ausprägungen der Zufallsvariablen

Nachdem die zu analysierenden Risikofaktoren und Bewältigungsmaßnahmen sowie die Struktur des Kausalmodells zur Analyse des Absturzrisikos festgelegt ist, besteht der nächste Schritt darin, die möglichen Zustände jeder Zufallsvariable zu identifizieren und zu entscheiden, in welcher Art und Weise diese Zustände im Risikomodell behandelt werden sollen.

Da für jeden Zustand einer unabhängigen Zufallsvariable eine Eintrittswahrscheinlichkeit und für jeden Zustand einer abhängigen Zufallsvariable bedingte Eintrittswahrscheinlichkeiten für alle Zustandskombinationen ihrer Einflussfaktoren zu schätzen sind, sollte vor dem Hintergrund der Praktikabilität des Risikomodells die Anzahl der Ausprägungen einer jeden Zufallsvariable möglichst klein sein. Die minimale Anzahl der zu schätzenden Eintrittswahrscheinlichkeiten wäre dann gegeben, wenn jede Zufallsvariable dichotom wäre, d.h. nur zwei zu unterscheidende Ausprägungen hätte.

Diese Bedingung ist für die Zufallsvariable ALSG (Absturz vom längenorientierten Standgerüst) leicht zu erfüllen, sofern für die Risikoanalyse von Gerüstbauprojekten Projektzustände, in denen es zu einem oder mehreren Abstürzen kommt, als gleich bedeutend anzusehen sind. In diesem Fall können in der Ausprägung „Absturz vom längenorientierten Standgerüst = nein“ alle absturzfreen Projektzustände, in der Ausprä-

gung „Absturz vom längenorientierten Standgerüst = ja“ alle übrigen Projektzustände zusammengefasst werden.

Die im Risikomodell abzubildenden Ausprägungen der Zufallsvariablen stellen demnach Klassen möglicher Zustände dieser Zufallsvariablen dar, die im Rahmen der Risikoanalyse als gleichbedeutend anzusehen sind. Für Zufallsvariablen, die im Risikomodell Einflussfaktoren anderer Zufallsvariablen darstellen, können Zustände als gleichbedeutend angesehen und damit zu einer Ausprägung zusammengefasst werden, wenn für jede von ihr unmittelbar abhängige Zufallsvariable gilt, dass die Wirkungen der Zustände auf die jeweilige abhängige Zufallsvariable gleich sind, wie in den folgenden Erörterungen gezeigt wird.

Zwei Zustände  $a_k$  und  $a_l$  der Zufallsvariable  $A$  können zu einer Klasse und damit zu einer Ausprägung der Zufallsvariable  $A$  zusammengefasst werden, wenn für jede Zufallsvariable  $E^i$ , für die  $A$  ein unmittelbarer Einflussfaktor ist, mit den übrigen unmittelbaren Einflussfaktoren  $B^{ji}$  der Zufallsvariable  $E^i$  gilt:

$$p(E^i|a_k, B^{1i}, \dots, B^{ni}) = p(E^i|a_l, B^{1i}, \dots, B^{ni}) \quad (12)$$

Soll die Anzahl der Ausprägungen einer Zufallsvariable innerhalb des Risikomodells weiter reduziert werden, können auch solche Zustände zu einer Ausprägung zusammengefasst werden, die hinsichtlich ihrer Wirkungen hinreichend ähnlich sind. In diesem Fall ist die Gleichheitsbedingung durch eine geeignete Ähnlichkeitsbedingung zu ersetzen.

Um mit dieser Vorgehensweise eine maximale Vereinfachung des Modells zu erhalten, muss mit der Klassenbildung bei denjenigen Zufallsvariablen begonnen werden, die selbst keine Auswirkungen innerhalb des Modells haben. Die Begründung dafür soll am Beispiel eines kleinen Modells, bestehend aus den drei Zufallsvariablen  $A, B, E$  mit jeweils 3 verschiedenen Zuständen, illustriert werden. Es wird angenommen, dass  $A$  und  $B$  unmittelbare Einflussfaktoren von  $E$  sind. Die Tabelle 4 stellt die Matrix der bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(E|A, B)$  dar.

	$a_1$			$a_2$			$a_3$		
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$e_1$	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
$e_2$	0,3	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2
$e_3$	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6

Tabelle 4: Einfluss der Zufallsvariablen  $A, B$  auf die Zufallsvariable  $E$

Man erkennt, dass es keine zwei verschiedenen Zustände  $a_i$  und  $a_j$  gibt, für die  $p(E|a_i, b_k) = p(E|a_j, b_k)$  für alle  $b_k$  gilt. Ebenso wenig gibt es zwei verschiedene Zustände  $b_k$  und  $b_l$ , für die  $p(E|a_i, b_k) = p(E|a_i, b_l)$  für alle  $a_i$  gilt. Damit lassen sich keinerlei Zustände von  $A$  oder  $B$  zu einer Klasse von Zuständen gleicher Wirkung und damit zu einer Ausprägung der Zufallsvariablen  $A$  oder  $B$  zusammenfassen.

Anders sieht die Situation aus, wenn die Zufallsvariable  $E$  zuvor klassiert wurde. Es wird in diesem Beispiel angenommen, dass die Zustände  $e_1$  und  $e_2$  aufgrund ihrer gleichen

Wirkungen im Modell zu einer Ausprägung  $e_{1,2}$  zusammengefasst werden. Nach dieser Klassierung stellt sich die Wirkungsbeziehung zwischen  $A$ ,  $B$  und  $E$  wie folgt dar:

	$a_1$			$a_2$			$a_3$		
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$e_{1,2}$	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
$e_3$	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6

Tabelle 5: Einfluss der Zufallsvariablen  $A$ ,  $B$  auf die klassierte Zufallsvariable  $E$

Man erkennt, dass in diesem Fall  $p(E|a_1, b_k) = p(E|a_3, b_k)$  für alle  $b_k$  und auch  $p(E|a_i, b_1) = p(E|a_i, b_3)$  für alle  $a_i$  gilt, sodass sowohl die Zustände  $a_1$  und  $a_3$  der Zufallsvariable  $A$  als auch die Zustände  $b_1$  und  $b_3$  der Zufallsvariable  $B$  zu einer Klasse zusammengefasst werden können. Man erhält damit ein vereinfachtes Modell mit dichotomen Zufallsvariablen, deren Beziehung durch die in Tabelle 6 dargestellten bedingten Wahrscheinlichkeiten repräsentiert wird.

	$a_{1,3}$		$a_2$	
	$b_{1,3}$	$b_2$	$b_{1,3}$	$b_2$
$e_{1,2}$	0,4	0,4	0,5	0,4
$e_3$	0,6	0,6	0,5	0,6

Tabelle 6: Einfluss der klassierten Zufallsvariablen  $A$  und  $B$  auf die klassierte Zufallsvariable  $E$

Sollten die Zufallsvariablen  $A$  und  $B$  in diesem Beispiel Auswirkungen auf weitere Zufallsvariablen des Modells haben, ist vor einer Zusammenfassung der Zustände  $a_1$  und  $a_3$  zu einer Ausprägung  $a_{1,3}$  und der Zustände  $b_1$  und  $b_3$  zu einer Ausprägung  $b_{1,3}$  sicherzustellen, dass diese Zustände auch aus Sicht ihrer Auswirkungen auf diese anderen Zufallsvariablen zusammengefasst werden können.

Sofern die o.g. Bedingung für die Zusammenfassung von Zuständen zu einer Ausprägung nicht erfüllbar sind, aber aus Gründen der Komplexitätsreduktion gleichwohl unterschiedlich wirksame Zustände zu einer Ausprägung zusammengefasst werden sollen, sollen nun die daraus resultierenden Konsequenzen für die Risikoanalyse betrachtet werden.

