

# Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 75

**bast**

# Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen

von

Edmund Krauter  
Christine Kumerics  
Johannes Feuerbach  
Manuel Lauterbach

Forschungsstelle Rutschungen e.V. Mainz  
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 75**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
 B - Brücken- und Ingenieurbau  
 F - Fahrzeugtechnik  
 M - Mensch und Sicherheit  
 S - Straßenbau  
 V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.238/2009/AP:**  
 Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen

**Projektbetreuung**  
 Michael Bürger

**Herausgeber**  
 Bundesanstalt für Straßenwesen  
 Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
 Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
 Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
 Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
 Wirtschaftsverlag NW  
 Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
 Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
 Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
 Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
 Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
 Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
 ISBN 978-3-86918-197-4

Bergisch Gladbach, März 2012

## Kurzfassung – Abstract

### Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen

Vor dem Hintergrund der erwarteten zukünftigen Klimaentwicklung mit veränderten Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen wird das Gefährdungspotenzial für Schutzgüter durch Böschungsrutschungen möglicherweise ansteigen. Für den Neu- und Ausbau von Bundesfernstraßen und für die Unterhaltung des bestehenden Straßennetzes können sich hieraus zwangsläufig höhere Risiken ergeben. Daher soll eine geeignete Methodik zur Abschätzung des zukünftigen Gefährdungspotenzials durch Rutschungen entwickelt und diese an Fallbeispielen angewendet werden.

Anhand einer exemplarischen Auswahl von drei regionaltypischen Fallbeispielen, der Altmündener Wand (Süd-niedersachsen), dem Rutschhang Pünderich (Moseltal) und dem Wißberg (Rhein-hessen), wurde eine Bewertung der dort bereits eingetretenen Rutschereignisse im besonderen Hinblick auf klimatologische Einflussgrößen durchgeführt. Die Rutschereignisse wurden mit gemessenen Niederschlags- und Temperaturdaten (Beobachtungsdaten) des Deutschen Wetterdienstes korreliert, wobei sowohl der Rutschungszeitpunkt als auch der Zeitraum vor einem Rutschereignis berücksichtigt wurden.

Zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung in den drei Regionen und der damit möglicherweise verbundenen Zunahme von Rutschungen wurden simulierte Klimaparameter aus dem regionalen Klimamodell REMO (Szenario A1B) verwendet. Dabei wurden die Parameter Niederschlag, Starkniederschlagsereignis und Frost ausgewählt, die sich bereits bei der Analyse mittels der Beobachtungsdaten als rutschungsrelevant herausgestellt haben.

Es erfolgte eine Korrelation der Beobachtungsdaten mit den Klimamodell-daten für heutiges Klima (Kontrolllauf). Mittels des Vergleiches der Kontrolllauf-daten mit den entsprechenden Klimamodell-daten für zukünftiges Klima (Szenariolauf) wurde eine erste Trendbetrachtung der zukünftigen Klimaentwicklung innerhalb der drei Untersuchungsgebiete vorgenommen.

In allen drei Untersuchungsgebieten ist der Trend in Bezug auf die Klimaänderung gleich, allerdings ist die Varianz bei den einzelnen Klimaparametern unterschiedlich. Die Sommerhalbjahre sind zum einen durch die generelle Abnahme der Niederschlagsmen-

ge und zum anderen durch die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen gekennzeichnet. In den Winterhalbjahren werden die Niederschlagsmenge und vor allem die Starkniederschlagsereignisse zunehmen. Hinzu kommt die deutliche Abnahme sowohl der einzelnen Frosttage als auch der Frostperioden.

Diese klimatische Entwicklung wird sich auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Rutschungen dahingehend auswirken, dass bei Lockergesteinsböschungen mit einer Zunahme von oberflächennahen Rutschungen, Schlamm- und Schuttströmen im Sommerhalbjahr und einem Anstieg des Rutschungsrisikos gegen Ende des Winterhalbjahres zu rechnen ist. Bei Festgesteinsböschungen werden zunehmende Verwitterungs- und Erosionsprozesse zu einer erhöhten Rutschungshäufigkeit führen.

Da sich klimatische Veränderungen regional zeitlich verzögert einstellen werden, wurden eine empirisch-statistische Einschätzung und eine Ausweisung regionaler Gefährdungsbereiche in Hinblick auf zeitabhängige Eintrittswahrscheinlichkeiten von Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes vorgenommen. Dies erfolgte mittels eines grafischen klimatingeologieologischen Modellansatzes für jedes Fallbeispiel. Dabei wurden die Klimaparameter aus dem Klimamodell mit dem rutschungsrelevanten ingenieurgeologischen Parameter Böschungsneigung verschnitten und korreliert, was mit Hilfe des jeweiligen digitalen Geländemodells realisiert wurde. Zusätzlich wurden das digitale Bundesfernstraßennetz und ein digitales Punktekataster von Rutschereignissen in das Modell integriert.

Für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials wurden die Daten aus der Kontrolllauf-Zeitperiode 1971-2000 mit den Daten der Szenariolauf-Zeitperiode 2011-2100 korreliert. Die entsprechenden prozentualen Abweichungen für jeden einzelnen Parameter wurden in Bezug auf ihre Relevanz für das Auslösen von Rutschungen zum einen jahreszeitlich und zum anderen über das Jahr betrachtet und bewertet, wobei auch die Gewichtung aus ingenieurgeologischer Sicht berücksichtigt wurde.

Im Ergebnis ist in allen drei Modellgebieten tendenziell im Sommerhalbjahr zwischen 2011 und 2080 und im Winterhalbjahr ab der zweiten Jahrhunderthälfte mit einem erhöhten Rutschungsrisiko zu rechnen.

Durch die Korrelation der Klimaparameter mit der Böschungsneigung kann das zukünftige Gefährdungspotenzial durch Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes in einem ersten Schritt zeitabhängig eingestuft und somit abgeschätzt werden. Durch

die Weiterentwicklung des Modells könnte so eine bundesweite Risikokarte generiert werden.

### **Risk assessment of landslides by the increase of extreme weather events**

Against the background of predicted climate change, with modified temperature and precipitation conditions, a future increase in the hazard potential for protective goods by landslides and embankment failures cannot be excluded. This will inevitably lead to higher risks for the new construction and upgrading of federal roads as well as for the maintenance of the existing road system.

Based on three typical case studies, Altmündener Wand (southern Lower Saxony), Pünderich and Wissberg (Rhineland Palatinate), the causes of landslides have been studied and assessed with special emphasis on the climatic factors and their effects. The damaging events, respectively the embankment failures recorded in the case study areas were correlated with the precipitation and temperature data of the German Meteorological Service and relationships were identified. In this analysis both the moment of the event itself as well as the time before it were considered.

For estimating the degree of a possible future change of climate within the three regions that might result in an increase of landsliding events, climate parameters of the REMO regional climate model were made use of. From scenario A1B precipitation, heavy rainfall events and temperature, respectively freezing temperatures, were selected, as these parameters had already been shown to be landslide-relevant during analysis of the observation data.

By comparing the parameter figures of the scenario run with the corresponding control run, a first trend analysis was made with respect to the future climate change in the regions of each of the case studies.

The trend is the same in all three study areas, but there are differences in variance of the climate parameters. The amount of precipitation during the summer half year will decrease, but the days with intense rainfall will increase. The winter half years will be influenced by the increase of precipitation and especially by the significantly increase of days with intense rainfall. Also the significantly decrease of the period of frost and the freezing days will be characteristic for the winter.

This climatic development will have the effects on the probability of occurrence and the amount of damage

of landsliding events that in case of slopes and embankments in unconsolidated rocks and embankments the near-surface landslides, mud and debris flows will increase over the summer half year. Also the landsliding frequency towards the end of the winter half year will increase. In case of bedrock slopes and embankments weathering and erosion processes in the winter half year will speed up.

The climatic factors affecting the stability will react with a regionally different time lag. Therefore it was attempted to achieve the identification of regional risk areas with respect to time-dependent probabilities of occurrence of damaging events along the federal roads system.

The assessment is made by means of a graphic climatic and engineering-geological model approach, with which risk classes of time-dependent landslide susceptibility along the federal roads system are empirically and statistically determined. The climate parameters of the climate model were linked and correlated with the landslide-relevant engineering-geological parameter of angle of slope. The digital elevation model of each model area in which the graphic presentation of the future climatic development and also of the different angles of slope were included, represents the basis. Additional a digital spot register of damaging events and the digitally presented federal roads system were included into the model.

For assessing the hazard potential the data of the control run period 1971-2000 were correlated with the data of the scenario run period 2011-2100. In the next step the interaction of the various parameters has to be considered and evaluated. To that end the climate parameters were grouped by seasons (summer and winter half year) as well as for the whole year, evaluated and ranked by their hazard potential, while considering both the percentage deviations as well as the weighting from the engineering-geological perspective.

In all three case studies the hazard potential over the summer half year will be very high between 2011 and 2080. Considering the winter half year the hazard potential will be very high from the second half of the century.

In a first step, the future hazard potential of landslides along the federal highways network can be time-dependently classified and therefore assessed by the correlation of climate parameters with the angle of slope. Thus, a nationwide landslide hazard map, in which further parameters should be included, could be developed.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	7	7.3.5	Sicherungsmaßnahmen .....	22
<b>2</b>	<b>Rutschungen</b> .....	7	7.3.6	Beobachtungsmethode und der Bezug zum Klima .....	23
<b>3</b>	<b>Ursachen von Rutschungen</b> .....	7	<b>8</b>	<b>Weitere Fallbeispiele</b> .....	23
<b>4</b>	<b>Forschungsvorhaben</b> .....	9	8.1	Böschungsrutschung bei Scheden ...	24
<b>5</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	9	8.2	Großschollenrutschung Wildenberger Hang .....	25
<b>6</b>	<b>Methodische Vorgehensweise</b> .....	10	8.3	Rutschung Nieder-Gemünden .....	27
<b>7</b>	<b>Regionaltypische Fallbeispiele</b> .....	10	8.4	Rutschung Lißberg-Hirzenhain .....	27
7.1	Fallbeispiel: Altmündener Wand/ Oberwesergebiet .....	11	<b>9</b>	<b>Korrelation Rutschereignisse mit Wetterdaten</b> .....	27
7.1.1	Lokation .....	11	<b>10</b>	<b>Regionales Klimamodell REMO</b> ...	31
7.1.2	Geologie .....	11	<b>11</b>	<b>Anwendung der modellierten Klimadaten</b> .....	32
7.1.3	Morphologie und Vegetation .....	12	<b>12</b>	<b>Verwendete Klimaparameter</b> .....	32
7.1.4	Chronologie beobachteter Rutschungen mit Schadensbild .....	12	<b>13</b>	<b>Korrelation von Beobachtungs- und Modelldaten</b> .....	33
7.1.5	Sicherungsmaßnahmen .....	13	<b>14</b>	<b>Klimaänderung – regionaler Vergleich</b> .....	36
7.1.6	Beobachtungsmethode und der Bezug zum Klima .....	14	<b>15</b>	<b>Auswirkungen der potenziellen Klimaänderung auf Rutschungen</b> ..	38
7.2	Fallbeispiel: Pünderich/Moseltal .....	14	<b>16</b>	<b>Modellentwicklung zur Gefähr- dungsabschätzung</b> .....	39
7.2.1	Lokation .....	14	16.1	Modellgebiete .....	39
7.2.2	Geologie .....	15	16.1.1	Klimatisches Modell .....	40
7.2.3	Morphologie und Vegetation .....	15	16.1.2	Ingenieurgeologisches Modell .....	40
7.2.4	Chronologie beobachteter Rutschungen mit Schadensbild .....	15	<b>17</b>	<b>Auswertung der Modell- parameter</b> .....	42
7.2.5	Sicherungsmaßnahmen .....	16	17.1	Auswertung der einzelnen Klimaparameter .....	42
7.2.6	Beobachtungsmethode und der Bezug zum Klima .....	17	17.2	Auswertung des ingenieur- geologischen Parameters .....	43
7.3	Fallbeispiel: Wißberg/Rheinhausen ...	19			
7.3.1	Lokation .....	19			
7.3.2	Geologie .....	20			
7.3.3	Morphologie und Vegetation .....	20			
7.3.4	Chronologie beobachteter Rutschungen mit Schadensbild .....	21			

---

<b>18</b>	<b>Auswertung der Fallbeispiele</b> . . . . .	44	In der forschungsbegleitenden Betreuergruppe haben mitgewirkt:
18.1	Abschätzung des Gefährdungspotenzials . . . . .	46	Dr. Udo Tegethof, Bundesanstalt für Straßenwesen (S3)
18.1.1	Jahreszeitliche Betrachtung . . . . .	46	
18.1.2	Ganzjährige Betrachtung . . . . .	51	Dipl.-Geol. Michael Bürger, Bundesanstalt für Straßenwesen (S2)
<b>19</b>	<b>Kontroll- und Frühwarnsystem zur Überwachung von Böschungsbewegungen</b> . . . . .	52	Rosemarie Glenz, Bundesanstalt für Straßenwesen (Z5)
<b>20</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	53	Dr. Yvonne Binard-Kühnel, Amt für Straßen- und Verkehrswesen, Frankfurt
<b>21</b>	<b>Ausblick</b> . . . . .	55	Dr. Martin Brodbeck, Regierungspräsidium Stuttgart
	<b>Verzeichnis der Anlagen</b> . . . . .	55	Dr. Andreas Gidde, Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, Hannover
	<b>Literatur</b> . . . . .	57	Dr. Susanne Pfeiffer, Climate Service Center, Helmholtz-Zentrum Geesthach

## 1 Einführung

Rutschungen nehmen weltweit infolge der globalen Klimaänderung bei gleichzeitig fortschreitendem Ausbau der Infrastruktur dramatisch zu. So zählen Massenbewegungen wie Erdrutsche, Fels- und Bergstürze neben Überschwemmungen, Erdbeben und Vulkanausbrüchen zu den weltweit größten Naturkatastrophen (BERZ, 2004). Die volkswirtschaftlichen Schäden haben sich in den letzten Jahren drastisch erhöht.

Auch in Deutschland verursachen Rutschungen erhebliche wirtschaftliche Schäden an Straßen, Gebäuden und anderen Infrastrukturen. Die Entwicklung neuer Methoden zur Risikoeinschätzung und letztendlich zur Schadensverhütung wird dadurch immer dringlicher.

## 2 Rutschungen

Rutschungen sind Verlagerungen von Locker- und Festgesteinen aus einer höheren in eine tiefere Lage infolge der Schwerkrafteinwirkung (KRAUTER, 2001). Diese Definition beinhaltet, dass der Begriff der Rutschung sich nicht nur auf Massenschwerebewegungen (Denudation) bezieht, sondern auch auf Massentransporte (Erosion), sofern sie abwärts gerichtet sind. Dabei sind die Ursachen von Rutschungen immer auf Veränderungen des Böschungsgleichgewichts (Verhältnis von rückhaltenden und treibenden Kräften) zurückzuführen. Bestimmende Faktoren sind Geologie, Witterung, Relief und Exposition. Natürliche Böschungen, auch als Hänge bezeichnet, sind geneigte Geländeflächen, die durch endogene und exogene geodynamische Prozesse entstanden sind (KRAUTER, 2001). Dazu zählen auch Uferböschungen an fließenden und stehenden Gewässern. Sind geneigte Geländeflächen durch menschliche Eingriffe hergestellt, werden sie als Böschungen oder künstliche Böschungen bezeichnet. Die Begriffe natürliche Böschungen und Böschungen werden im allgemeinen Sprachgebrauch synonym verwendet. Der Ausdruck Böschungen im weiteren Sinne schließt die anderen Bezeichnungen mit ein (KRAUTER, 2001). Daher wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens generell der Begriff Böschungen verwendet. Aus geologischer Sicht ist keine Böschung auf Dauer stabil, sodass durch die Einwirkung von Schwerkraft und exogenen Faktoren verschiedene Bewegungsabläufe entstehen.

Dabei handelt es sich um langsame Bewegungen wie beispielsweise Bodenfließen und Kriechen oder schnelle Bewegungen wie Felsstürze und Schlammströme.

Nach der Art ihrer Bewegung können Rutschungen in verschiedene Typen (Fallen, Kippen, Gleiten, Driften und Fließen) unterteilt werden (Multilingual Landslide Glossary, 1993).

## 3 Ursachen von Rutschungen

Die Ursachen von Rutschungen sind Veränderungen des Gleichgewichts zwischen rückhaltenden und treibenden Kräften in der Böschung durch permanent oder episodisch wirkende Faktoren. Es wirken immer mehrere Faktoren gleichzeitig, die sich gegenseitig beeinflussen und so Beschleunigungen oder Verzögerungen hervorrufen. Wird das Auslösen oder Beschleunigen von Massenschwerebewegungen (Rutschungen i. e. S.) von einem Faktor bestimmt, der aus der Summe der Ursachen klar abgrenzbar ist und in einem engen zeitlichen Bezug zu dem Ereignis steht, spricht man vom auslösenden Moment (KRAUTER, 2001). Die Auslösung beeinflusst also nicht das Geschehen einer Massenbewegung, sondern entscheidet nur den Zeitpunkt.

### Geologie

Der Faktor Geologie stellt in der Regel die Primärursache der Massenbewegungen dar. Dabei spielen die Petrographie des anstehenden Gesteins und das Trennflächengefüge eine große Rolle. Gerade die Ausbildung und Raumstellung des Trennflächengefüges, hauptsächlich der Schicht-, Schieferungs- und Kluffflächen, sind ein Faktor, der die Stabilität von Böschungen stark beeinflusst (KRAUTER, 2001). Auch Diskontinuitäten und tektonische Verwerfungen bestimmen entscheidend die Ursachen.

Ebenfalls können Veränderungen in der Korngröße und Tonmineralogie eine Ursache sein, da diese die Scherfestigkeit stark beeinflussen. So sind gerade tonigschluffige Schichten durch ihre niedrigen Scherparameter sehr rutschungsanfällig (PRINZ, 1997).

### Morphologie

Als morphologische Ursachen kommen Talvertiefung und Übersteilung der Böschungen bzw. Ufer-

unterschneidungen durch natürliche Erosion, tektonische (gebirgsbildende) Bewegungen und menschliche Eingriffe wie z. B. Baumaßnahmen in Betracht. Für die Stabilität einer Böschung unter morphologischen Gesichtspunkten sind das Relief oberhalb der Böschung, die Neigung und die Exposition entscheidend. So wirkt die Verwitterung an in bestimmte Himmelsrichtungen exponierten Böschungen intensiver und schafft damit die Grundlage für Erosion und Denudation.

### Klima

Die klimatischen Einflussgrößen wirken sich sowohl periodisch (Frost im Winter, Schneeschmelze im Frühling) und episodisch (Starkniederschlag, extreme Trockenheit) als auch permanent in Form von Verwitterung und Erosion auf Rutschereignisse aus.

Vor allem durch die Verwitterung machen sich die Einflüsse des Klimas bemerkbar. Klimatelemente wie Temperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte und auch Wind sowie Relief mit Exposition und Neigung, geografische Breite, Höhenlage und Vegetation spielen dabei eine wichtige Rolle (LAUTERBACH, 1999). Das Zusammenspiel dieser Größen führt zu Spannungsumlagerungen, die im Lockergestein eine Auflockerung des Korngefüges und Rissbildung bewirken können und im Festgestein vor allem die Klüftigkeit erhöhen, wodurch die Scherfestigkeit des Gebirges herabgesetzt wird. Diese Vorgänge gehen auch mit einer Volumenvergrößerung einher (KRAUTER, 2001). Auch zwischen Niederschlägen und Rutschungshäufigkeit lässt sich oft zeitlich verschoben ein direkter Zusammenhang ableiten.

### Wasser

Das Wasser in Form von Niederschlägen, Schmelzwasser und Bergwasser ist meist das auslösende Moment von Böschungsbewegungen und steuert deren Geschwindigkeit (KRAUTER, 1996). Zu den hydrologischen Einflussgrößen zählen im Einzelnen die Menge und Verteilung der Niederschläge, Grundwasserverhältnisse, Größe des ober- und unterirdischen Grundwassereinzugsgebietes, die Feldkapazität der Böden, die Evapotranspiration, Stauhorizonte im Untergrund, wasserführende Schichthorizonte, Nassstellen und Quellen, permanente Wasserverluste aus Leitungen, Behältern oder Kanälen und auch Spülwasserverluste beim Bohren, Überschwemmungen und Auftriebswirkung im Böschungsbereich (PRINZ, 1997).

Die Wirkung des Wassers im Boden ist sehr vielfältig. Bindiger Böschungsschutt an steilen Böschungen ( $> 35^\circ$ ) kann allein durch den Lastzuwachs infolge Wassersättigung durch das Sickerwasser in Bewegung geraten (PRINZ, 1997). Bei Beanspruchung und Durchnässung quellen Tone und Tonsteine mit quellfähigen Tonmineralen, wodurch eine Gefügelockerung und Plastifizierung eintreten. Mit zunehmender Wassersättigung verändert sich die Konsistenz eines bindigen Bodens. Die Scherfestigkeit nimmt durch Minderung der Kohäsion ab. In feinkörnigen Böden kann ein erhöhter Porenwasserdruck oder Strömungsdruck auftreten, wodurch die Scherfestigkeit ebenfalls abgemindert bzw. die abschiebenden Kräfte verstärkt werden können (PRINZ, 1997). Das Gleiche gilt für den Kluftwasser- bzw. Strömungsdruck in geklüftetem Festgestein (KRAUTER & KÖSTER, 1991). Auf vorgegebenen potenziellen Gleitflächen kann schon ein dünner Wasserfilm die Scherfestigkeit herabsetzen (PRINZ, 1997). In klüftigem Fels schwemmt das Wasser feine Bodenteilchen ein, die sich ablagern und bei Anstieg des Bergwasserstandes als Schmierfilm wirken.

Je nach den Grundwasserverhältnissen können auch vorausgegangene Niederschläge um Wochen oder Monate verzögert beschleunigte Böschungsbewegungen bewirken. Bei einer Wechselfolge von gut durchlässigen und weniger gut durchlässigen Schichten können mehrere Grundwasserstockwerke entstehen. Die Wasseraustritte (Quellen) in der Böschung befinden sich dann jeweils an der Grenzfläche zur stauenden Schicht. Die Durchfeuchtung dieser Schicht führt häufig zu Rutschungen, die sich zu Serienrutschungen weiterentwickeln können (KRAUTER, 2001).

### Fauna und Flora

Ein- und Auswirkungen von Tieren und Pflanzen spielen im Vergleich zu den anderen Faktoren nur eine untergeordnete Rolle, sie sind dennoch nicht außer Betracht zu lassen.

Die Vegetation wirkt auf die Böschungsbewegungen durch die Beeinflussung des Wasserhaushaltes ein. In der Vegetationsperiode gelangen Niederschläge verzögert in den Untergrund. Zudem wird dem Untergrund in der Vegetationsperiode durch die Evapotranspiration erheblich weniger Wasser zugeführt.

Der Wurzeldruck der Pflanzen bewirkt einerseits eine Auflockerung des Gesteins, die Wurzeln sind

aber andererseits mit einer Bewehrung vergleichbar und halten das Gestein mechanisch zusammen. Wird die Vegetation durch Rodung oder Überweidung beseitigt, können Rutschungen verursacht, beschleunigt oder reaktiviert werden.

Durch Grabgänge von Tieren dringt verstärkt Oberflächenwasser in den Boden ein, wodurch oberflächennahe Rutschungen entstehen können (KRAUTER, 2001). Das Abweiden von Böschungen oder das Ansammeln von Wasser in Viehgängen können auch Bewegungen auslösen (LAUTERBACH, 1999).

### **Menschliche Eingriffe**

Menschliche Eingriffe führen häufig zu schwerwiegenden Veränderungen des Böschungsgleichgewichts. Besonders Baumaßnahmen wie Abgraben des Böschungsfußes, Versteilung von Böschungen, Belastung einer Böschung mit Dämmen oder Gebäuden und auch Entlastung des Böschungsfußes durch Auftrieb können zu Böschungsbewegungen führen (PRINZ, 1997).

Abgrabungen bedeuten immer ein Anwachsen der Höhe und ggf. auch der Neigung einer Böschung bei gleichzeitiger Entlastung der verbleibenden Schichten. Beides wirkt sich ungünstig auf das Böschungsgleichgewicht aus. Durch die Versteilung nehmen die Schubspannungen zu, während durch die Entlastungswirkung besonders auf vorgegebenen Flächen die Scherfestigkeit abnehmen kann (PRINZ, 1997).

Aber auch andere menschliche Eingriffe wie das Roden einer Böschung können sowohl den Wasserhaushalt verändern als auch Bodenerosion auslösen. Auch der Aufstau von Oberflächen- und Grundwasser durch Rückhaltebecken oder Stauanlagen jeglicher Art, Wasserverluste aus defekten oder gebrochenen Kanälen und Leitungen, Spülwasserverluste beim Bohren, Injektionsdrücke und sogar die durch Schlagbohrungen ausgelösten Wellenbewegungen der Grundwasseroberfläche können in labilen Hängen Bewegungen auslösen (PRINZ, 1997). Ebenso erzeugen künstliche Erschütterungen wie Sprengungen oder durch Maschinen hervorgerufene Vibrationen vorübergehende Spannungsänderungen im Untergrund, die Bewegungen auslösen können.

## **4 Forschungsvorhaben**

Vor dem Hintergrund der zukünftigen Klimaentwicklung und vorliegender simulierter Klimadaten mit geänderten Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen wird das Gefährdungspotenzial für Schutzgüter durch Böschungsrutschungen möglicherweise künftig ansteigen. Bei der Abschätzung des Gefährdungspotenzials werden Ausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter unerwünschter Ereignisse (= Gefahrenpotenzial) sowie die Auftreffwahrscheinlichkeit von Boden bzw. Felsmassen auf ein bestimmtes Objekt berücksichtigt. Für den Neu- und Ausbau von Bundesfernstraßen und für die Unterhaltung des bestehenden Straßennetzes können sich hieraus zwangsläufig höhere Risiken ergeben. Rutschungen können Straßensperrungen erforderlich machen und zur Zerstörung von Straßen und ihren Einbauten führen, was Unterbrechungen im Straßennetz mit sich bringt. Für eine zukünftige bundesweite Risikoeinschätzung in Hinblick auf das Bundesfernstraßennetz sollen vorhandene Daten von Schadensereignissen (alle gravitativen Massenbewegungen) unter Berücksichtigung der erwarteten Klimaänderungen auf der Grundlage von modellierten Klimadaten interpretiert werden. Dabei sind regionale Unterschiede und zeitabhängige Eintrittswahrscheinlichkeiten von Schadensereignissen zu berücksichtigen.

An regionaltypischen Fallbeispielen an Böschungen mit bereits eingetretenen Rutschereignissen soll exemplarisch eine Bewertung der Verursachung und der klimatischen Auswirkungen durchgeführt werden. Darauf aufbauend wird unter der Einbeziehung von weiteren rutschungsrelevanten Faktoren eine Abschätzung für die zukünftige zeitabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit von Rutschungen in diesen Regionen gegeben. Somit wird auch eine erste Einschätzung für das zukünftige Gefährdungspotenzial entlang des dortigen Bundesfernstraßennetzes möglich.