Dieser Fall liegt dann vor, wenn in der in Tabelle 5 dargestellten Situation die Zustände  $b_1$  und  $b_2$  zu einer Ausprägung zusammengefasst würden. In diesem Fall würde die oben erläuterte Forderung der Wirkungsgleichheit von  $b_1$  und  $b_2$  für  $a_2$  nicht erfüllt. Es stellt sich damit die Frage, welche bedingte Wahrscheinlichkeit der Beziehung  $p(E|a_2, b_{1,2})$  zugrunde zu legen ist. Würde man sich z.B. dafür entscheiden, für  $p(E|a_2, b_{1,2})$  eine der bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(E|a_2, b_1)$  oder  $p(E|a_2, b_2)$  zu wählen, würde bei Auswahl von  $p(E|a_2, b_1)$  für  $p(E|a_2, b_{1,2})$  in denjenigen Fällen, in denen tatsächlich der Zustand  $b_2$  vorliegt, die Wirkung des Einflussfaktors  $B$  auf  $E$  falsch wiedergegeben werden. Es bietet sich daher an, für  $p(E|a_2, b_{1,2})$  solche Werte zu wählen, mit denen der Erwartungswert der Wirkungen aller in der Ausprägung  $b_{1,2}$  zusammengefassten Zustände  $b_1$  und  $b_2$  richtig wiedergegeben wird. Es gilt:

$$p(E|a_2, b_{1,2}) = \frac{p(E, a_2, b_{1,2})}{p(a_2, b_{1,2})} = \frac{p(E, a_2, b_1) + p(E, a_2, b_2)}{p(a_2, b_1) + p(a_2, b_2)} \quad (13)$$

$$= \frac{p(E|a_2, b_1) \cdot p(a_2, b_1) + p(E|a_2, b_2) \cdot p(a_2, b_2)}{p(a_2, b_1) + p(a_2, b_2)} \quad (14)$$

$$= p(E|a_2, b_1) \frac{p(a_2, b_1)}{p(a_2, b_1) + p(a_2, b_2)} + p(E|a_2, b_2) \frac{p(a_2, b_2)}{p(a_2, b_1) + p(a_2, b_2)} \quad (15)$$

Bei Unabhängigkeit der Zufallsvariablen A und B vereinfacht sich dieser Ausdruck wegen  $p(a_2, b_1) = p(a_2) \cdot p(b_1)$  und  $p(a_2, b_2) = p(a_2) \cdot p(b_2)$  zu

$$p(E|a_2, b_1) \frac{p(b_1)}{p(b_1) + p(b_2)} + p(E|a_2, b_2) \frac{p(b_2)}{p(b_1) + p(b_2)} \quad (16)$$

Dies bedeutet, dass die Gesamtwirkung eines Einflussfaktors  $B$  auf eine Zufallsvariable  $E$  bei Zusammenfassung unterschiedlich wirksamer Zustände  $b_1$  und  $b_2$  zu einer Ausprägung richtig wiedergeben wird, wenn für die bedingte Wahrscheinlichkeit  $p(E| \cdot, b_{1,2})$  in den gemeinsamen Wirkungsbeziehungen von  $B$  mit anderen Einflussfaktoren ein gewichtetes arithmetisches Mittel aus den bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(E| \cdot, b_1)$  und  $p(E| \cdot, b_2)$  gewählt wird, wobei bei Unabhängigkeit von  $B$  und den anderen Einflussfaktoren die bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(b_1)/(p(b_1) + p(b_2))$  bzw.  $p(b_2)/(p(b_1) + p(b_2))$  als Gewichtungen gewählt werden. Sollte sich die Verteilung der Zustände  $b_1$  und  $b_2$  im Rahmen von Abfragen an das Modell ändern, wären die Gewichtungen entsprechend anzupassen.

Im vorliegenden Risikomodell werden die möglichen Zustände aller Zufallsvariablen genau zwei Klassen zugeordnet, wobei die mit „ja“ bezeichnete Klasse diejenigen Zustände umfasst, die durch die Benennung der Zufallsvariable zutreffend beschrieben werden, während die mit „nein“ bezeichnete Klasse alle übrigen Zustände enthält. Im Folgenden werden das oben erläuterte Vorgehen und die dabei gebildeten Klassen anhand einiger Wirkungsbeziehungen des Modells beispielhaft hinsichtlich der Erfüllung der Bedingungen (13) bis (16) diskutiert.

Die tätigkeitsbezogenen Absturzereignisse AMV1, AMVX, AMS und AMB können mit den zwei für die Risikoanalyse relevanten Klassen „ja“ für alle Absturzsituationen und „nein“ für alle übrigen Zustände zusammengefasst werden, da die bedingte Wahrscheinlichkeit des Absturzes vom Gerüst (ALSG) für alle Fälle, in denen mindestens eine der Zufallsvariablen AMV1, AMVX, AMS oder AMB einen Zustand der Klasse „ja“ annimmt, gleich „1“ und für alle übrigen Fälle gleich „0“ ist. Nach der Festlegung der Ausprägungen für die Zufallsvariablen AMV1, AMVX, AMS und AMB können die Zustände der Zwischenereignisse ZE10 bis ZE16 klassiert werden, da diese lediglich Auswirkungen auf AMV1, AMVX, AMS und AMB haben, deren Ausprägungen bereits festgelegt sind.

Die Zwischenereignisse ZE10 (Monteur hat Gleichgewichtsstörungen) und ZE11 (Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter) sind Ursachen für den Absturz bei Montage des ersten Vertikalrahmens (AMV1). Es wird angenommen, dass ein durch Gleichgewichtsstörungen verursachter Absturz nur dann möglich ist, wenn der Monteur zu hoch auf der Durchstiegsleiter steht, da er sich ansonsten mit seinem Schwerpunkt unterhalb der Ebene der Durchstiegsklappe befindet und somit vor einem Abkippen von der Durchstiegsleiter gesichert ist.

Erst wenn er so hoch auf der Durchstiegsleiter steht, dass sich sein Körperschwerpunkt oberhalb der Ebene der Durchstiegsklappe befindet, verliert die Durchstiegsklappe ihre Sicherungsfunktion und zwar umso mehr, je höher er auf der Durchstiegsleiter steht. Daher werden in der Ausprägung „Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter = ja“ alle Positionen auf der Durchstiegsleiter zusammengefasst, in denen es überhaupt zu einem Absturz kommen kann und in dem Komplementärereignis „Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter = nein“ alle übrigen Zustände. Da die Eintrittswahrscheinlichkeit der Ausprägungen der Zufallsvariable AMV1 für die in der Ausprägung „Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter = ja“ zusammengefassten Zustände nicht gleich ist, sind die Wahrscheinlichkeiten  $p(AVM1 = ja | \cdot, ZE11 = ja)$  nach dem durch die Gleichungen (13) bis (16) beschriebenen Ansatz zu schätzen.

In der Ausprägung „Monteur hat Gleichgewichtsstörungen = ja“ des Zwischenereignisses ZE10 werden diejenigen Zustände zusammengefasst, in denen der Monteur sein Gleichgewicht bei der Montage nicht verlässlich halten kann. Damit enthält diese Klasse Gleichgewichtsstörungen jeden beliebigen Ausmaßes, sodass für alle Zustände, die in dieser Ausprägung zusammengefasst sind, eine gleiche bedingte Wahrscheinlichkeit für den Absturz bei Montage des ersten Vertikalrahmens nicht angenommen werden kann. Tatsächlich ist davon auszugehen, dass die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Absturz bei der Montage des ersten Vertikalrahmens mit dem Ausmaß der Gleichgewichtsstörung ansteigt.

Von einer Differenzierung in Ausprägungen unterschiedlich intensiver Gleichgewichtsstörungen wird jedoch aufgrund der Definitions- und Abgrenzungsproblematik unterschiedlicher Gleichgewichtsstörungen und der anschließend erforderlichen Schätzung bedingter Wahrscheinlichkeiten für den Absturz bei unterschiedlichen Gleichgewichtsstörungen abgesehen. Damit die mittlere Wirkung der verschiedenen Gleichgewichtsstörungen im Risikomodell ohne Verzerrung wiedergegeben werden kann, wird unterstellt, dass die bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(AVM1 = ja | \cdot, ZE11 = ja)$  den durch die Gleichungen (13) bis (16) beschriebenen Bedingungen entsprechend so geschätzt werden, dass die mittlere Wirkung der verschiedenen Gleichgewichtsstörungen auf das Absturzereignis AMV1 ohne Verzerrung wiedergegeben wird. Andererseits sind die in der Ausprägung „Monteur hat Gleichgewichtsstörungen = nein“ zusammengefassten Zustände hinsichtlich ihrer Wirkungen auf AMV1 gleich, da angenommen werden kann, dass ein Absturz von keinem der in dieser Klasse enthaltenen Zustände verursacht werden kann, die bedingte Absturzwahrscheinlichkeit damit für alle in dieser Klasse zusammengefassten Zustände gleich „0“ ist.

Die Zwischenergebnisse ZE12 bis ZE14 stellen die Ursachen für den Absturz bei der Montage eines folgenden Vertikalrahmens (AMVX) da. In den Klassen „ZE12 = ja“ und „ZE13 = ja“ werden alle Zustände abgebildet, in denen der Monteur bei Betreten bzw. beim anschließenden Begehen der Lage ein mehr oder weniger großes Unsicherheitsge-

fühl verspürt. Für die Klassierung dieser Zufallsvariablen gelten die gleichen Zusammenhänge, wie sie oben für ZE10 diskutiert wurden. Anders stellt sich die Situation für die Ursache „Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen“ (ZE14) dar. Da die Durchstiegsklappe nur die beiden Zustände „offen“ oder „geschlossen“ haben kann, werden diese Zustände mit den Ausprägungen „Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen = ja“ und „Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen = nein“ differenziert abgebildet, sodass die oben erörterte Problematik einer Zusammenfassung unterschiedlich wirksamer Zustände innerhalb einer Ausprägung nicht auftritt.

Die in der Ausprägung „ja“ zusammengefassten Zustände der Zwischenereignisse ZE15 (Monteur verliert sein Gleichgewicht bei Übergabe des Seitenschutzes) und ZE16 (Monteur verlässt den Belag zu Montagezwecken) erfüllen nicht die Bedingung der Wirkungsgleichheit, sodass auch für ZE15 und ZE16 die oben gemachten Aussagen zu ZE10 sinngemäß übernommen werden können. Das Zwischenereignis ZE16 beschreibt dabei eine Situation, in der ein zu kleiner Monteur für die erforderliche Überkopfmontage eines Belages der nächsten Lage z.B. auf eine Querstrebe eines Vertikalrahmens steigt, um den zu montierenden Belag einhängen und verankern zu können. Da er dafür den Belag, auf dem er sicher steht, verlassen muss, ist seine dann für die Montage eingenommene Position mit einer Absturzwahrscheinlichkeit verbunden, die in ihrer Höhe von der individuell eingenommenen Montageposition abhängt. Da die Ausprägung „Monteur verlässt den Belag zu Montagezwecken = ja“ alle denkbaren Montagepositionen umfasst, wird deutlich, dass die Wirkungsgleichheit der in dieser Ausprägung zusammengefassten Zustände nicht gegeben ist.

In der Tabelle 7 wird für alle Zufallsvariablen dargestellt, welche Zustände der Zufallsvariable jeweils in der mit „ja“ bezeichneten Ausprägung enthalten sind. Da die Zustände der Zufallsvariablen nur zwei verschiedenen Ausprägungen zugeordnet werden, sind damit die in der mit „nein“ bezeichneten Ausprägung enthaltenen Zustände ebenfalls definiert. Darüber hinaus wird dargestellt, ob die Annahme als erfüllt angesehen werden kann, dass die in einer Ausprägung zusammengefassten Zustände bezüglich jeder ihrer unmittelbaren Wirkungen auf andere bereits klassierte Zufallsvariablen des Modells gleich sind, siehe dazu die Spalte WG („Wirkungsgleichheit“).

Für alle mit WG=ja ausgewiesenen Zufallsvariablen wird angenommen, dass die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der direkt beeinflussten Zufallsvariablen für die jeweiligen Ausprägungen den bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die den Ausprägung zugeordneten Zustände entsprechen. Für die mit WG=nein gekennzeichneten Zufallsvariablen wird angenommen, dass die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der direkt beeinflussten Zufallsvariablen gemäß den Bedingungen (13) bis (16) geschätzt werden.

Zufallsvariable		In der Klasse „ja“ enthaltene Zustände	WG
ZE1	Es regnet	mehr oder weniger starke Regenfälle	nein
ZE2	Es herrschen ungünstige Wetterbedingungen	mehr oder weniger vereiste, schneebedeckte Beläge oder nicht näher spezifizierte heftige Regenfälle	nein
ZE3	Die natürliche Beleuchtung der Baustelle ist nicht optimal	mehr oder weniger große Abweichungen vom Zustand einer optimalen natürlichen Beleuchtung	ja
ZE4	Rutschgefahr ist vorhanden	durch Witterungseinflüsse verursachte mehr oder weniger große Abnahme der Bodenhaftung	nein
ZE5	Die Ausleuchtung der Baustelle ist unzureichend	Beleuchtungsstärke < 1000 lx	nein
ZE6	Der Monteur arbeitet bei Starkwind	Windstärke > 6 Bft.	nein

ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	Alkoholgehalt im Blut, der durch den täglichen Alkoholkonsum alkoholabhängiger männlicher Personen typischerweise erreicht wird	nein
ZE8	Der Belag wird von einer zu kleinen Person montiert	die Körpergröße Monteurs ist kleiner als 1,70 m, sodass er die Überkopfmontage eines Belages nur in einer mehr oder weniger unsicheren Montageposition oder Körperhaltung durchführen kann	ja
ZE9	Der Monteur ist nicht aufmerksam	mehr oder weniger großer, durch Ablenkung oder mangelnder Motivation verursachter, Verlust der Aufmerksamkeit	nein
ZE10	Der Monteur hat Gleichgewichtsstörungen	mehr oder weniger große temporäre Verluste des Gleichgewichtes	nein
ZE11	Der Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter	der Körperschwerpunkt des Monteurs liegt bei der Montage des ersten Vertikalrahmens mehr oder weniger deutlich oberhalb der Ebene der Durchstiegsöffnung	nein
ZE12	Der Monteur ist beim Betreten der Lage unsicher	mehr oder weniger intensive Gefühle von Unsicherheit bei Betreten der Lage	nein
ZE13	Der Monteur ist beim Begehen der Lage unsicher	mehr oder weniger intensive Gefühle von Unsicherheit bei Begehen der Lage	nein
ZE14	Der Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen	Durchstiegsklappe befindet sich in Position „offen“	ja
ZE15	Der Monteur verliert sein Gleichgewicht bei Übergabe des Seitenschutzes	mehr oder weniger intensiver Gleichgewichtsverlust bei Annahme des Seitenschutzes	nein
ZE16	Der Monteur verlässt den Belag zu Montagezwecken	der Monteur verlässt den Belag und nimmt eine unerwünschte Montageposition ein, die eine Überkopfmontage subjektiv erleichtert aber das Absturzrisiko erhöht	nein
RF1	Die Beläge sind vereist	mehr oder weniger dicke und durchgehende Eisschicht auf den Belägen	ja
RF2	Die Beläge sind schneebedeckt	mehr oder weniger dicke und durchgehende Schneeschiicht auf den Belägen	ja
RF3	Der Himmel ist bewölkt	mehr weniger aufgelockerte/ geschlossene Wolkendecke	nein
RF4	Die Montagetätigkeiten erfolgen nachts	nach Sonnenuntergang und vor Sonnenaufgang durchgeführte Arbeiten	ja
RF5	Auf der Baustelle herrscht Starkwind	Windstärke > 6 Bft.	ja
RF6	Der Monteur kommt alkoholisiert auf die Baustelle	der Monteur ist alkoholabhängig und hat daher auch tagsüber Alkohol im Blut	ja
RF7	Der Monteur hat nicht ausreichende Leistungsfähigkeit/ Ausdauer	der Monteur ist Berufsanfänger, d.h. erst weniger als 3 Monate im Beruf und ist daher der besonderen körperlichen Belastung noch nicht gewachsen	nein
RF8	Der Monteur hat mangelhafte Erfahrung/ Ausbildung	der Monteur hat nicht mindestens an einer Basisschulungsmaßnahme teilgenommen	nein
RF9	Der Monteur hat geringe Körpergröße	der Monteur ist kleiner als 1,70 m	ja
RF10	Der Monteur ist involviert in Rauferei, Streiche oder Streiterei	der Monteur ist mehr oder weniger intensiv beteiligt an Raufereien, Streichen oder Streitereien	nein
RF11	Der Monteur ist abgelenkt	der Monteur ist mehr oder weniger von seiner Montagetätigkeit abgelenkt	nein
RF12	Der Monteur ist nicht motiviert	der Monteur ist mehr oder weniger stark demotiviert	ja
BM1	Stahlböden werden als Belag verwendet	bei der Auswahl der verwendeten Beläge werden nur rutschfeste Stahlböden ausgewählt	ja
BM2	Rutschhemmende Sohlen werden verwendet	der Monteur entscheidet sich eigenständig dafür, bei der Montage rutschhemmendes Schuhwerk zu tragen	nein
BM3	Eine künstliche Beleuchtung wird bei Bedarf installiert	bei unzureichender natürlicher Ausleuchtung wird die Baustelle zusätzlich mit Scheinwerfern ausgeleuchtet	ja
BM4	Die Baustelle wird bei Starkwind geschlossen	die Arbeiten auf der Baustelle werden bei Windstärken > 6 Bft. sofort beendet	ja
BM5	Der Monteur zur Belagsmontage wird nach Größe ausgewählt	nur Monteure mit einer Körpergröße von mehr als 1,70 m werden zur Belagsmontage eingesetzt	ja
BM6	Es werden Alkoholtests durchgeführt	Alkoholtests werden durchgeführt und alkoholisierte Monteure werden von der Baustelle ausgeschlossen	ja

Tabelle 7: Klassenbildung und angenommene Wirkungsgleichheit (WG) der Zustände einer Klasse

## 2.4. Schätzung der Wahrscheinlichkeiten

Die Qualität der Schätzung der Wahrscheinlichkeiten durch die beteiligten Gerüstbauexperten für die zwei verschiedenen Ausprägungen einer jeden Zufallsvariable im Modell ist zunächst davon abhängig, ob die mit den beiden Ausprägungen abgebildeten Klassen von Zuständen klar definiert und voneinander abgegrenzt und für die Gerüstbauexperten transparent und nachvollziehbar sind. Sofern die Definitionen der Klassen unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten darüber zulassen, welche Zustände einer Klasse zugeordnet sind, hat dies unweigerliche Auswirkungen auf die geschätzten Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der darin enthaltenen Zustände.