## **5 Ausgangslage**

Die zukünftige Klimaentwicklung lässt unter dem Aspekt der globalen Temperaturerwärmung für das kontinentale Europa nördlich der Alpen die Zunahme milder Winter und der Winterniederschläge sowie die Zunahme von Extremwetterereignissen mit Starkniederschlägen erwarten (Intergovernmental Panel on Climate Panel on Climate change, IPCC,

2007). Durch diese zukünftig potenzielle Klimaveränderung in Deutschland wird es zu einer Zunahme von Böschungsrutschungen kommen. Höhere und andersartig verteilte Niederschläge werden die vielfältige Wirkungsweise des Wassers als eine der wichtigsten auslösenden Faktoren von Rutschungen stark beeinflussen. So vermindert beispielsweise ein erhöhter Poren- oder Klufwasserdruck die Standsicherheit von Böschungen deutlich.

Die Klimaänderungen werden durch den erwarteten künftigen Anstieg von Rutschereignissen somit auch nachhaltige Auswirkungen auf das Bundesfernstraßennetz besitzen. Die verschütteten oder abgerutschten Straßenabschnitte in den letzten Jahren haben dies bereits schon deutlich aufgezeigt (Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz).

## 6 Methodische Vorgehensweise

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte eine bundesweite Rutschungsdatenbank erstellt werden.

Mit der systematischen bundesweiten Datenerhebung von Massenbewegungen mittels einer umfassenden Internet- und Literaturrecherche zur Sichtung vorhandener Daten sowie einer Anfrage bei Institutionen, wie staatlichen geologischen Diensten (Geologische Landesämter), Bundesanstalten, Hochschulen und Universitäten, Vermessungsämtern, Landratsämtern, Städten und Gemeinden, Forstbehörden, Wasserwirtschaftsbehörden, Straßenbehörden, Bahngesellschaften etc., wurde begonnen, wobei bereits vorhandene Datenbanken und Gefährdungskarten recherchiert werden konnten. So existieren, abgesehen von der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz, die der Forschungsnehmer miterstellt hat, u. a. Rutschungsdatenbanken aus dem Mittelgebirgsraum, aus dem Elbsandsteingebirge, der Schwäbischen Alb und von einigen Regionen Thüringens und Sachsen-Anhalts sowie aus Bayern und Nordrhein-Westfalen.

Aufgrund der geringen Bereitschaft der Urheber der Datenbanken, Daten für dieses Projekt zur Verfügung zu stellen, und des für eine Datensammlung nötigen hohen Zeitaufwands, wurde angesichts der zur Verfügung stehenden Zeitspanne des Projektvorhabens in Abstimmung mit dem betreuenden Gremium von einer weiteren Recherche und Zusammenstellung von bundesweiten Schadensereignissen in einer Datenbank zu diesem Zeitpunkt abgesehen.

Anhand einer exemplarischen Auswahl von drei regionaltypischen Fallbeispielen aus der Hügel- und Mittelgebirgslandschaft wurden eine Beurteilung und Bewertung hinsichtlich der Verursachung der dort bereits eingetretenen Rutschereignisse im besonderen Hinblick auf klimatologische Einflussgrößen und ihren Auswirkungen durchgeführt.

Die detaillierte klimatologische Ursachenanalyse der Schadensereignisse der drei Fallbeispiele erfolgte mittels der Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes. Dabei wurde der Schwerpunkt der Betrachtung aufgrund von Erfahrungswerten auf die Witterungsverhältnisse der Monate vor einem Ereignis als auch auf die Jahresniederschläge ein bis zwei Jahre zuvor gelegt.

In Hinblick auf die zukünftige klimatische Entwicklung in den drei ausgewählten Regionen wurden rutschungsrelevante Klimaparameter aus dem regionalen Klimamodell REMO ausgewählt. Eine Trendbetrachtung hinsichtlich der klimatischen Veränderungen in diesen Gebieten und der damit verbundenen Auswirkung auf die mögliche zukünftige Rutschungszunahme wurde vorgenommen und regionale Unterschiede herausgestellt.

Für eine zeitliche Einstufung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Rutschereignissen wurde ein klimatisch-ingenieurgeologisches Modell entwickelt und auf die drei Fallbeispiele angewendet. Dabei wurden die Klimaparameter aus dem Klimamodell mit dem rutschungsrelevanten ingenieur-geologischen Parameter Böschungsneigung verschnitten und korreliert. Die grafische Darstellung erfolgte anhand eines digitalen Geländemodells, in das sowohl die grafische Darstellung der klimatischen Veränderung als auch die der verschiedenen Böschungsneigungen einfließen. Zusätzlich wurden das digitale Bundesfernstraßennetz und ein digitales Punktekataster von Schadensereignissen in die Modellierung integriert.

Auf diese Weise soll eine grafische Ausweisung von Gefährdungsbereichen hinsichtlich der zeitabhängigen Rutschungsgefährdung entlang des Bundesfernstraßennetzes ermöglicht werden.

## 7 Regionaltypische Fallbeispiele

Bei der Auswahl von geeigneten regionaltypischen Fallbeispielen ist zu berücksichtigen, dass diese über einen längeren Zeitraum gut dokumentiert

wurden. Auch sollte eine Rutschungshäufigkeit an der entsprechenden Lokation zu erkennen sein. Korrelationen von Schadenereignissen oder auch Böschungsbewegungsmessungen mit Niederschlags- und Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes sollten einen Zusammenhang zwischen den Witterungsbedingungen und dem jeweiligen Rutschereignis bzw. der Böschungsbewegung zeigen.

Die letztendlich für die nähere Betrachtung selektierten drei Fallbeispiele stammen aus Regionen, die laut bisheriger Untersuchungen für Massenschwerebewegungen anfällig sind, dem Buntsandsteingebiet im südlichen Niedersachsen, der Mittelgebirgslandschaft Rheinisches Schiefergebirge mit dem tiefeingeschnittenen Moseltal sowie dem tertiären Hügelland Rheinhessens.

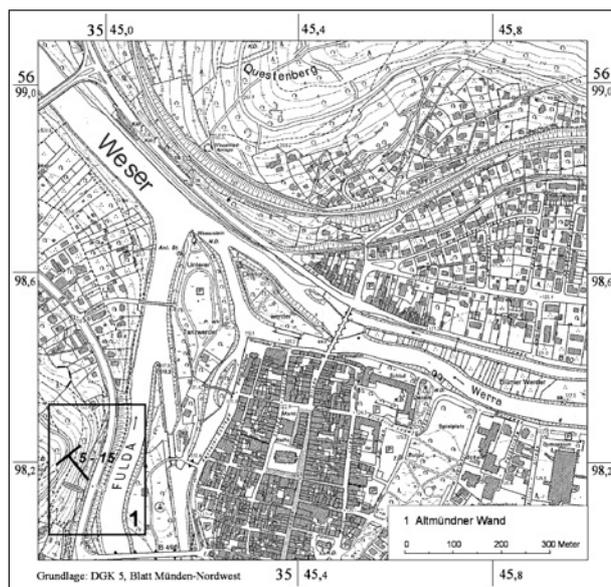
Ausgewählt wurden sie aufgrund ihrer präzisen Dokumentation, auch über einen längeren Zeitraum, und der Tatsache, dass bereits Bewegungsmessungen vorlagen, die mit Niederschlags- und Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes korreliert wurden und einen Zusammenhang zwischen den Witterungsbedingungen und dem Verlauf der Böschungsbewegungen aufzeigten. Auch die dort aufgetretenen Rutschereignisse bzw. Bewegungsbeschleunigungen wurden von klimatischen Bedingungen mehr oder weniger zeitlich verschoben gesteuert.

## 7.1 Fallbeispiel: Altmündener Wand/Oberwesergebiet

### 7.1.1 Lokation

Einer der bedeutendsten und problematischsten Rutschungsstandorte in Südniedersachsen (DAMM, 2005) ist die Altmündener Wand am Rabanenkopf im Stadtgebiet von Hannoversch Münden (Bild 1).

Sie ist eine etwa 400 m lange und etwa 60 m hohe ost-südost-exponierte Böschung entlang eines Fulda-Prallhanges (Bild 2) und liegt an einer der wichtigsten Verkehrsachsen Südniedersachsens oberhalb der vierspurigen Bundesstraße B 3 von km 0+500 bis km 0+800. An dieser Lokation können Rutschungsereignisse von nahezu 120 Jahren nachvollzogen werden (DAMM, 2002).



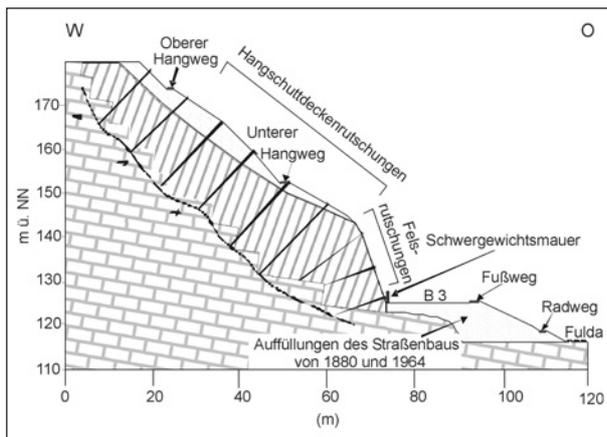
**Bild 1:** Nordwestliches Stadtgebiet von Hannoversch Münden mit der Lage der Altmündener Wand (Rechteck) DGK 5 (verkleinerter Ausschnitt), Blatt Münden-Nordwest, aus DAMM, 2002



**Bild 2:** Rutschareal Altmündener Wand mit Tillyschanze, der B 3 und der Fulda, Aufnahme vom 02.04.2010

### 7.1.2 Geologie

In den Verbreitungsgebieten des Unteren und Mittleren Buntsandsteins kann es an Böschungen mit talwärtigem Schichteinfallen bei Unterschneidungen der Schichtflächen durch Talerosion oder menschliche Eingriffe relativ leicht zu Rutschungen kommen. Besonders rutschungsanfällig sind tonsteinreiche Wechselfolgen. Flache Rutschungen in den Deckschichten sowie in der Felswitterungszone treten im Buntsandsteingebiet gelegentlich auf. Sie sind überwiegend auf Wassereinwirkung und gegebenenfalls plastifizierte Ton(stein)lagen in der oberflächennahen Verwitterungszone zurückzuführen und können Flächen von mehreren Hektar umfassen (PRINZ, 1997).



**Bild 3:** Schematisches Profil der Altmündener Wand mit geologischem Aufbau einschließlich der Auflockerungszone sowie der differenzierten Rutschbereiche und der Verriegelung als Stabilisierungsmaßnahme, aus DAMM 2005

Die Böschung der Altmündener Wand, deren kinematisches Modell in Bild 3 dargestellt ist, wird aus Schichtgliedern der Hardeggen-Folgen des Mittleren Buntsandsteins aufgebaut. Sie setzen sich im Wesentlichen aus Sandstein-Tonstein-Schluffstein-Wechselfolgen zusammen. Die fein-mittelkörnig, teilweise grobkörnigen, plattig-bankigen Sandsteine sind in der Regel verwitterungsresistent und erreichen hohe Gesteinsfestigkeiten. Die häufig mürben Ton- und Schluffsteine sind demgegenüber verwitterungsempfindlich. Durch Frost, Wassereinwirkung und andere Verwitterungsvorgänge verlieren sie an Festigkeit und können Lockergesteinscharakter annehmen. Die Schichten fallen mit  $5^\circ$  bis  $15^\circ$  flach nach Südosten in Richtung auf die Bundesstraße B 3 ein. Die Böschung der Altmündener Wand ist tektonisch stark beansprucht. Die Auflockerungszone reicht bis zu 30 m Tiefe in die Böschung hinein (DAMM, 2005). Das Anstehende wird in den flacheren Böschungsabschnitten von 2 m bis 8 m mächtigen Böschungsschuttdecken überlagert, die bereits bei geringem Wasserzutritt mit einer Herabsetzung ihrer Festigkeitseigenschaft und damit ihres Scherwiderstandes reagieren, was schließlich zu Rutschereignissen führen kann.

### 7.1.3 Morphologie und Vegetation

Die Altmündener Wand bergseitig der B 3 (Fahrbahnhöhe etwa 127 m ü. NN) zeigt unterschiedliche Böschungsneigungen. Durch den Straßenbau am Ende des 19. Jahrhunderts wurde der Böschungsbereich des Rabanenkopfes unterschritten. Der Böschungsbereich aus Sandstein weist bis etwa 142 m ü. NN eine Böschungsneigung von  $60^\circ$  bis  $90^\circ$  auf.

Zwischen 142 m ü. NN und 145 m ü. NN treten Neigungen von  $40^\circ$  bis  $50^\circ$  auf und bis 165 m ü. NN sind es im Bereich der Böschungsschuttdecken etwa  $35^\circ$ . Darüber wird das Gelände flacher (DAMM, 2005).

Die Buchen- und Eichenwaldbestände in den steileren Abschnitten der Böschung wurden in den vergangenen Jahrzehnten gerodet (DAMM, 2005). Mittlerweile ist die Böschung wieder mit Buschwerk überwachsen.

### 7.1.4 Chronologie beobachteter Rutschungen mit Schadensbild

Die ehemalige Kreisstraße von Münden nach Veckerhagen (heute B 3) wurde am Böschungsbereich der Altmündener Wand in den 1880er Jahren gebaut. Am Böschungsbereich wurde die Straße auf rund 250 m Länge im Fels angelegt, wobei bergseitig Böschungsschutt und Buntsandstein-Fels abgetragen und talseitig wieder aufgeschüttet wurde. Im Zuge des Straßenbaues entstand hierdurch eine steile Böschung im Buntsandstein mit überlagernden Böschungsschuttdecken.

Generell waren die Rutschungen hauptsächlich im späten Winterhalbjahr im Verlauf der Monate Februar bis April zu verzeichnen. Es ist davon auszugehen, dass im Falle der Altmündener Wand erst der längerfristig ansteigende Bergwasserspiegel oberhalb eines bestimmten Wertes zu einer Abnahme der Scherwiderstände und somit zu Rutschungsereignissen führte. In einzelnen Fällen waren wohl auch Sprengungen und Baumaßnahmen rutschungsauslösende Faktoren. Die etwa 30 dokumentierten Ereignisse traten mit Häufungen während der Jahre 1924 bis 1926, 1936 bis 1941, 1961, 1970, 1974, 1980 bis 1983, 1985 bis 1987, 1994, 1999 bis 2001 sowie 2003 auf. Dabei kam es überwiegend im Locker- und Festgestein zu Bewegungen, nur bei einigen wenigen Ereignissen löste sich lediglich der Böschungsschutt. Die Mächtigkeit der Rutschkörper mit Kubaturen von im Mittel  $60 \text{ m}^3$  bis  $90 \text{ m}^3$  und bis zu etwa  $400 \text{ m}^3$  lag in den Deckschichten allgemein im Bereich von 2 m bis 3 m (DAMM, 2005).

Bereits während der Straßenbauarbeiten und im direkten Anschluss daran, kam es Ende des 19. Jahrhunderts immer wieder in den Wintermonaten zu Rutschungen. Neben kleineren Rutschungen im Jahr 1902, 1924 und 1926, die als Folge von erheblichen Niederschlägen im Februar bzw. März

und im Zusammenhang mit der Schneeschmelze standen, wurden größere Rutschungen im Februar 1936 sowie 1937 als auch im Oktober 1941 ausgelöst, die auch die Fahrbahn verschütteten. Im April 1966 löste sich nach anhaltenden Niederschlägen eine Gesteinsmasse, die die Steinschlagschutznetze durchschlug, und somit Felsblöcke, Lockergestein und Baumwurzeln die B 3 trafen. Auch 1974 rutschte im November und Dezember nach länger anhaltenden Niederschlägen stark durchfeuchteter Böschungsschutt mit Baum- und Buschbestand sowie Festgestein auf die Fahrbahn. Generell kam es im Zeitraum zwischen 1937 und 1972 immer wieder zu kleineren Rutschungs- und Sturzereignissen.

Nach monatelanger feuchter Witterung wurde im März 1982 die Straße wegen akuter Rutschgefahr präventiv gesperrt.

In den Jahren 1999 und 2000 ereigneten sich an der Altmündener Wand erneut größere Schadensereignisse. Nach Schneefall und Bodenfrost setzte Mitte Februar 1999 Tauwetter begleitet von Niederschlägen ein. Am 25. Februar 1999 gingen 70 m<sup>3</sup> Böschungsschutt mit kleineren Bäumen ab, die durch eine temporäre Sicherung, einer Trägerbohlwand, von der Fahrbahn ferngehalten wurden. Teile des Steinschlagschutzzauns und der Steinschlagschutznetze sowie die Messpunkte des Straßenbauamtes zur Überwachung der Böschungen wurden dabei zerstört. Ein Rutschkörper von 300 m<sup>3</sup> Ausmaß setzte sich in der Folgezeit mit einer im Zentimeterbereich pro Tag liegenden Bewegungsrate in Bewegung. Am 03.03.1999 kam es verbunden mit verstärkten Steinschlägen zu einer erneuten Rutschung. Die Massenbewegungen standen wiederum in Zusammenhang mit ergiebigen Niederschlägen. Im Zeitraum von Februar bis März 1999 fielen insgesamt 135 mm Niederschlag und die Februar-Niederschlagssumme erreichte 240 % des langjährigen Mittels. Während der Sommermonate kam es nur noch zu geringen Böschungsbewegungen (DAMM, 2005).

Mit der zunehmenden Durchfeuchtung der Böschungsschuttdecken im Winter 1999/2000 löste sich im März 2000 ein Böschungsschuttblock von rund 400 m<sup>3</sup> bis 500 m<sup>3</sup> und bezog auch Bereiche mit ein, in denen zuvor Rutschungen ausgeschlossen wurden. Im Dezember 2002 wurde an der Altmündener Wand erneut ein mehrere Kubikmeter umfassender Felssturz beobachtet (DAMM, 2005).

### 7.1.5 Sicherungsmaßnahmen

Die seit dem Straßenbau durchgeführten Sicherungsmaßnahmen umfassten den Einbau von Steinschlagschutznetzen, Felsberäumungen sowie regelmäßige Rodungen von Bäumen und Büschen.

1962 wurden Abschnitte der Altmündener Wand mit Steinschlagschutznetzen und Felsnägeln gesichert. 1994 wurde als passive Sicherung eine 200 m lange und 2,5 m hohe Trägerbohlwand unter Verlust einer Fahrspur errichtet.

Zum Schutz der B 3 vor Steinschlägen aus dem oberen Böschungsbereich sind in der folgenden Zeit in der Böschung Fangzäune und zur Beobachtung von Bewegungen im Böschungsschutt Messpunkte des Straßenbauamtes Gandersheim installiert worden, die periodisch bis zu ihrer Zerstörung kontrolliert wurden.

Bild 4 zeigt den derzeitigen Stand an Schutz- und Sicherungsmaßnahmen entlang der Altmündener Wand im unteren Böschungsbereich.

Im Sommer 2001 wurde im 1. Bauabschnitt mit der Sanierung des Böschungsabschnittes im aktiven Rutschareal begonnen. Ein rund 4.500 m<sup>2</sup> großer Böschungsbereich wurde nach großflächigen Rodungen oberhalb des Wandfußes mit rückvernagelten Steinschlagschutznetzen gesichert. Die Länge der eingebauten 850 Felsnägeln variiert zwischen 6 m und 21 m. Der verpresste Ankermörtel kann zu einer Versiegelung von Klüften und Fugen und damit zu einem flächenhaften Verschluss des oberflächennahen Böschungsbereiches beitragen. Da keine Drainagen eingebaut wurden, sind die Quell- und Vernässungsbereiche der Rutschungen von 1999 und 2000 hiermit wohl plombiert worden. Die drainagelose Ausführung der Sanierung kann die horizontale Änderung der Wasserzirkulation inner-



**Bild 4:** Schutz- und Stabilisierungsmaßnahmen an der Altmündener Wand, Aufnahme vom 02.04.2010

halb des tieferen Kluft- und Schichtsystems der Böschung und ein Ansteigen des Kluftwasserdruckes bewirken. Seit dem Frühjahr 2002 wurde eine zunehmende Vernässung lateral zum Sanierungsbereich am Böschungsfuß der Altmündener Wand beobachtet. In diesem Böschungsabschnitt waren wie erwähnt im Dezember 2002 erstmals seit mindestens acht Jahren wieder mehrere Kubikmeter Fels abgegangen (DAMM, 2005).

Folgend auf den ersten 1,3 Millionen Euro teuren Bauabschnitt sollte im 2. Bauabschnitt bis 2004 der steile Böschungsfuß durch eine 10 m bis 15 m hohe rückverankerte Balkenrostkonstruktion stabilisiert werden, die mittlerweile wieder rückgebaut wurde. Im Anschluss an die Sanierung des rutschungsgefährdeten Böschungsbereichs wurde auch die Trägerbohlwand auf ihrer gesamten Länge rückgebaut und die B 3 dadurch wieder vierspurig befahrbar (DAMM, 2005). Nach 2005 wurde im Bereich der Rutschung eine Schwergewichtsmauer aus teilweise hintereinander gestaffeltem Zyklopenmauerwerk zur Stabilisierung errichtet.

### 7.1.6 Beobachtungsmethode und der Bezug zum Klima

Von Sommer 1993 bis Dezember 1999 wurden vom Straßenbauamt Gandersheim mittels tachymetrischer Vermessung an Messpunkten Setzungen in den Böschungsschuttdecken registriert (DAMM, 2005). Die größten Setzungsbeträge von bis zu 173 mm wurden zwischen Dezember 1993 und April 1994 registriert. Lageänderungen wurden nicht dokumentiert. In Zusammenhang mit diesen Setzungen könnte die hohe monatliche Niederschlagssumme im Dezember 1993 von 102 mm und im März 1994 von 113 mm (Wetterstation Göttingen) stehen. Die Setzungsbeträge nahmen bis zur letzten Messung im Dezember 1999 weiter zu. Zu diesem Zeitpunkt rutschten nach den niederschlagsreichen Monaten zuvor und einem sehr feuchten Dezember-Monat mit einer Niederschlagsmenge von rund 70 mm (Wetterstation Göttingen) einige Messpunkte ab (DAMM, 2005).

Auch die ab Sommer 1999 bis Frühjahr 2000 zusätzlich durchgeführten Bewegungsmessungen von dem Bearbeiter Prof. Dr. Damm zur Identifizierung einer möglichen Instabilität in den Böschungsschuttdecken zeigten, dass ab Oktober 1999 die Bewegungen zunahmen und Beträge zwischen 2 mm/Tag im Dezember 1999 und 26 mm/Tag im März 2000 erreicht wurden (DAMM, 2005). Der An-

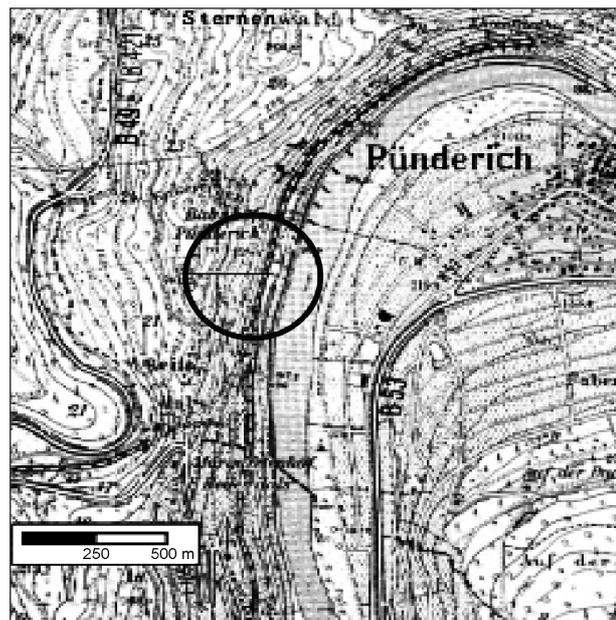
stieg der Bewegungsrate in den Wintermonaten könnte auf die zunehmenden Niederschläge im Laufe des Winterhalbjahres zurückzuführen sein.

## 7.2 Fallbeispiel: Pünderich/Moseltal

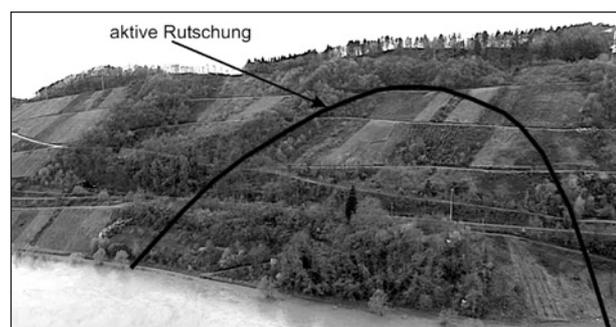
### 7.2.1 Lokation

Das Rutschareal liegt im linksrheinischen Bereich des Rheinischen Schiefergebirges, im Moselgebiet. Das aktive nach Ost-Südost exponierte Rutschareal befindet sich auf der Westflanke eines Moselprallhanges im Bereich der DB-Strecke Koblenz-Perl von Bahn-km 61,7 bis 62,1 zwischen der Ortschaft Pünderich und Reil (Bild 5).

Die Gesamterstreckung der Großrutschung umfasst eine Breite von etwa 300 m und eine Höhe von 158,8 m von der Mosel bis zum Reiler-Hals-Bergkamm (Bild 6).



**Bild 5:** Lage des Rutschareals, Ausschnitt (verkleinert) aus TK 1:25.000, Blatt 5908 Alf (1993)



**Bild 6:** Aktives Rutschareal zwischen Reil und Pünderich bei Moselhochwasser, aus KRAUTER & LAUTERBACH, 2004

## 7.2.2 Geologie

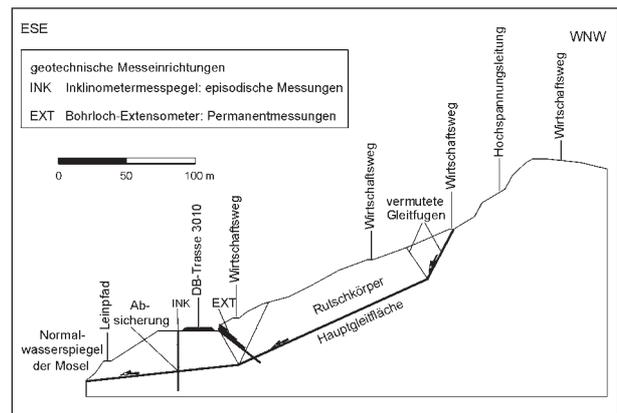
Bei den Rutschungen im Rheinischen Schiefergebirge ist zwischen Felsstürzen und Großrutschungen im Sinne von großvolumigen und z. T. tiefgreifenden Gleitbewegungen zu unterscheiden. Auch sind Kriechbewegungen und seit einigen Jahren auch Murenabgänge bekannt, die bis dahin in dieser Region noch nicht aufgetreten waren. Die meisten Rutschungen im Rheinischen Schiefergebirge sind Gleitungen auf vorgegebenen Trennflächen, meist Schicht- oder Schieferungsflächen, gelegentlich aber auch Störungszonen, die im Zusammenwirken mit anderen Trennflächen die Bewegungsbahnen bilden (PRINZ, 1997).