Bei der Schätzung bedingter Wahrscheinlichkeiten für Ausprägungen von Einflussfaktoren, in denen unterschiedlich wirksame Zustände abgebildet werden, ist es darüber hinaus erforderlich, dass der Schätzung gemäß den vorhergehenden Erläuterungen eine Verteilungsannahme über die verschiedenen innerhalb der Klasse abgebildeten Zustände sowie eine Annahme über die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Auswirkungen für jeden dieser Zustände zugrunde gelegt wird. Da der Schätzprozesses durch die Gerüstbauexperten keine Offenlegung dieser Annahmen vorsieht, lässt sich nicht überprüfen, ob die vorgenommenen Schätzungen konsistent zu den getroffenen Annahmen sind.

Soweit möglich, sind den Wahrscheinlichkeitsschätzungen für die unabhängigen Risikofaktoren Häufigkeitsverteilungen aus geeigneten Statistiken zugrunde gelegt worden. Der Schätzung der Wahrscheinlichkeiten der Risikofaktoren RF1, RF2, RF3 und RF5 wurden verfügbare Wetterstatistiken zugrunde gelegt. Für die Risikofaktoren RF6, RF9 und RF12 wurden Bevölkerungsstatistiken ausgewertet und in geeigneter Weise auf die Gruppe der Monteure übertragen. Die Wahrscheinlichkeiten für die übrigen Risikofaktoren und für die Umsetzung der Bewältigungsmaßnahmen wurden subjektiv geschätzt. Alle Wahrscheinlichkeiten beziehen sich auf den Eintritt der in der Ausprägung „ja“ zusammengefassten Zustände zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Aufbaus des Gerüsts. Da derzeit keine Alkoholkontrollen durchgeführt werden, ist die Wahrscheinlichkeit für die Anwendung der Maßnahme BM6 mit „0“ bewertet worden. Die Tabelle 8 zeigt zunächst die geschätzten Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der unabhängigen Risikofaktoren und für die Anwendung der Bewältigungsmaßnahmen.

Zufallsvariablen (ZV)		p(ZV=ja)
RF1	Die Beläge sind vereist	0,005
RF2	Die Beläge sind schneebedeckt	0,077
RF3	Der Himmel ist bewölkt	0,067
RF4	Die Montagetätigkeiten erfolgen nachts	0,020
RF5	Auf der Baustelle herrscht Starkwind	0,013
RF6	Der Monteur kommt alkoholisiert auf die Baustelle	0,048
RF7	Der Monteur hat nicht ausreichende Leistungsfähigkeit/ Ausdauer	0,030
RF8	Der Monteur hat mangelhafte Erfahrung/ Ausbildung	0,250
RF9	Der Monteur hat geringe Körpergröße	0,118
RF10	Der Monteur ist involviert in Rauferei, Streiche oder Streiterei	0,001
RF11	Der Monteur ist abgelenkt	0,125
RF12	Der Monteur ist nicht motiviert	0,160
BM1	Stahlböden werden als Belag verwendet	0,850
BM2	Rutschhemmende Sohlen werden verwendet	0,990
BM3	Eine künstliche Beleuchtung wird bei Bedarf installiert	0,990
BM4	Die Baustelle wird bei Starkwind geschlossen	0,990
BM5	Der Monteur zur Belagsmontage wird nach Größe ausgewählt	0,970
BM6	Es werden Alkoholtests durchgeführt	0,000

Tabelle 8: Wahrscheinlichkeitsschätzungen für die Ausprägung „ja“ der unabhängigen Zufallsvariablen

Bevor die bedingten Wahrscheinlichkeiten für abhängige Zufallsvariablen des Modells geschätzt werden, ist zu klären, ob es Erkenntnisse über die Wirkungsmechanismen der jeweiligen Einflussfaktoren gibt. Wenn dies der Fall ist, lassen sich aus den Erkenntnissen über die Wirkungszusammenhänge auch Zusammenhänge zwischen den bedingten Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Ausprägungskombinationen dieser Einflussfaktoren ableiten.

Lässt sich jeder Ausprägung eines Einflussfaktors eine von anderen Einflussfaktoren unabhängige spezifische Wirkung auf die abhängige Zufallsvariable zuordnen und lässt sich die Gesamtwirkung der Einflussfaktoren aus den spezifischen Wirkungen jedes einzelnen Einflussfaktors durch eine deterministische Funktion berechnen, dann lassen sich die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ausprägungen der abhängigen Zufallsvariable für sämtliche Ausprägungskombinationen der Einflussfaktoren aus den zuvor bestimmten bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für den Eintritt der spezifischen Wirkungen ebenfalls über eine Funktion berechnen und brauchen von den Experten nicht geschätzt zu werden (vgl. Pearl, 1988, S.186-188).

Ein für dichotome Zufallsvariablen in praktischen Anwendungen häufig angenommener Wirkungsmechanismus wird durch die noisy-OR-Beziehung modelliert. Die der Ausprägung „ja“ eines Einflussfaktors zugeordnete spezifische Wirkung entspricht der gemeinsamen Wirkung derjenigen Ausprägungskombination, in der nur dieser Risikofaktor die Ausprägung „ja“ annimmt und alle anderen Risikofaktoren die Ausprägung „nein“ annehmen. Für die Ausprägung „nein“ des Einflussfaktors entspricht seine spezifische Wirkung der gemeinsamen Wirkung derjenigen Ausprägungskombination, in der alle Risikofaktoren die Ausprägung „nein“ annehmen.

Seien die dichotomen Einflussfaktoren  $A^1, \dots, A^n$  auf das dichotome Ereignis  $E$  in Form einer noisy-OR-Beziehung modelliert. Die geschätzten spezifischen Wirkungen eines jeden Einflussfaktors  $A^i$  auf das Ereignis  $E$  werden durch die Zufallsvariablen  $E^i$  abgebildet. Die Zufallsvariablen  $E^i$  haben die gleichen Ausprägungen wie die Zufallsvariable  $E$ . Die Wahrscheinlichkeiten  $p_i = p(E^i = ja | A^i = Ja)$  entsprechen den Wahrscheinlichkeiten  $p(E = ja | A^i = Ja \wedge A^j = nein) \forall j \neq i$ .

Sei  $I(A^i)$  eine Indikatorfunktion, die den Wert „1“ annimmt, wenn der Einflussfaktor  $A^i$  die Ausprägung „ja“ annimmt, ansonsten den Wert „0“. Der Mechanismus der spezifischen Wirkungen der  $E^i$  auf das Ereignis  $E$  kann durch die folgende deterministische OR-Funktion beschrieben werden:

$$e(E^1, \dots, E^n) = \begin{cases} "ja" & , \text{ wenn } E^1 = ja \vee \dots \vee E^n = ja \\ "nein" & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (17)$$

Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses  $E$  für eine beliebige Ausprägungskombination der Einflussfaktoren  $A^1, \dots, A^n$  berechnet sich dann aus den Wahrscheinlichkeiten  $p_i$  für den Eintritt der spezifischen Wirkungen als

$$p(E = Ja | A^1, \dots, A^n) = 1 - \prod_{i=1}^n 1 - I(A^i) \cdot p_i \quad (18)$$

Sofern für die spezifischen bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p_i = 1$  gilt, handelt es sich um eine deterministische OR-Beziehung, die als ein Spezialfall der noisy-OR-Beziehung

aufgefasst werden kann. In der Tabelle 9 werden die geschätzten spezifischen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für diejenigen Zufallsvariablen des Modells aufgeführt, deren Einflussfaktoren annahmegemäß einen Wirkungsmechanismus entsprechend der noisy-OR-Beziehung haben.

Abhängige Zufallsvariablen		Einflussfaktoren mit Wirkungsmechanismus „noisy-OR“		$p_i$
ZE1	Es regnet	RF3	Der Himmel ist bewölkt	0,814
ZE2	Es herrschen ungünstige Wetterbedingungen	RF1	Die Beläge sind vereist	1,000
		RF2	Die Beläge sind schneebedeckt	1,000
		ZE1	Es regnet	0,500
ZE3	Die natürliche Beleuchtung der Baustelle ist nicht optimal	RF3	Der Himmel ist bewölkt	1,000
		RF4	Die Montagetätigkeiten erfolgen nachts	1,000
ZE9	Der Monteur ist nicht aufmerksam	RF11	Der Monteur ist abgelenkt	1,000
		RF12	Der Monteur ist nicht motiviert	1,000
ZE10	Der Monteur hat Gleichgewichtsstörungen	ZE4	Rutschgefahr ist vorhanden	1,000
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	1,000
ZE11	Der Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter	RF8	Der Monteur hat mangelhafte Erfahrung/ Ausbildung	0,030
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	0,050
		ZE9	Der Monteur ist nicht aufmerksam	0,040
ZE12	Der Monteur ist beim Betreten der Lage unsicher	RF7	Der Monteur hat nicht ausreichende Leistungsfähigkeit/ Ausdauer	0,500
		RF8	Der Monteur hat mangelhafte Erfahrung/ Ausbildung	0,600
		ZE4	Rutschgefahr ist vorhanden	0,700
		ZE5	Die Ausleuchtung der Baustelle ist unzureichend	0,800
		ZE6	Der Monteur arbeitet bei Starkwind	0,900
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	0,950
		ZE9	Der Monteur ist nicht aufmerksam	0,650
ZE13	Der Monteur ist beim Begehen der Lage unsicher	RF10	Der Monteur ist involviert in Rauferei, Streiche oder Streiterei	1,000
		ZE4	Rutschgefahr ist vorhanden	0,900
		ZE5	Die Ausleuchtung der Baustelle ist unzureichend	0,600
		ZE6	Der Monteur arbeitet bei Starkwind	1,000
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	0,950
ZE14	Der Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen	RF8	Der Monteur hat mangelhafte Erfahrung/ Ausbildung	0,050
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	0,500
		ZE9	Der Monteur ist nicht aufmerksam	0,600
ZE15	Der Monteur verliert sein Gleichgewicht bei Übergabe des Seitenschutzes	RF7	Der Monteur hat nicht ausreichende Leistungsfähigkeit/ Ausdauer	0,500
		RF10	Der Monteur ist involviert in Rauferei, Streiche oder Streiterei	1,000
		RF11	Der Monteur ist abgelenkt	0,800
		ZE6	Der Monteur arbeitet bei Starkwind	0,900
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	0,800
ZE16	Der Monteur verlässt den Belag zu Montagezwecken	RF7	Der Monteur hat nicht ausreichende Leistungsfähigkeit/ Ausdauer	0,900
		ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	0,005
		ZE8	Der Belag wird von einer zu kleinen Person montiert	1,000
AMVX	Der Monteur stürzt bei der Montage eines folgenden Vertikalrahmens ab	ZE12	Der Monteur ist beim Betreten der Lage unsicher	0,008
		ZE13	Der Monteur ist beim Begehen der Lage unsicher	0,001
		ZE14	Der Monteur lässt die Durchstiegsklappe offen stehen	0,005
AMS	Der Monteur stürzt bei der Montage eines Seitenschutzes ab	ZE15	Der Monteur verliert sein Gleichgewicht bei Übergabe des Seitenschutzes	0,001
AMB	Der Monteur stürzt bei der Montage eines Belages ab	ZE16	Der Monteur verlässt den Belag zu Montagezwecken	0,003

Tabelle 9: Schätzungen der spezifischen bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten in noisy-OR Beziehungen

Für die übrigen abhängigen Zufallsvariablen des Modells wurde jeweils ein unspezifischer Wirkungsmechanismus angenommen, d.h. ein Wirkungsmechanismus, der die Spezifikation eines beliebigen Zusammenwirkens der Einflussfaktoren ermöglicht (Tabelle 10). Daher ist in diesen Fällen für jede Ausprägungskombination der Einflussfaktoren  $C^i$ , die durch die Werte der Indikatorfunktionen  $I_i = I(C^i)$  repräsentiert werden, die bedingte Wahrscheinlichkeit  $p(E = ja|C^1, \dots, C^n)$  dafür zu schätzen, dass die abhängige Zufallsvariable die Ausprägung „ja“ annimmt (Spalte „ $p(I)$ “). Wie man erkennt, sind dafür überwiegend deterministische Wirkungsmechanismen angenommen worden, sodass die Beziehungen in diesen Fällen auch als Definitionsbeziehungen der jeweiligen abhängigen Zufallsvariablen aufgefasst werden können (Kjærulff/Madsen, 2013, S. 157).

Abhängige Zufallsvariablen		Einflussfaktoren mit allgemeinem Wirkungsmechanismus		$I_1, \dots, I_n$	$p(I)$
ZE4	Rutschgefahr ist vorhanden	ZE2 BM1 BM2	Es herrschen ungünstige Wetterbedingungen Stahlböden werden als Belag verwendet Rutschhemmende Sohlen werden verwendet	1,1	0,000
				1,0	1,000
				1,0,1	0,300
				1,0,0	1,000
				0,1,1	0,000
				0,1,0	0,000
				0,0,1	0,000
0,0,0	0,000				
ZE5	Die Ausleuchtung der Baustelle ist unzureichend	ZE3 BM3	Die natürliche Beleuchtung der Baustelle ist nicht optimal Eine künstliche Beleuchtung wird bei Bedarf installiert	1,1	0,000
				1,0	1,000
				0,1	0,000
				0,0	0,000
ZE6	Der Monteur arbeitet bei Starkwind	RF5 BM4	Auf der Baustelle herrscht Starkwind Die Baustelle wird bei Starkwind geschlossen	1,1	0,000
				1,0	1,000
				0,1	0,000
				0,0	0,000
ZE7	Der Monteur ist bei Montagetätigkeiten alkoholisiert	RF6 BM6	Der Monteur kommt alkoholisiert auf die Baustelle Es werden Alkoholtests durchgeführt	1,1	0,000
				1,0	1,000
				0,1	0,000
				0,0	0,000
ZE8	Der Belag wird von einer zu kleinen Person montiert	RF9 BM5	Der Monteur hat geringe Körpergröße Der Monteur zur Belagsmontage wird nach Größe ausgewählt	1,1	0,000
				1,0	1,000
				0,1	0,000
				0,0	0,000
AMV1	Der Monteur stürzt bei der Montage des ersten Vertikalrahmens der Lage ab	ZE10 ZE11	Der Monteur hat Gleichgewichtsstörungen Der Monteur steht zu hoch auf der Durchstiegsleiter	1,1	0,001
				1,0	0,000
				0,1	0,000
				0,0	0,000

Tabelle 10: Schätzungen der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten für allgemeine Wirkungsbeziehungen

Da mit Hilfe dieses nun vollständig spezifizierten Bayes-Netzes die geschätzte gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der im Modell enthaltenen Zufallsvariablen unter den diskutierten Annahmen und Einschränkungen repräsentiert wird, können damit alle interessierenden a-priori- sowie a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten berechnet werden. Die Bewertung der zu Beginn dieser Arbeit aufgestellten Thesen ergibt sich dann durch einen Vergleich dieser Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Projektsituationen.

### 3. Analyse des Absturzrisikos und Bewertung der Thesen

#### 3.1 These „Die Länge eines Gerüsts erhöht das Absturzrisiko stärker als seine Höhe“

Die Länge und die Höhe des Gerüsts sind maßgebliche Einflussfaktoren für das Ereignis, beim Aufbau des Gerüsts abzustürzen. Je länger und je höher eine Gerüst ist, desto mehr Montagetätigkeiten müssen durchgeführt werden, und da bei jeder Montagetätigkeit die Möglichkeit eines Absturzes gegeben ist, nimmt die Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Länge und Höhe zu. Es ist jedoch nicht ohne eine nähere Analyse des Absturzrisikos möglich, die relative Bedeutung dieser beiden Einflussfaktoren abzuschätzen.