Die Wechselfolgen von quarzitischen Sandsteinen und Tonsteinen bzw. Schiefertönen sowie die verbreitete tektonische Schichtverstellung bieten im Rheinischen Schiefergebirge günstige Voraussetzungen für Gleitungen auf Schichtflächen. Die Tonsteine sind generell wasserempfindlich und begünstigen somit Rutschungen. Auch liegen an den steilen Böschungen der eingetieften Täler im Einzugsgebiet von Rhein, Mosel, Lahn, Saar und Nahe zahlreiche fossile Rutschungen vor, die auf den ersten Blick nicht sofort erkennbar sind, aber durch genauere Studien erkannt werden können. Sowohl durch menschliche Eingriffe in das ohnehin bereits labile Böschungsgleichgewicht als auch durch Klimaänderungen können erneute Bewegungen initiiert werden.

Das Rutschareal ist überwiegend aus devonischen metamorph überprägten Sedimentgesteinen aufgebaut. Wechselfolgen von Quarziten, quarzitischen Sandsteinen, Siltsteinen, sandigen Schiefern und Tonschiefern bilden die wichtigsten Gesteinseinheiten. Generell gesehen dominieren die Tonschiefer und sandigen Tonschiefer gegenüber den quarzitischen Sedimentiten.

Durch tektonische Beanspruchung ist das Gebirge in weiten Teilen des Moselprallhanges stark aufgelockert und die unterdevonischen Tonschiefer mit den quarzitischen Einschaltungen sind gefaltet und geschiefert. Die Schichtung, die generell mit der Raumstellung der Schieferung übereinstimmt, fällt mit unterschiedlicher Neigung in verschiedene Richtungen ein (WERNER, 1997).

Eine intensive Durchfeuchtung des gesamten Geländes, die mit der hohen tektonischen Beanspruchung einhergeht, wird besonders durch stark vernässte Böschungsbereiche und mehrere Waseraustritte deutlich (KRAUTER, 1996).



**Bild 7:** Kinematisches Modell des Rutschareals Pünderich, aus LAUTERBACH & FEUERBACH, 2003

Bild 7 zeigt das kinematische Modell des Rutschkörpers mit den vermuteten Gleitfugen und der Hauptgleitfläche in ca. 30 m Tiefe.

## 7.2.3 Morphologie und Vegetation

Morphologisch handelt es sich um eine charakteristische Landschaft des mittleren Moseltals mit steilen Prallhängen und niedrigen, flachen Gleithängen. Die Steilhänge werden überwiegend als Weinbaugebiet genutzt.

Das Rutschareal befindet sich auf der Ostflanke des Reiler-Hals-Bergkamms und fällt mit 20° bis 35° auf eine Höhe von 95 m ü. NN zur Mosel hin ab.

Die Böschungsneigung im oberen Abrissbereich ist größer als 45°. Der mittlere Böschungsbereich erstreckt sich bis zur Bahntrasse mit einer durchschnittlichen Neigung von 40° bis 45°. Zwischen Bahndamm und Moselufer liegt die Böschungsneigung im unteren Bereich zwischen 20° und 25°.

Mehrere Wirtschaftswegen verlaufen auf unterschiedlichen Höhenniveaus höhenparallel durch das Gebiet. Der Topbereich und der Bergrücken sind bewaldet. Der Wald besteht aus Laubbäumen (überwiegend Buchen und Eichen) und Nadelbäumen (größtenteils Fichten). In Höhe der Bahntrasse trifft man niederes Buschwerk und vereinzelt auch Laubbäume an.

## 7.2.4 Chronologie beobachteter Rutschungen mit Schadensbild

Schon bei der Begutachtung des Eisenbahn-Direktionsbezirks St. Johann-Saarbrücken 1896 wurde der betrachtete Abschnitt der Bahnstrecke Koblenz-Perl als rutschungsgefährdet eingestuft.

Da es nach Aussagen von Winzern in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder zu Rutschungen im Untersuchungsgebiet kam, kann davon ausgegangen werden, dass die Entwässerungseinrichtungen mit Stollenanlage, Gräben und Rigolen im Laufe der Zeit ihre Funktionstüchtigkeit verloren haben (KRAUTER, 1996).

So kam es im Frühjahr 1963 im Bereich der heutigen Rutschung zu Bewegungen, die durch die Anlage eines Wirtschaftsweges in dem stark durchfeuchteten Gelände (Rutschungsdatenbank RLP) ausgelöst wurden. Nähere Informationen über die damaligen Böschungsbewegungen liegen allerdings nichts vor.

Im Bereich des Rutschareals lässt sich eine für Rutschungsgebiete typische unruhige Morphologie oberhalb der Bahntrasse mit zwei Aufwölbungs-(Akkumulations-)Zonen erkennen (KRAUTER, 2000).

Anfang der 1990er Jahre nahmen die Böschungsverformungen – wahrscheinlich durch Verschlammung von Entwässerungsstollen – wieder zu (KRAUTER, 1996).

Anfang Mai 1995 entstanden im Bereich des unteren Wirtschaftsweges Risse in der Schwarzdecke, die auf Böschungsbewegungen schließen lassen. In dem böschungsaufwärts gelegenen mittleren sowie in dem oberen Wirtschaftsweg waren ebenfalls Risse erkennbar (Bild 8). Die Schäden waren



**Bild 8:** Risse in der Schwarzdecke des oberen Wirtschaftsweges, aus KRAUTER & LAUTERBACH, 2004

so groß, dass der obere Weg gesperrt werden musste.

Der Einbau von einer Geotextilmatte unter die Schwarzdecke des oberen Weges sollte weitere Rissbildungen minimieren.

Die im oberen Böschungsbereich liegende Hauptabbrisskante entspricht den 1995 aufgetretenen Abrissen im oberen Wirtschaftsweg (KRAUTER, 1996).

### 7.2.5 Sicherungsmaßnahmen

Bereits beim Bau der Bahnstrecke wurden sehr aufwändige Maßnahmen zur Entwässerung der Böschung vorgenommen, die offensichtlich in der Vergangenheit weitgehend verhinderten, dass es zu Bewegungen kam.

Durch Drainagemaßnahmen mit in die Böschung vorgetriebenen und mit Steinpackungen verfüllten Stollenanlagen wurde das Böschungswasser zur Stabilisierung der Böschung über 100 Jahre lang gezielt abgeleitet.

Beim Bahnbau wurde eine Vorschüttung angelegt, um die Böschungsanschnittshöhe in dem damals schon bekannten Rutschgelände möglichst gering zu halten. Die mit einer Böschungsneigung von 40° und einer Fläche von 7.500 m<sup>2</sup> angelegte 30 m hohe Böschung zwischen Radweg am Moselufer und der Bahntrasse wurde mit Schiefergestein gepflastert. Durch die Böschungsdeformationen sind große Bereiche dieser Pflasterfläche zwischenzeitlich stark verformt (Bild 9) und einzelne Steine sind ausgebrochen (KRAUTER & LAUTERBACH, 2004).



**Bild 9:** Verformung und Ausbrüche in der Böschungspflasterung, aus KRAUTER & LAUTERBACH, 2004

Die bergseitigen Betonstützmauern aus Stampfbeton im Bereich des aktiven Rutschareals zeigen Schäden durch Betonabplatzungen, Rissbildungen und Verstellungen, die eindeutig auf Böschungsschub zurückzuführen sind (Bild 10).

Auch abgescherte Entwässerungsrohre in der Stützmauer deuten auf Böschungsbewegungen hin. Querriegel zwischen Stützmauer und talseitiger Grabenwand weisen Verdrückungserscheinungen auf. Zum Teil hat der Querriegel die talseitige Grabenwand in Richtung Bahntrasse aufgrund der starken Pressung sogar verschoben.

Als Konsequenz zu den Abweichungen aus der Sollgleislage musste zeitweise eine Langsamfahrtstrecke in dem betroffenen Böschungsabschnitt eingerichtet werden, was einen hohen zusätzlichen Kostenaufwand für die Deutsche Bahn bedeutete. Durch Richten der Gleise und die Installation der „Rutschwarnanlage Pünderich“ im Jahr 2000 mit permanenten Bewegungsmessungen und Auslösen von Alarm bei Überschreiten von Böschungsbewegungsgrenzwerten bei den zuständigen Stellen kann seitdem die Sicherheit der Betriebsführung gewährleistet werden. Bei konstanten Bewegungsraten müssen lediglich von Zeit zu Zeit die Gleise gerichtet werden (KRAUTER, 2001). Die Anwendung der Beobachtungsmethode kann somit zumindest zeitweise die notwendige Ausführung von Sicherungsmaßnahmen ersetzen.



**Bild 10:** Riss in Betonstützmauer, aus KRAUTER & LAUTERBACH, 2004

### 7.2.6 Beobachtungsmethode und der Bezug zum Klima

Seit 1985 bis zum heutigen Zeitpunkt wurden Bewegungen gemessen.

Im Zeitraum von März 1994 bis Februar 2000 wurden seitens der Bahn im Bereich des Rutschareals in mehreren Messkampagnen geodätische Vermessungen durchgeführt, wobei die Maximalbewegungen der Lagen- und Höhenänderungen registriert wurden.

Ein Vergleich der Lagen- und Höhenänderungen mit den monatlichen Niederschlagsmengen der Wetterstation Bernkastel-Kues ließ deutlich eine Steuerung der Bewegungen durch die jeweiligen Niederschlagsmengen erkennen (KRAUTER, 1996).

Im Zeitraum zwischen September 1994 und April 1995 kam es bei den meisten Messpunkten zu einer deutlichen Beschleunigung der Bewegung in den Wintermonaten, also in einer vegetationsarmen Periode mit geringerer Evapotranspiration. In diesem Zeitraum fielen überdurchschnittlich hohe Niederschläge. Die Januarniederschläge 1995 überstiegen das langjährige Mittel nahezu um das Vierfache. Die Intensität der Bewegung nahm mit den überdurchschnittlichen Niederschlägen gleichermaßen zu. Zwischen März 1994 (Nullmessung) und Juli/August 1995 wurden Verformungen in der Lage bis zu 56 mm und in der Höhe bis zu 20 mm gemessen. Danach trat eine Beruhigung der Verformungen ein. Mit abnehmenden Niederschlagsmengen konnte auch ein Rückgang der Beschleunigung der Bewegungen beobachtet werden. So initiierten z. B. im Winter 1995/1996 geringe Gesamtniederschläge nur an einigen Messpunkten geringe Bewegungen.

Oft ist eine Verzögerung der Auswirkungen der Witterungsperioden festzustellen. So zeigten die Monate Februar, März und April 1995 einen deutlichen Rückgang der Niederschlagsmengen auf, obwohl eine Bewegungszunahme in diesem Zeitraum erfolgte. Da die Niederschlagsmengen dieser Monate aber über dem langjährigen Mittel lagen und auch einen direkten Einfluss auf die Grundwasserneubildungsrate ausübten, ist davon auszugehen, dass diese Niederschlagsmengen ausreichten, um die Bewegung in Gang zu halten. Ab April 1998 bzw. November 1998 beschleunigten sich die Verformungen wieder und erreichten bis zum Oktober 1999 eine Lageveränderung von 20 mm und eine

Höhenveränderung von 10 mm. Im Zentrum der Rutschung gingen bis Februar 2000 die Verformungen weiter bzw. nahmen noch zu (KRAUTER, 2000).

Man kann zusammenfassend sagen, dass bis dahin eine deutliche Zunahme der Beschleunigung der Bewegung generell bei hohen Niederschlagsmengen im Winter/Frühling beobachtet werden konnte. Bewegungen wurden bei durchschnittlichen monatlichen Niederschlägen in den Monaten Dezember bis April von ca. 80 mm ausgelöst, wobei dieser Grenzwert nur einen relativen Richtwert angibt (KRAUTER, 1996). Es kann durchaus auch vorkommen, dass durch das Zusammenspiel anderer Klimafaktoren über einen längeren Zeitraum auch wesentlich geringere Niederschlagsmengen ausreichen, um Verformungen auszulösen oder in Gang zu halten.

Im November 2000 wurden zur permanenten Kontrolle bzw. Überwachung von Böschungsdeformationen unmittelbar bergseitig des Gleiskörpers drei Extensometermessstellen und unmittelbar talseitig des Gleiskörpers eine Inklinometermessstelle zur Registrierung der talwärtigen Bewegungen der Böschung eingerichtet (LAUTERBACH & FEUERBACH, 2010). Die Messungen erfolgen bis heute.

Die Bewegungsraten wurden zum einen mit den Niederschlagsdaten der Wetterstation Kinheim bzw. Bernkastel-Kues als auch mit dem Moselwasserstand (Tagesmittelwerte des Moselwasserstandes am Pegel Cochem) und dem Grundwasserstand, soweit er zur Verfügung stand, korreliert.

Mit einigen Niederschlagsmaxima im späten Winter und im Frühjahr zwischen 2000 und 2003 mit Jahresniederschlägen > 800 mm sind deutliche Anstiege von Bewegungen verbunden.

Sowohl die Extensometer in den randlichen Bereichen der Rutschung als auch der Extensometer im Zentrum der Rutschung zeigten in den Jahren 2001 bis 2003 jährliche Bewegungsraten von bis zu 5,8 mm/a bzw. zwischen 9,1 mm/a und sogar 18,8 mm/a. Auch konnten durch die Inklinometermessungen größere Böschungsbewegungen in diesem Zeitraum registriert werden (LAUTERBACH & FEUERBACH, 2010).

Eine Korrelation mit den Moselwasserständen ergab, dass nach größeren Hochwasserperioden gegen Ende des Winterhalbjahrs bzw. im Frühjahr und dem unmittelbaren Wiederabsinken des Wasserstandes eine starke Beschleunigung der Bewe-

gungen zu verzeichnen ist. Dem kontinuierlichen Absinken des Moselwasserstandes bis zu den Sommermonaten hin folgte eine Verringerung der Bewegungsraten.

Auch kann ein Zusammenhang zwischen der Bewegungsbeschleunigung im Frühjahr 2001 und dem gemessenen hohen Grundwasserstand gesehen werden. Der durch mehrere Messungen ermittelte Grundwasserstand pendelte in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Grundwasserneubildungsrate meist im Bereich der in 30 m Tiefe gelegenen Gleitfläche, das bedeutet, die Hauptscherfläche liegt somit in „feuchten Jahren“ in der wassergesättigten Bodenzone, was zu einer Herabsetzung der Scherfestigkeit beiträgt und somit die Bewegungen extrem verstärkt.

In den Jahren 2004 und 2005 verringerten sich die Bewegungsraten sowohl im äußeren Bereich der Rutschung (bis auf max. 0,9 mm/a) als auch im zentralen Bereich (Raten zwischen 0,2 mm/a und 1,5 mm/a). Auch waren in diesem Zeitraum nur kleinere Moselhochwässer von Dezember 2004 bis Mai 2006 zu verzeichnen, die sich folglich nicht auf die Böschungsbewegung ausgewirkt haben (LAUTERBACH & FEUERBACH, 2010).

Erst in den Jahren 2007 bis 2010 kam es im randlichen Bereich der Rutschung und im Zentrum wieder zu geringfügigen Bewegungsraten von bis zu 0,8 mm/a bzw. zwischen 2,0 mm/a und 3,3 mm/a.

Die Böschungsbewegungen konnten wiederum mit dem Moselwasserstand in Zusammenhang gebracht werden. So wurden mit dem hohen Frühlingshochwasser 2007 und den Spätwinter-/Frühlingshochwässern 2008 Böschungsbewegungen registriert. Auch die vier drei- bis sechstägigen Hochwasserereignisse des Winters 2008/2009 wirkten sich im späten Winter bzw. zu Beginn des Frühjahrs auf die Bewegungen aus.

Um eine Aussage über den Zusammenhang zwischen einem Starkniederschlagsereignis und einer Rutschungsgefährdung zu erhalten, wurde der am 15.06.2009 gemessene höchste Tagesniederschlag von 42,9 mm des betrachteten Beobachtungszeitraumes (Stand bis Ende 2009) in Korrelation mit den Böschungsbewegungen gesetzt. Das Resultat war, dass er weder unmittelbar noch zeitlich verzögert einen Einfluss auf die Bewegungsrate hatte. Auch weitere sommerliche Starkniederschlagsereignisse zeigten keine Bewegungsänderung auf. Somit können im vorliegenden Fallbei-

spiel einzelne sommerliche Starkniederschlagsereignisse als Einflussfaktor für Bewegungsschübe ausgeschlossen werden. Die Änderungen der Bewegungsraten stehen damit nicht generell im direkten Zusammenhang mit der Höhe der täglichen Niederschlagssummen (LAUTERBACH & FEUERBACH, 2010).

Böschungsbewegungen fanden nur innerhalb der ausgeprägten Niederschlagsmaxima in niederschlagsreichen Winterhalbjahren statt, wobei die stärksten Beschleunigungen zwischen Januar und März registriert wurden. Die Maxima in niederschlagsärmeren Winterhalbjahren und generell in den Sommerhalbjahren wirkten sich nicht auf die Böschungsbewegungen aus.

Es stellte sich heraus, dass Beschleunigungen der Bewegungen in direktem Zusammenhang mit größeren Wasserstandsänderungen der Mosel stehen (Bild 11). Bei allen Bewegungsmessungen zeigte sich deutlich, dass größere und länger anhaltende Moselhochwasser Bewegungsbeschleunigungen von mehreren Wochen bis wenige Monate Dauer verursachen (LAUTERBACH & FEUERBACH, 2010).

## 7.3 Fallbeispiel: Wißberg/Rheinhesen

### 7.3.1 Lokation

Als klassisches Rutschgebiet in Rheinhesen gilt u. a. der Wißberg. Er liegt bei Sprendlingen, ca. 20 km südwestlich von Mainz und ist Teil des „Rheinhesischen Hügel- und Tafellandes“. Er befindet sich nördlich der Ortschaft Gau-Bickelheim (Bild 12 und Bild 13).

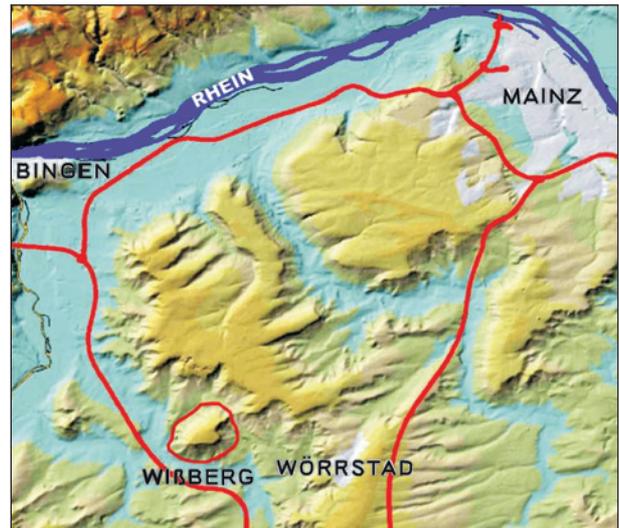


Bild 12: Lage des Rutschareals Wißberg, aus BECKER, 2005

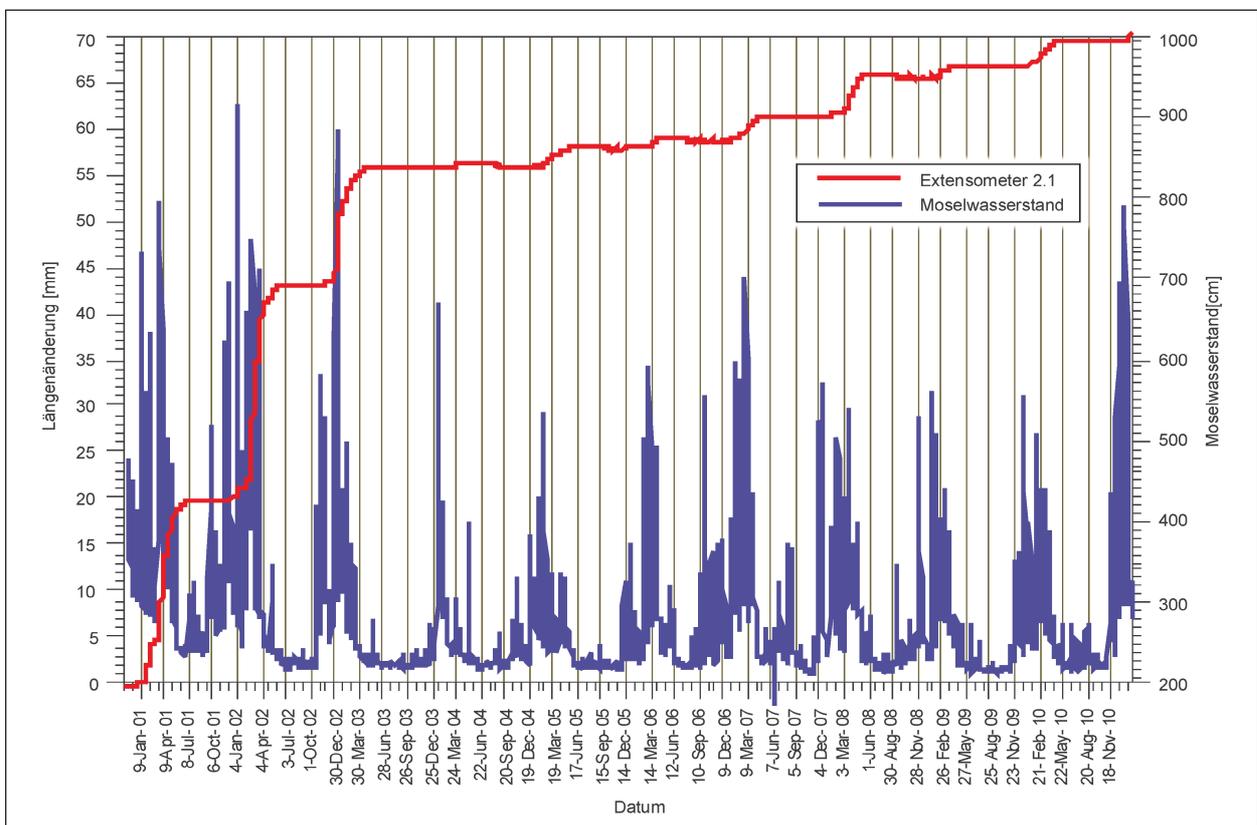


Bild 11: Korrelation der Längenänderung des Extensometers mit dem Moselwasserstand



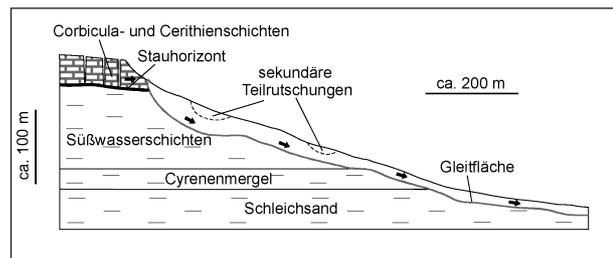
**Bild 13:** Das Rutschareal Wißberg mit Blick nach Norden, Aufnahme vom 28.03.2010

### 7.3.2 Geologie

Das Tertiär im rheinhessischen Hügelland ist mit seinen Wechsellagerungen von Ton und Feinsand, Mergelton und Kalkmergelbänken sehr anfällig für Rutschungen, wobei es sich meist um flache bis 5 m tiefe Rutschungen in Deckschichten, Umlagerungs- und Verwitterungszonen handelt. Besonders rutschungsanfällig sind in Rheinhessen die mächtigen, wasserwegsamem miozänen Kalksteine auf den oligozänen Tonen (KRAUTER & STEINGÖTTER, 1983).

Der Wißberg liegt im westlichen Bereich des Mainzer Beckens, welches ein tertiäres Senkungsfeld am nordwestlichen Ende des Oberrheingrabens darstellt.

Der geologische Aufbau des Wißberges, eine oligozäne sehr flach einfallende Schichtenfolge aus überwiegend Tonen und Schluffen, die von Kalksteinen (Oligozän/Miozän) überdeckt wird, ist für die potenzielle Rutschungsgefahr maßgebend. Das regelmäßig ausgebildete Kluftsystem in den aufliegenden Kalksteinen leitet gut das Wasser zur Basis dieses Grundwasserleiters, wo es dann aufgrund eines Stauhorizontes zu Quellaustritten kommt (Quellhorizonte). Durch eine Aufweichung des Untergrundes oder eine flächen- oder punktförmige Bewässerung der Tone und Sande können Rutschungen ausgelöst werden. Bild 14 zeigt den Schichtaufbau und die Ausbildung flacher Tertiär-Rutschungen am Wißberg. Die vorhandenen und teilweise auch aufgeschlossenen, fast horizontal liegenden stratigrafischen Einheiten beginnen mit dem Schleichsand, einer Wechselfolge von Tonmergeln, feinsandigen Mergeln und Feinsanden. Aufgrund der quellfähigen Tonminerale und der wasserführenden Feinsandeinschlaltungen treten im Schleichsand des Mainzer Beckens häufig Rutschungen auf. Der Schleichsand, der weite Teile der Unter- und Mittelhänge des Wißbergs bedeckt, erreicht Mächtigkeiten von 50 m



**Bild 14:** Schichtaufbau und Ausbildung flacher Tertiär-Rutschungen am Wißberg, aus KRAUTER, 1987

bis 70 m. Darüber folgt mit einer Mächtigkeit von 10 m bis 15 m der Cyrenenmergel, ein blaugrauer bis grünlichgrauer Tonmergel. Die im Anschluss folgenden 60 m bis 65 m mächtigen Süßwasserschichten bestehen aus grauen schluffigen und feinsandigen Tonmergeln mit Sandlinsen. Die darauf abgelagerten 15 m mächtigen Oberen Cerithienschichten bestehen aus Tonmergeln und Kalken und werden von den am Wißberg nur geringmächtig (0,6 m bis 1 m) ausgebildeten brackischlimnischen Tonmergeln und Kalken der Corbicula-schichten überlagert. Im Bereich des Wißberg-Plateaus finden sich zum Teil 0,5 m mächtige Lagen von Bohnerzton, der aus dunkelbraunen, teilweise feinsandigen Tonen mit Bohnerzen besteht, sowie fluviatilen Dinotheriensanden. Der größte Teil des Plateaus und Teile des Westhangs sind von einer bis zu 2,5 m mächtigen und teilweise verlehnten Lössschicht bedeckt (MATTHESIUS, 1994).

### 7.3.3 Morphologie und Vegetation

Die flachen Rutschungen an Tertiärhängen von oft nur 6° bis 10° Neigung sind in den verschiedensten Größenordnungen und Erscheinungsformen weit verbreitet. Oft lassen sich an den Hängen fossile Rutschungen ausmachen. Kleinere Eingriffe ins Böschungsgleichgewicht und/oder stärkere Niederschläge reichen schon aus, um Massenbewegungen auszulösen (PRINZ, 1997).