Die Einflussfaktoren „Länge“ und „Höhe“ werden daher, wie in Abschnitt 2.2 bereits erläutert, nicht explizit als Zufallsvariablen im Modell abgebildet sondern dadurch, dass die Ereignisse, bei einer bestimmten Montagetätigkeit abzustürzen, in der jeweiligen Anzahl der bei einer bestimmten Höhe und Länge des Gerüsts erforderlichen Durch-

fürungen dieser Tätigkeiten im Modell abgebildet werden. Der Zusammenhang zwischen den Ereignissen und dem Ereignis „Absturz vom längenorientierten Standgerüst“ (ALSG) wird im Modell dann durch eine deterministische OR-Beziehung abgebildet.

Zur Überprüfung der o.g. These wird ein Risikomodell für ein hohes Gerüst, bestehend aus einem Feld und drei Lagen ( $LSG_{1,3}$ ), und ein Risikomodell für ein langes Gerüst, bestehend aus drei Feldern und einer Lage ( $LSG_{3,1}$ ) erstellt. Für das hohe Gerüst müssen drei erste Vertikalrahmen, drei folgende Vertikalrahmen sowie jeweils drei Beläge und Seitenschutze montiert werden, während für das lange Gerüst zwei erste Vertikalrahmen weniger montiert werden müssen.

Das relative Risiko für einen Absturz vom hohen Gerüst zum Risiko für einen Absturz von einem langen Gerüst berechnet sich als Verhältnis der bedingten Wahrscheinlichkeiten  $p(ALSG = ja|LSG_{1,3})$  und  $p(ALSG = ja|LSG_{3,1})$  als

$$\frac{p(ALSG = ja|LSG_{1,3})}{p(ALSG = ja|LSG_{3,1})} = \frac{0,0093009}{0,0092940} = 1,00074 \quad (19)$$

Die Absturzrisiken unterscheiden sich für die beiden Gerüste nur äußerst geringfügig. Das Absturzrisiko im hohen Gerüst ist um 0,074% höher als im langen Gerüst. Da für das lange Gerüst zwei erste Vertikalrahmen weniger montiert werden, könnte die minimal geringere Absturzwahrscheinlichkeit allein auf den geringeren Umfang der durchzuführenden Montagetätigkeiten zurückzuführen sein, anstatt auf die unterschiedlichen Höhen und Längen der Gerüste.

Daher sollen in einer weiteren Betrachtung eine hohe und eine lange Gerüstvariante miteinander verglichen werden, für deren Aufbau die gleiche Anzahl an Montagetätigkeiten anfällt. Dies trifft z.B. für den Vergleich eines Gerüsts, bestehend aus einem Feld und vier Lagen (hohes Gerüst), mit einem Gerüst, bestehend aus fünf Feldern und einer Lage (langes Gerüst) zu. Für den Aufbau beider Gerüste sind insgesamt 16 Montagetätigkeiten erforderlich, die Struktur dieser Tätigkeiten ist jedoch unterschiedlich. Während im hohen Gerüst jede der vier verschiedenen Montagetätigkeiten jeweils viermal durchzuführen ist, ist im langen Gerüst nur ein erster Vertikalrahmen zu montieren, dafür müssen die übrigen drei Tätigkeiten jeweils fünfmal durchgeführt werden.

Das vom Modell berechnete relative Risiko für einen Absturz von diesen beiden Beispielgerüsten beträgt

$$\frac{p(ALSG = ja|LSG_{1,4})}{p(ALSG = ja|LSG_{5,1})} = \frac{0,012348}{0,015355} = 0,80417 \quad (20)$$

Schon für diese kleinen Gerüstvarianten gibt der Vergleich nun ein deutlicheres Bild von der unterschiedlichen Risikosituation. So ist das Absturzrisiko im hohen Gerüst ca. 20% geringer als im langen Gerüst. Dieser deutliche Unterschied ist somit offenbar auf die unterschiedliche Struktur der durchzuführenden Montagetätigkeiten zurückzuführen.

Eine Betrachtung der von der Gerüstvariante unabhängigen a-priori-Wahrscheinlichkeiten, bei einer dieser Montagetätigkeiten abzustürzen, zeigt das folgende Bild:

$$p(AMV1) = 0,000003532$$

$$p(AMVX) = 0,002963115$$

$$p(AMS) = 0,000151901$$

$$p(AMB) = 0,000009831$$

Auffällig ist der sehr deutliche Unterschied zwischen den Absturzwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Montagetätigkeiten. Das Risiko, bei der Montage eines folgenden Vertikalrahmens abzustürzen, ist um fast drei Zehnerpotenzen höher als das Risiko, bei der Montage des ersten Vertikalrahmens abzustürzen. Auch die Montage des Seitenschutzes birgt noch ein ca. vierzig Mal höheres Absturzrisiko. Bei diesen erheblichen Unterschieden in den tätigkeitsspezifischen Absturzrisiken wird verständlich, warum das Absturzrisiko stärker mit der Länge eines Gerüsts als mit seiner Höhe ansteigt:

Bei langen Gerüsten müssen gegenüber hohen Gerüsten mehr folgende Vertikalrahmen und weniger erste Vertikalrahmen montiert werden, deren spezifische Absturzrisiken sich um fast drei Zehnerpotenzen unterscheiden. Insofern kann die eingangs formulierte These durch die vorliegende Untersuchung nicht nur bestätigt sondern auch hinsichtlich der Ursachen erklärt werden.

### **3.2 These „Wechselnde Mitarbeiter erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines Absturzes“**

Mit den Risikofaktoren RF6-RF12 und der Bewältigungsmaßnahme BM2 wurden mehrere Einflussfaktoren auf das Absturzereignis identifiziert, die bestimmte Eigenschaften der handelnden Monteure repräsentieren. Darüber hinaus wurde mit den a-priori-Wahrscheinlichkeiten für die Ausprägung „ja“ dieser Einflussfaktoren eine Einschätzung darüber gegeben, inwieweit diese Mitarbeitereigenschaften in einem beliebigen Gerüstbauprojekt vorliegen. Zur Beurteilung der o.g. These ist nun zu analysieren, ob sich die Verteilung der Ausprägungen mitarbeiterbezogener Einflussfaktoren bei denjenigen Mitarbeitern, die bis zum Zeitpunkt des Mitarbeiterwechsels in einem absturzfremden Gerüstbauprojekt gearbeitet haben, von der Verteilung dieser Ausprägungen bei den ab diesem Zeitpunkt neu eingesetzten Mitarbeitern unterscheiden. Sofern die o.g. Mitarbeitereigenschaften nicht durch geeignete Tests festgestellt werden oder sich in sonstiger Weise offenbaren, gibt es keinen Grund, eine unterschiedliche Verteilung der Mitarbeitereigenschaften innerhalb der beiden Mitarbeitergruppen anzunehmen, was dafür sprechen würde, die These abzulehnen.

Bei dieser Überlegung übersieht man allerdings, dass zwar über die Wahrscheinlichkeit des Vorliegens der risikorelevanten Eigenschaften der neu eingesetzten Mitarbeiter keine anderen Informationen als die a-priori-Wahrscheinlichkeiten vorliegen, über die aus dem Projekt ausscheidenden Mitarbeiter hingegen schon. Denn die Erkenntnis, dass die ausscheidenden Mitarbeiter bis zu ihrem Ausscheiden aus dem Projekt absturzfremd gearbeitet haben, lässt sich als Ergebnis eines Tests der betreffenden Mitarbeitereigenschaften interpretieren. Der statistische Zusammenhang zwischen den betreffenden Mitarbeitereigenschaften und dem Testergebnis „Absturz vom längenorientierten Standgerüst = nein“ offenbart sich durch die Modellstruktur und dem darin abgebildeten statistischen Zusammenhang zwischen den Mitarbeitereigenschaften RF6 bis RF12 und BM2 und den tätigkeitsbezogenen Absturzereignissen AMV1, AMVX, AMS und AMB.

So lassen sich mit Hilfe dieser Abhängigkeiten die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für diese Mitbereitereigenschaften unter der Bedingung der bis zum Mitarbeiterwechsel absturzfrem durchgeführten Montagetätigkeiten mit den a-priori-Wahrscheinlichkeiten der Mitbereitereigenschaften bei den neu hinzukommenden Mitarbeitern vergleichen. Wie sich dabei zeigt, ist die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der absturzverursachenden Mitbereitereigenschaften bei den ausscheidenden Mitarbeitern geringer als die a-priori-Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen diese Eigenschaften bei den neu eingesetzten Mitarbeitern und zwar umso mehr, je mehr Montagetätigkeiten die ausscheidenden Mitarbeiter bis zum Zeitpunkt des Mitarbeiterwechsels absturzfrem durchgeführt haben. Die geringere a-posteriori-Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der absturzverursachenden Eigenschaften bei den ausscheidenden Mitarbeitern führt dann zu der Erkenntnis, dass die Wahrscheinlichkeit, bei den noch durchzuführenden Montagetätigkeiten abzustürzen, für die ausscheidenden Mitarbeiter geringer einzuschätzen ist als für die neu eingesetzten Mitarbeiter. Es muss hier allerdings einschränkend angemerkt werden, dass durch die im Modell nicht enthaltenen gemeinsamen Ursachen der Risikofaktoren deren Abhängigkeit voneinander nicht berücksichtigt werden konnte. Je nach Stärke und Richtung der Abhängigkeit würde diese die berechneten a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten beeinflussen ohne jedoch das qualitative Ergebnis der Analyse zu verändern.

Für ein beispielhaftes Gerüst, bestehend aus einem Feld und  $j$  Lagen, bezeichnen  $MV_{1,j}$ ,  $MVX_{1,j}$ ,  $MS_{1,j}$ ,  $MB_{1,j}$  die im Feld "1" in der  $j$ -ten Lage in der dargestellten Reihenfolge durchzuführenden Montagetätigkeiten. Es bezeichne  $k$  die  $k$ -te durchgeführte Montagetätigkeit. Für  $k=6$  ist dies die Tätigkeit  $MVX_{1,2}$ , also die Montage des folgenden Vertikalrahmens in der zweiten Lage. Bezeichne  $ALSG_k = \text{nein}$  das Ereignis, die ersten  $k$  Montagetätigkeiten absturzfrem durchgeführt zu haben. Die Wahrscheinlichkeiten  $p(RF6 = ja | ALSG_k = \text{nein})$ ,  $p(RF7 = ja | ALSG_k = \text{nein})$ ,  $p(RF8 = ja | ALSG_k = \text{nein})$  und  $p(BM2 = \text{nein} | ALSG_k = \text{nein})$  bezeichnen die Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der betreffenden risikoverursachenden Mitbereitereigenschaften unter der Bedingung, dass alle Montagetätigkeiten bis einschließlich der  $k$ -ten Tätigkeit absturzfrem durchgeführt wurden. In der Tabelle 11 ist die Entwicklung dieser Wahrscheinlichkeiten während des Baufortschritts bis einschließlich der achten Montagetätigkeit, also der Tätigkeit  $MB_{1,2}$  dargestellt. Für  $k=0$  werden die a-priori-Wahrscheinlichkeiten dargestellt. Man erkennt, dass die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für das Vorliegen der risikobehafteten Mitbereitereigenschaften mit dem absturzfrem Baufortschritt kontinuierlich abnehmen.

Baufortschritt	letzte durchgeführte Tätigkeit	$p(RF6 = ja   ALSG_k = \text{nein})$	$p(RF7 = ja   ALSG_k = \text{nein})$	$p(RF8 = ja   ALSG_k = \text{nein})$	$p(BM2 = \text{nein}   ALSG_k = \text{nein})$
$ALSG_0 = \text{nein}$	keine	0,048000000	0,030000000	0,250000000	0,010000000
$ALSG_1 = \text{nein}$	$MV_{1,1}$	0,047996948	0,030000000	0,249999650	0,009999946
$ALSG_2 = \text{nein}$	$MVX_{1,1}$	0,047708196	0,029923028	0,249306140	0,009985699
$ALSG_3 = \text{nein}$	$MS_{1,1}$	0,047671930	0,029910517	0,249306070	0,009985698
$ALSG_4 = \text{nein}$	$MB_{1,1}$	0,047671269	0,029902729	0,249306070	0,009985698
$ALSG_5 = \text{nein}$	$MV_{1,2}$	0,047668240	0,029902729	0,249305720	0,009985644
$ALSG_6 = \text{nein}$	$MVX_{1,2}$	0,047380787	0,029825965	0,248613670	0,009971443
$ALSG_7 = \text{nein}$	$MS_{1,2}$	0,047344740	0,029813485	0,248613540	0,009971441
$ALSG_8 = \text{nein}$	$MB_{1,2}$	0,047344082	0,029805722	0,248613530	0,009971441

Tabelle 11: A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten risikobehaftete Mitbereitereigenschaften bei absturzfrem Baufortschritt

Die Wahrscheinlichkeiten  $p(AMV1 = ja | ALSG_k = nein)$ ,  $p(AMVX = ja | ALSG_k = nein)$ ,  $p(AMS = ja | ALSG_k = nein)$  und  $p(AMB = ja | ALSG_k = nein)$  bezeichnen die korrespondierenden Wahrscheinlichkeiten für einen Absturz bei einer der nachfolgenden Montagetätigkeiten unter der Bedingung, dass alle Montagetätigkeiten bis einschließlich der  $k$ -ten Tätigkeit absturzfrei durchgeführt wurden. Die Tabelle 12 zeigt die mit dem absturzfremen Baufortschritt abnehmenden a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für einen Absturz bei einer der nachfolgenden Montagetätigkeiten. Für  $k=0$  sind die a-priori-Wahrscheinlichkeiten dargestellt.

Baufortschritt	letzte durchgeführte Tätigkeit	$p(AMV1 = ja   ALSG_k = nein)$	$p(AMVX = ja   ALSG_k = nein)$	$p(AMS = ja   ALSG_k = nein)$	$p(AMB = ja   ALSG_k = nein)$
$ALSG_0 = nein$	keine	0,000003532	0,002963115	0,000151901	0,000009831
$ALSG_1 = nein$	$MV_{1,1}$	0,000003529	0,002963094	0,000151899	0,000009831
$ALSG_2 = nein$	$MVX_{1,1}$	0,000003508	0,002947180	0,000151315	0,000009806
$ALSG_3 = nein$	$MS_{1,1}$	0,000003505	0,002946600	0,000151187	0,000009803
$ALSG_4 = nein$	$MB_{1,1}$	0,000003505	0,002946575	0,000151183	0,000009800
$ALSG_5 = nein$	$MV_{1,2}$	0,000003502	0,002946554	0,000151180	0,000009800
$ALSG_6 = nein$	$MVX_{1,2}$	0,000003481	0,002930683	0,000150599	0,000009775
$ALSG_7 = nein$	$MS_{1,2}$	0,000003478	0,002930105	0,000150471	0,000009771
$ALSG_8 = nein$	$MB_{1,2}$	0,000003478	0,002930081	0,000150467	0,000009768

Tabelle 12: A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für einen zukünftigen Absturz bei absturzfremem Baufortschritt

Man erkennt, dass die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für einen Absturz bei nachfolgenden Montagetätigkeiten kontinuierlich abnehmen, je weiter der absturzfrem Bau des Gerüsts fortschreitet. Die Abnahme der Absturzwahrscheinlichkeit wird bei zunehmendem Baufortschritt jedoch immer geringer, sodass die Absturzwahrscheinlichkeit asymptotisch gegen diejenige Absturzwahrscheinlichkeit konvergiert, die sich ergeben würde, wenn sich sämtliche Einflussfaktoren im gewünschten Zustand befänden. Dies ist der Zustand, der durch die Ausprägung „nein“ der Risikofaktoren bzw. „ja“ der Bewältigungsmaßnahmen repräsentiert wird.

Würde man nach absturzfrem Durchföhrung der ersten vier Montagetätigkeiten  $MV_{1,1}$ ,  $MVX_{1,1}$ ,  $MS_{1,1}$ ,  $MB_{1,1}$  die Wahrscheinlichkeit für einen Absturz bei den nächsten vier Montagetätigkeiten  $MV_{1,2}$ ,  $MVX_{1,2}$ ,  $MS_{1,2}$ ,  $MB_{1,2}$  unter der Bedingung bestimmen wollen, dass diese Tätigkeiten durch die gleichen Mitarbeiter ausgeföhrert werden, kann diese als Gegenwahrscheinlichkeit zu der Wahrscheinlichkeit einer absturzfremen Durchföhrung mit den a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten aus Tabelle 12 berechnet werden. Mit

$$\begin{aligned}
 q_4 &= (1 - p(AMV1 = ja | ALSG_4 = nein)) = (1 - 0,000003505) = 0,999996595, \\
 q_5 &= (1 - p(AMVX = ja | ALSG_5 = nein)) = (1 - 0,002946554) = 0,997053446, \\
 q_6 &= (1 - p(AMS = ja | ALSG_6 = nein)) = (1 - 0,000150599) = 0,999849401, \\
 q_7 &= (1 - p(AMB = ja | ALSG_7 = nein)) = (1 - 0,000009771) = 0,999990229
 \end{aligned}$$