Der Wißberg kann mit einer Höhe von 272 m ü. NN und einer Fläche von ca. 10 km<sup>2</sup> als tafelförmiger Zeugenberg betrachtet werden (STEINGÖTTER, 1984), der durch die eiszeitliche Zerstörung der umgebenden Kalkhochfläche herausmodelliert wurde.

Grundsätzlich zeichnet sich die Morphologie im Bereich des Wißberges durch relativ flache Böschungen mit einer Versteilung im oberen Bereich aus, die mit den z. T. relativ harten Kalksteinen zusammenhängt. Die Böschungen lassen sich in flache schwach geneigte (< 5°), mäßig geneigte (5°-10°)

und steilere Böschungen ( $> 10^\circ$ ), die im Bereich der Schichtstufe Neigungen von über  $20^\circ$  erreichen, unterteilen.

In den unteren und mittleren Böschungsbereichen ist eine unruhige Morphologie zu beobachten, die sich durch die immer wieder auftretenden Rutschungen gebildet hat.

Am Wißberg konnten insgesamt 15 aktive Rutschungen durch Luftbildanalysen und Feldbegehungen ingenieurgeologisch aufgenommen werden (BECKER, 2005), die aufgrund von Abrisskanten, Verstellungen, Wulsten und Dellen sowie talwärts verlegten Wegabschnitten im Gelände klar zu erkennen waren. Begünstigt wurde die Aufnahme dadurch, dass die meisten der von Rutschungen betroffenen Flächen nicht mehr für Weinanbau genutzt und seither nicht mehr flurbereinigt wurden. Der größte Teil der Rutschareale, bei denen es sich zum Teil um Sekundärrutschungen oder reaktivierte pleistozäne Rutschung handelt, befindet sich innerhalb der Süßwasserschichten im Bereich des Quellhorizontes, der sich am Wißberg in einer Höhenlage von ca. 220 m ü. NN befindet und Quellaustritte und Vernässungszonen aufweist. Diese Rutschungen sind auf die Bewässerung der Tonmergel durch die darüber lagernden Kalksteine in Verbindung mit Entlastungs- und Verwitterungsvorgängen zurückzuführen. Hinzu kommt, dass Teile des durch die Klüfte der Kalksteine versickernden Kluftwassers in die Feinsandlagen der Süßwasserschichten eindringen und die Scherparameter bis zum Grenzgleichgewicht und darunter herabsetzen.

Im flachen Böschungsbereich wird hauptsächlich Acker- und Weinanbau betrieben. Mit zunehmender Böschungsneigung erfolgt nur noch Weinanbau, der teilweise bis in die Steilstufe hineinreicht. Der größte Teil der Schichtstufe besteht jedoch aus aufgelassenen Weinbergflächen, die aufgrund der Schäden und teuren Unterhaltung der Entwässerungssysteme nicht mehr bewirtschaftet werden. Das Plateau des Wißberges wird zum größten Teil durch einen Golfplatz belegt.

#### 7.3.4 Chronologie beobachteter Rutschungen mit Schadensbild

In Rheinhessen sind ca. 8 % der gesamten Fläche von ca. 1.400 km<sup>2</sup> potenziell rutschungsgefährdet.

Mit der morphologischen Entwicklung im späten Pleistozän sind die ersten Rutschungen aufgetre-

ten. Vor allem die Südhänge waren infolge starker Temperaturschwankungen hiervon betroffen. Diese fossilen Rutschungen können heute unter dem Einfluss bestimmter Faktoren wieder aktiv werden. Aus diesem Grund treten heute viele Rutschungen bevorzugt auf südexponierten Hängen auf.

Im oberen Bereich des Wißberg-Südhanges finden sich über einer Breite von 1 km mehrere Abrisskanten, die wahrscheinlich von pleistozänen Massenbewegungen stammen. Im Bereich des süd-östlichen Böschungsfußes befindet sich eine fossile Kalksteinscholle. Die fossilen Rutschungen dürften aufgrund des im Pleistozän vorherrschenden Periglazialklimas entstanden sein.

Rutschungen größeren Ausmaßes sind schon seit dem 13. Jahrhundert bekannt.

Rutschungen aus neuerer Zeit sind seit dem ausgehenden 17. Jahrhundert bekannt. Ein Beispiel für die starken Bewegungen am Wißberg ist die Kreuzkapelle am Südhang (Bild 15), die in den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts wegen schwerer Rutschungsschäden abgerissen und erst zwischen 1904 und 1911 wieder aufgebaut wurde (BECKER, 2005).

Die Jahre 1880/81 und 1939/40/41 sind als extreme Rutschungsjahre bekannt (KRAUTER & STEINGÖTTER, 1983).

Im Dezember 1953 wurden am Südhang des Wißberges wieder Rutschungen dokumentiert. Nach der Flurbereinigung 1955 ereigneten sich erneut Massenbewegungen größeren Ausmaßes, die Verschiebungsbeträge von bis zu 60 m erreichten. Auch in den Jahren 1969 und 1978 traten Rutschungen am Wißberg auf. Stark von Rutschungs-



**Bild 15:** Der Südhang des Wißberges mit der Kreuzkapelle und dem auf dem Plateau befindlichen Golfplatz mit Hotelgebäude, Aufnahme vom 28.03.2010



**Bild 16:** Abrisskante im oberen Bereich, Aufnahme vom 28.03.2010



**Bild 17:** Rissbildung in der Wand der Kreuzkapelle, Aufnahme vom 28.03.2010

ereignissen betroffen war das Gebiet im Winter 1981/82, in dem eine große Anzahl von Rutschungen verzeichnet werden konnte, die insgesamt ein Ausmaß von fast 70 ha erreichten (STEINGÖTTER, 1984).

Auslöser der Rutschereignisse waren extreme Witterungsverhältnisse zum Jahreswechsel mit akutem Anstieg der Temperaturen aus dem Frostbereich heraus und gleichzeitig hohen Niederschlägen. In den Jahren zuvor waren im Mittel bereits höhere Niederschläge zu verzeichnen.

Auch zum jetzigen Zeitpunkt kann man am Wißberg anhand der Geländemorphologie mit Dellen und Aufwölbungen, der Abrisskante im oberen Bereich



**Bild 18:** Zerstörter Weg, Aufnahme vom 28.03.2010

(Bild 16) sowie kleineren Abrissen im Weinbergsgelände, der verstellten Weinbergszeilen, der Rissbildung in der Kreuzkapelle (Bild 17) und der zerstörten auch teils abgerutschten Wege (Bild 18) usw. deutlich erkennen, dass der Wißberg in Bewegung ist.

### 7.3.5 Sicherungsmaßnahmen

Im Westen, Osten und Süden dienen angelegte Gräben im Gefälle der oberflächlichen Entwässerung des Wißberges. Diese führen saisonal Wasser. Als Problem erweist sich die langfristige Funktionsuntüchtigkeit der Entwässerungsgräben. Viele der mit Trapezschaalen eingefassten Entwässerungsgräben im Bereich des Südhanges, die anfallendes Niederschlagswasser vom Plateaurand und aus dem Bereich des Quellhorizontes abführen sollen, sind durch Bewegungen verschoben oder zerstört bzw. durch fehlende Wartung zugeschlammte und somit nicht mehr funktionstüchtig (Bild 19). Besonders problematisch ist dabei der Eintrag von Wasser in die Mergel im Bereich von zerstörten Drainagen. Damit findet keine Entwässerung statt, sondern eine gezielte Bewässerung.

Auch die ungefassten Entwässerungsgräben sind zum Teil nicht mehr funktionstüchtig, da sie zugeschlammte sind. Am Westhang wurden Anfang des 20. Jahrhunderts Drainagen aus Tonröhren verlegt, die das anfallende Wasser aus dem Niveau des Quellhorizontes ableiten sollten. Mit einer Einbautiefe von 0,5 m bis 1,0 m unter GOK liegen sie aber über den Gleitflächen der vorhandenen Rutschungen und bilden eine Gefahr, wenn es bei Bewegun-



**Bild 19:** Zerstörter mit Trapezschaalen eingefasster Entwässerungsgraben, Aufnahme vom 28.03.2010

gen zu einem Bruch und dadurch zu einer Bewässerung der Rutschungen kommt. Darüber hinaus sollten für neu zu verlegende Drainageleitungen PVC-Rohre benutzt werden, da diese flexibler als Tonröhren sind und leichte Bewegungen ausgleichen können.

Ein fachlich fundiertes Flurbereinigungskonzept, in dessen Rahmen die Instandsetzung der Wirtschaftswege bzw. Anlage eines geeigneten Wegenetzes, Angleichen von Geländeunregelmäßigkeiten, Errichten eines längerfristig funktionstüchtigen Drainagesystems etc. durchgeführt werden, stellt eine zweckmäßige Sanierungsmaßnahme für das Rutschareal Wißberg dar. Zwar wird die Bewegung dadurch nicht zum Stillstand kommen, allerdings kann eine Verlangsamung der Gleitbewegung bewirkt werden.

Mit dem geplanten Flurbereinigungsverfahren wurde am Wißberg im Jahr 1997 begonnen, bei der knapp 200 Hektar Rebfläche neu gestaltet wurden.

### 7.3.6 Beobachtungsmethode und der Bezug zum Klima

Am Südhang des Wißberges wurden von Oktober 1981 bis November 1982 und von September 1989 bis August 1993 geodätische Vermessungen zur Registrierung der Bewegungen (Lagen- und Höhenänderungen) durchgeführt.

Von November 1986 bis April 1989 wurden zusätzlich an sechs Bewegungsmesspegeln, die nach dem Prinzip eines Extensometers funktionieren, monatliche Relativbewegung gemessen. Die Pegel sollten primär Gleit- oder Bewegungsflächen und deren Tiefenlage im Untergrund erfassen.

Die geodätischen Vermessungen ließen deutlich erkennen, dass es seit Beginn der Messungen in den Jahren 1981 und 1982 bis zum Zeitpunkt der letzten Messung im Jahre 1993 zu deutlichen Versetzungsbeträgen von bis zu 3,3 m kam (MATTHESIUS, 1994). Dabei fielen die Versetzungsbeträge der ersten Messkampagne von 1981 und 1982 höher aus als die der zweiten von 1989 bis 1993, was vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass die jährlichen Niederschlagsmengen (Wetterstation Wörrstadt) während des ersten Messzeitraumes höher lagen als das langjährige Mittel. Während der zweiten Messkampagne entsprachen die Jahresniederschläge dem langjährigen Mittel bzw. lagen sogar darunter. Die Versetzungsbeträge während dieser Zeit waren deutlich geringer als im Vergleich zur ersten Messkampagne. Die Bewegungen lassen auf langsames, überwiegend oberflächennahes Hangkriechen schließen.

Die Messergebnisse der Bewegungsmesspegel deuteten auf generelle Bewegungen zwischen Oktober 1987 und Juni 1988 hin. Der Messpegel, der sich inmitten der Rutschung befand, zeigte eine Hauptbewegung zwischen Dezember 1987 und Januar 1988 mit einer Lageveränderung von 2,71 m abwärts und einer Absenkung von 0,42 m an. Die Korrelation dieser Bewegung mit den Niederschlagsdaten der Wetterstation Bad Kreuznach ergab, dass zu diesem Zeitpunkt ein deutlicher Anstieg des Monatsniederschlags um das Dreifache von Dezember 1987 auf Januar 1988 zu verzeichnen war. Im April 1988 musste dieser Pegel aufgrund großer Rutschungsbewegungen aufgegeben werden. Die Niederschlagsdaten ließen erkennen, dass die Monate zuvor sehr niederschlagsreich waren. Nach Juni 1988 wurden an den Messpunkten nur noch geringfügige Bewegungen beobachtet. Auch die Niederschlagsdaten zeigten, dass die Monate nach dem Juni 1988 geringere Niederschlagsmengen aufwiesen als die Monate zuvor (BARTHEL, 1989).

## 8 Weitere Fallbeispiele

Die im Folgenden dokumentierten Fallbeispiele aus Niedersachsen, Baden-Württemberg und Hessen sind prinzipiell für eine nähere Betrachtung und Analyse bezüglich einer Abschätzung der möglichen Zunahme von Böschungsrutschungen vor dem Hintergrund der zukünftigen Klimaentwicklung ebenso geeignet wie die zuvor beschriebenen Bei-

spiele, allerdings müssten noch weitere relevante Daten zusammengetragen werden, was innerhalb dieses Projektrahmens nicht realisierbar war. Die Beispiele finden trotz allem in diesem Bericht, gemäß den jeweils vorliegenden Unterlagen, ihre Erwähnung, da sie aufgrund ihrer geografischen Lage und ihrer Geologie das Aufzeigen von weiteren regional-typischen Unterschieden ermöglichen und daher von großem Interesse sind.

Neben diesen Fallbeispielen konnten auch noch Unterlagen zu weiteren, bundesweit verteilten Beispielen, so aus dem Saarland, der Wellenkalk-Schichtstufe des Thüringer Beckens, der Schichtstufenlandschaft der Schwäbischen Alb sowie dem Rheinischen Schiefergebirge und der Hügellandschaft in Rheinland-Pfalz, beschafft und gesichtet werden. Diese Untersuchungsbeispiele wurden bereits in früher Zeit mit klimatischen Einflussgrößen korreliert und deren Einfluss zu den jeweiligen Schadensereignissen hergestellt, wodurch die Voraussetzung für eine bundesweite Betrachtung in Hinblick auf die Abschätzung für ein mögliches zukünftiges Rutschungsrisiko gegeben wäre.