berechnet sich diese als

$$1 - q_4 q_5 q_6 q_7 = 1 - 0,996890155 = 0,003109845. \quad (21)$$

Wenn hingegen die Mitarbeiter nach Durchführung der ersten vier Montagetätigkeiten durch neue Mitarbeiter ersetzt würden und von den neuen Mitarbeitern weder Informationen über ihre persönlichen Eigenschaften noch Informationen über ihre bisherige Leistung in anderen Gerüstbauprojekten vorlägen, dann müsste man zur Einschätzung ihrer Eigenschaften zunächst auf die a-priori-Wahrscheinlichkeiten für die persönlichen Eigenschaften zurückgreifen. Die Risikosituation entspricht der Situation zu Beginn des Gerüstbauprojekts, sodass nun die Wahrscheinlichkeiten für einen Absturz bei einer der ersten vier Montagetätigkeiten herangezogen werden können. Damit berechnet sich die Absturzwahrscheinlichkeit bei Einsatz neuer Mitarbeiter mit

$$\begin{aligned} q_0 &= (1 - p(AMV1 = ja | ALSG_0 = nein)) = (1 - 0,000003532) = 0,999996468, \\ q_1 &= (1 - p(AMVX = ja | ALSG_1 = nein)) = (1 - 0,002963094) = 0,997036906, \\ q_2 &= (1 - p(AMS = ja | ALSG_2 = nein)) = (1 - 0,000151315) = 0,999848685, \\ q_3 &= (1 - p(AMB = ja | ALSG_3 = nein)) = (1 - 0,000009803) = 0,999990197 \end{aligned}$$

als

$$1 - q_0 q_1 q_2 q_3 = 1 - 0,996872745 = 0,003127255. \quad (22)$$

Aufgrund der ungünstiger einzuschätzenden Eigenschaften der neuen Mitarbeiter erhöht sich damit die Wahrscheinlichkeit für einen Absturz bei Durchführung der nächsten vier Montagetätigkeiten nach einem Wechsel der Mitarbeiter um den Faktor  $0,003127255/0,003109845 = 1,0056$ , d.h. um 0,56%.

Unter diesen Gesichtspunkten ist demnach die These „Wechselnde Mitarbeiter erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines Absturzes“ anzunehmen. In der häufig in anderen Zusammenhängen zu hörenden Forderung „Never Change a Winning Team!“ kommt genau dieser statistische Zusammenhang zum Ausdruck.

### 3.3. These „Mit zunehmendem Baufortschritt verringert sich das Absturzrisiko“

Beim Aufbau eines Gerüsts mit einer Breite von  $n$  Feldern und einer Höhe von  $m$  Lagen treten die Risikoereignisse AMV1  $m$ -mal und die Risikoereignisse AMVX, AMS und AMB jeweils  $(m \cdot n)$ -mal auf. Die Wahrscheinlichkeit, beim Aufbau dieses Gerüsts abzustürzen, entspricht der Gegenwahrscheinlichkeit des Ereignisses, bei keiner dieser Tätigkeiten abzustürzen. Sofern die Ereignisse AMV1, AMVX, AMS und AMB unabhängig voneinander wären, ließe sich die Absturzwahrscheinlichkeit  $p(ALSG = ja)$  somit berechnen als

$$1 - p(AMV1 = nein)^m p(AMVX = nein)^{mn} p(AMB = nein)^{mn} p(AMS = nein)^{mn}. \quad (23)$$

Es ist trivial, dass mit zunehmendem Baufortschritt die Anzahl der bis zur Fertigstellung des Gerüsts noch erforderlichen Tätigkeiten abnimmt, sodass damit auch die Wahrscheinlichkeit, bei den noch ausstehenden Tätigkeiten abzustürzen, abnehmen muss. Wenn in der vorstehenden Formel die Exponenten die Anzahl der zu einem Zeitpunkt noch ausstehenden Tätigkeiten wiedergeben, ließe sich darüber die Absturzwahrscheinlichkeit für die ausstehenden Tätigkeiten berechnen. Da die Anzahl der ausstehenden Tätigkeiten und damit die Exponenten in der Formel abnehmen, wird die Wahrscheinlichkeit zunehmend geringer.

Wenn aber mit zunehmendem absturzfremem Baufortschritt  $k$ , wie oben bereits ausgeführt, auch die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten  $p(AMV1 = ja | ALSG_k = nein)$ ,  $p(AMVX = ja | ALSG_k = nein)$ ,  $p(AMS = ja | ALSG_k = nein)$  und  $p(AMB = ja | ALSG_k = nein)$  abnehmen, dann kommt zu dem trivialen Effekt der aufgrund einer abnehmenden Anzahl von Restarbeiten sinkenden Absturzwahrscheinlichkeit noch der Effekt kontinuierlich abnehmender a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für den Absturz bei einer dieser Restarbeiten hinzu.

Diese kontinuierliche Berücksichtigung der bei fortschreitendem Baufortschritt stetig neu hinzukommenden Informationen über weitere absturzfrem durchgeführte Montage-tätigkeiten zur Neuberechnung der a-posteriori-Wahrscheinlichkeit für einen Absturz bei den jeweiligen Restarbeiten bis zur Fertigstellung des Projekts wird bei der dargestellten Konstruktion des Bayes-Netzes durch den Inferenzmechanismus automatisch sichergestellt.

Damit kann auch die dritte These „Mit zunehmendem Baufortschritt verringert sich das Absturzrisiko“ mit Hilfe der Erkenntnisse aus dem Risikomodell bestätigt werden.

#### **4. Zusammenfassung**

Zur Überprüfung verschiedener Thesen über die relative Bedeutung von Einflussfaktoren auf die Absturzwahrscheinlichkeit im Gerüstbau wurde ein Risikomodell auf der Grundlage eines kausalen Bayes-Netzes entwickelt.

Mit Hilfe einer Analyse gemeinsamer Zwischenereignisse in den Ursache-Wirkungsketten konnte der gemeinsame Wirkungsmechanismus der Risikofaktoren identifiziert und in der Modellstruktur abgebildet werden. Somit konnten der Umfang der zu schätzenden Wahrscheinlichkeiten auf ein praktikables Maß begrenzt und die bedingten Unabhängigkeiten zwischen den modellierten Zufallsvariablen in der Modellstruktur abgebildet werden.

Die Problematik fehlender Modellvariablen wurde vom dem Hintergrund der daraus resultierenden Verzerrungen von a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten analysiert. Dabei wurden insb. die Möglichkeiten einer Eliminierung irrelevanter Zufallsvariablen aus dem Modell diskutiert.

Ein weiterer Schwerpunkt der Modellierung wurde auf die Definition und Abgrenzung der Ausprägungen der Zufallsvariablen gelegt. Es wurde ein systematisches Klassierungsverfahren diskutiert, mit dem die Anzahl der Ausprägungen der Zufallsvariablen eines Bayes-Netzes reduziert werden kann. Darüber hinaus wurde eine Ansatz vorgestellt, Einflussfaktoren mit vielen verschiedenen Zuständen nicht als Zufallsvariable mit entsprechend vielen Ausprägungen sondern durch Hinzufügen von gleichartigen Zufallsvariablen mit wenigen Ausprägungen in der Struktur des Bayes-Netzes abzubilden.

Mit dem resultierenden Bayes-Netz konnten die formulierten Thesen zur Absturzwahrscheinlichkeit im Gerüstbau in geeigneter Weise erörtert werden.

## Literatur

- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2004), *Arbeits- und Schutzgerüste - Teil 1: Schutzgerüste - Leistungsanforderungen, Entwurf, Konstruktion und Bemessung (4420-1:2004-3)*, Berlin: Beuth.
- Druzdzal, M., Suermondt, H. (1994), "Relevance in Probabilistic Models: Backyards in a Small World", in: *Working notes of the AAAI-1994 Fall Symposium Series: Relevance*, 60–63.
- Fenton, N. E., Neil, M. D. (2013), *Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks*, Boca Raton, Fla.: CRC Press/Chapman & Hall.
- Kjærulff, U. B., Madsen, A. L. (2013), *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*, (2. Aufl.), New York: Springer.
- Lin, Y., Druzdzal, M. J. (1997), "Computational Advantages of Relevance Reasoning in Bayesian Belief Networks", in: *Proceedings of the Thirteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-97)*, 342–350.
- Pearl, J. (1986), "Fusion, propagation, and structuring in belief networks", in: *Artificial Intelligence* 29 (3), 241–288.
- Pearl, J. (1988), *Probabilistic reasoning in intelligent systems. Networks of plausible inference*, San Mateo, Calif.: Morgan Kaufmann.
- Shachter, R. D. (1986), "Evaluating Influence Diagrams", in: *Operations Research* 34 (6), 871–882.