## 8.1 Böschungsrutschung bei Scheden

Die Schadensstelle liegt in Südniedersachsen im Bereich der Bundesstraße B 3, die die Städte Göttingen im Nordosten und Hannoversch Münden im Südwesten verbindet. Die Fahrbahnrrutschung ereignete sich im Jahr 2003 zwischen Scheden und Volkmarshausen im Streckenabschnitt km 23,140 „Schedetal“ (STEGING, 2005).

Der von der Rutschung betroffene Streckenabschnitt der B 3 befindet sich im südlichen Randbereich des nord-süd-verlaufenden Solling-Gewölbes zwischen Münsterländer Kreidemulde im Westen, Hessischer Senke im Süden, Hilsmulde im Norden und Eichsfeldscholle im Osten.

Das Schedetal ist mit seinen Talflanken und den sich anschließenden Hochflächen aus Festgesteinen des Mittleren Buntsandsteins aufgebaut, die anstehend, teilweise verwittert, teils entfestigt sind oder eine wechselnd mächtige bis geringmächtige Überdeckung aus Verwitterungsprodukten in situ aufweisen.

Der mittlere Buntsandstein ist stratigrafisch gesehen aus der Solling-Folge, der Hardeggen-Folge,

der Detfurth-Folge und der Volpriehausen-Folge aufgebaut. Der Rutschungsbereich befindet sich in der bis zu etwa 100 m bis 120 m mächtigen Hardeggen-Folge, einer Wechselfolge aus dünn- bis dickplattigen, teils dünnbankigen, mürben Ton-, Schluff- und Sandsteinen und einer bankigen Sandsteinfolge an der Basis (STEGING, 2005).

Die überwiegend im Böschungsschulter-Bereich der talseitigen Fahrbahnrböschung ausgeführten Kleinbohrungen zur Erkundung und Beurteilung der vorliegenden Baugrundverhältnisse zeigen, dass im Untersuchungsbereich vom Hangenden zum Liegenden unter dem Straßenaufbau eine Aufschüttung von etwa 1,0 m bis 1,6 m, unterlagert von einem im Böschungsfußbereich 1,0 m bis 2,9 m mächtigem Hanglehm, einem Verwitterungsprodukt des Buntsandsteins und schließlich einem Verwitterungslehm (Hangschutt) von 0,6 m bis 1,8 m Mächtigkeit, vorliegt (STEGING, 2005).

Die geschichteten und gut geklüfteten Gesteine des mittleren Buntsandsteins stellen den Hauptgrundwasserleiter im Untersuchungsgebiet dar. Die tonigen Schichten oder Ton- und Schluffsteinlagen zeigen im Gegensatz zum geschichteten und geklüfteten Sandstein eine wasserstauende Wirkung, was sich positiv auf das Wasserspeichervermögen auswirkt.

Zwischen den Ortschaften Scheden bzw. Mielenhausen im Nordosten und Volkmarshausen im Westen verläuft die B 3 den morphologischen Gegebenheiten folgend weitestgehend höhen-parallel entlang des steil nach Norden bis auf Höhen von mehr als 300 m ü. NN ansteigenden Böschungsbereichs des überwiegend ost-west-streichenden „Schedetals“. Der etwa 50 m breite Talboden erstreckt sich im Osten auf einem Höhenniveau von etwa 170 m ü. NN und fällt Richtung Westen auf etwa 160 m ü. NN ab (STEGING, 2005).

Geografisch gesehen bildet das Schedetal die südliche Begrenzung der sich von Bursfelde im Norden und Volkmarshausen im Süden östlich der Weser erstreckenden Hochfläche des Bramtals.

Das Schedetal ist durch seine steil aufsteigenden nördlichen und südlichen Talflanken gekennzeichnet, die zusammen mit den sich anschließenden Hochflächen zum größten Teil mit Buchenmischbestand bewaldet sind und forstwirtschaftlicher Nutzung unterliegen (STEGING, 2005).

Im Tal findet man vorrangig aufgrund der feuchten bis nassen Bodenverhältnisse Feuchtwiesen mit leichter Buschbestockung und Erlenbewuchs sowie Sumpfpflanzen. Die talseitige Fahrbahnböschung ist mit Buschbestockung und Baumbestand unterschiedlicher Spezies und unterschiedlichen Alters bewachsen.

Am Morgen des 04. Januar 2003 ereignete sich auf der Bundesstraße B 3 von Scheden nach Volkmarshausen eine Fahrbahnruhrschung im Streckenabschnitt km 23,140 „Schedetal“. Dabei ist auf einer Länge von etwa 12,0 m und einer Breite von etwa 2,5 m der komplette Fahrbahnaufbau mit Böschung und vorhandenem Bewuchs talseitig ins Schedetal abgerutscht (STEGING, 2005).

Im Bereich der Schadenstelle wurde ein böschungsseitiger Wasserzutritt unterhalb verbliebener Fragmente des bituminös gebundenen Fahrbahnoberbaues festgestellt. Dies lässt darauf schließen, dass nach vorangegangenen heftigen Niederschlägen ein Versagen des wassergesättigten Unterbaues als Schadensursache zu sehen ist.

Unter Vollsperrung der B 3 im Bereich des Fahrbahnabschnittes von km 23,130 bis km 23,157 wurde die Rutschung komplett saniert. Dabei wurden die Rutschmassen entfernt und der Straßenkörper mit talseitiger Böschung mit gebrochenem scherfestem Felsmaterial in der Wirkungsweise eines „Schwerlastfilters“ mit eingebauten Dränsträngen wieder hergestellt.

Als primäre Ursache für die spontan ausgelöste Fahrbahnruhrschung an der B 3 werden die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse angesehen. Die Wirkung des Wassers stellte das auslösende Moment dar. Als sekundäre Ursache werden die witterungsbedingten Gegebenheiten vor dem Schadenseintritt gesehen (STEGING, 2005).

Die Auswertung der Niederschlagsdaten der Station Bühren des Deutschen Wetterdienstes für die Monate Oktober bis Dezember 2002 zeigt eine um etwa 73 % höhere Niederschlagsrate gegenüber dem langjährigen Monatsmittel 1961-1990 (Oktober bis Dezember) (STEGING, 2005).

Aus der hohen Niederschlagsrate vor dem Ereignis und den daraus resultierenden höheren Wasserabflussraten ist eine extreme Vernässung des wasserempfindlichen Fahrbahnunterbaues erreicht worden. Diese führte dann im Januar 2003 zu einer deutlichen Verringerung der Scherfestigkeit des Bo-

dens und somit zum Auslösen der Rutschung (STEGING, 2005).

## 8.2 Großschollenruhrschung Wildenberger Hang

Etwa 1,5 km nordöstlich des Autobahnkreuzes Weinsberg A 81/A 6 befindet sich der Wildenberger Hang, dessen nördlicher Böschungsfuß von der Bundesautobahn A 81 Heilbronn–Würzburg gequert wird. Im Zuge des Autobahnbaus in den Jahren 1968 bis 1972 wurde die Böschung mit Einschnitten im Gipskeuper angeschnitten (WALLRAUCH, 1989).

Der Wildenberger Hang wird von Schichten des Gipskeupers, Mergelsteinen mit Gipszwischenlagen, aufgebaut. Das für die Region typische flach geneigte Dach der Höhenzüge bildet der Schilfsandstein.

Die Kombination der verwitterungsanfälligen Mergelsteine und der auslaugungsfähigen Gips- (und Anhydrit-)einschlüssen mit einer geklüfteten und zum Tal hin geneigten Schichtung sind für die Herabsetzung der Scherfestigkeit verantwortlich. Aufgrund der Ablaugungen im Gipskeuper kommt es zu Mächtighkeitsreduktionen von bis zu 25 %, wobei das größte Massendefizit am Böschungsfuß anzutreffen ist.

Der Wildenberg ist ein etwa 2,5 km in Ost-West-Richtung verlaufender und 120 m über die Talniederungen liegender Höhenzug des nördlichen Heilbronner Keuperberglandes zwischen den Ortschaften Eberstadt und Hölzern im Norden sowie Grant-schen und Wimmmental im Süden.

Vom Eberbach im Norden bis zum Waldrand, der unmittelbar bergwärts der A 81 beginnt, liegt eine flache, landwirtschaftlich genutzte Böschung mit sechs Geländerücken in Richtung Böschungsneigung. Fünf davon werden von der Autobahn zwischen dem Weinsberger Kreuz und Hölzern in Anschnitten und einem Einschnitt gequert. Die Böschung steigt bis auf 315 m ü. NN an und wird oberhalb des Verkehrsweges forstwirtschaftlich genutzt. Der Südhang des Wildenberg mit Weinlagen fällt im Vergleich zum Nordhang mit seinen stufenförmigen Abflachungen und zum Teil Böschungen mit 40° Neigung flacher ab.

Im Zuge des Autobahnbaus wurde durch die Erdarbeiten eine eiszeitliche Großschollenruhrschmasse

im westlichen Teil des Wildenbergs an ihrem Fußbereich auf der gesamten Länge geringfügig angeschnitten. Die aus mehreren Teilschollen bestehende Großrutschung mit einer Fläche von etwa 45 ha hat eine Länge von etwa 1,5 km.

Zur Zeit des Eingriffs in den Gipskeuperhang waren ausschließlich Kriechbewegungen in den Deckschichten und in tiefer reichenden Teilschollen nachweisbar (WALLRAUCH, 1989). Mit Ausnahme eines markanten Hauptabrisses an der Böschungskante des Schilfsandsteins wurden keine Risse registriert. Im Zuge der Erdarbeiten traten dann Böschungsruutschungen auf (WALLRAUCH, 1989).

Der östliche der beiden großen Einschnitte ist etwa 10 m tief, er besaß Einschnittsböschungen mit einer Neigung von 1:1,5 und war durch zwei Bermen untergliedert. Nach dem Einsetzen der Bodenbewegungen an der bergseitigen Einschnittsböschung wurde diese auf 1:2,5 abgeflacht und in bis zu 15 m tiefen Großschlitzen Drahtschotter-Stützkörper eingebaut. In diesen Schlitzen zeigte die bergwärts einfallende Schichtung sehr deutlich die fossile Rotationsbewegung einer Gipskeuperscholle. Die genannten Sanierungsmaßnahmen waren bei dieser Rutschung erfolgreich, weil die fossilen Bewegungsbahnen tief unter den Fahrbahnen liegen und die ins Tal vorspringenden Ausläufer des Böschungsfußes talwärts der Autobahn ein natürliches Widerlager bilden, das beim Bau der Fernstraße erhalten blieb (WAGENPLAST, 2005).

Im westlichen Einschnitt sind die morphologischen und geologischen Voraussetzungen dagegen ungünstiger. Hier fließt der Eberbach unmittelbar talseitig der Autobahn und die Erosionstätigkeit dieses Baches führte in der erdgeschichtlichen Vergangenheit zu einer Entlastung am Böschungsfuß und zu Rutschungen. Die Autobahn liegt hier etwa 10 m tiefer als am östlichen Einschnitt, weshalb die fossilen Hauptgleitflächen in geringeren Tiefen unter den Fahrbahnen liegen als beim östlichen Einschnitt. Die Entlastung durch den Bodenabtrag verursachte daher eine wesentlich stärkere Störung des natürlichen Gleichgewichts. Die Gleitflächen der fossilen Rutschscholle wurden durch die Erdbaumaßnahmen erneut aktiviert. Durch den Einbau von Sickerstützscheiben und die spätere Abflachung der bergseitigen Böschung auf 1:2,5 konnten die Bodenbewegungen dennoch nicht vollständig zum Stillstand gebracht

werden. Mit Hilfe von Neigungsmesspegeln wurden die Tiefenlagen der Gleitflächen überprüft. Sie verlaufen im Niveau der Autobahn etwa 200 m lang im Bereich des Mittleren Gipshorizonts nahezu horizontal in den Berg hinein und steigen dann bei Überlagerungshöhen von 20 m bis 45 m in Form von mehreren steil geneigten Scherflächen bis zur Geländeoberfläche an. Ein Abriss der Scholle ist am höheren Berghang erkennbar. Die Horizontalverschiebung lag im Jahresdurchschnitt im Zentimeter- bis Dezimeterbereich. Örtlich wurden mehr als 4 m innerhalb von 20 Jahren gemessen. Interessant ist die zeitliche Verzögerung der Rutschbewegungen in Abhängigkeit von den Niederschlagsmengen: Die Verschiebungsgeschwindigkeit erhöhte sich meist etwa drei Wochen nach extrem starken Niederschlägen. Die auch nach den Sanierungsmaßnahmen auftretenden geringfügigen Bodenbewegungen beeinträchtigen jedoch die Verkehrssicherheit nicht (WAGENPLAST, 2005).

Zwischen 1968 und 1981 sind auch deutliche Risse bis Abrisse in der Böschung entstanden, die sich im Laufe der Zeit weiter verstärkt haben. Aus der Zeit vor dem Autobahnbau sind keine Erdrisse bekannt.

Fast alle Risse im gesamten Gelände weiteten sich 1984 und Ende 1988 schubweise auf (WALLRAUCH, 1989).

Der Eingriff verursachte sich progressiv verschlechternde erdstatische Verhältnisse. Es wurden Rutschungen entlastet, die stabilisierend vor deutlich abgesetzten Teilschollen liegen. Dadurch entstanden und entstehen Gebirgsauflockerungen im dm- bis m-Bereich, die Niederschlägen Zugang zu witterungsempfindlichen Mergeln, auslaugungsfähigen Gipslagen und fossilen Gleitflächen verschaffen und somit auch für die fortschreitende Verbreiterung des Schadensgebietes im Rutschareal verantwortlich sind.

Eine technische Stabilisierung ist wegen der großen Ausdehnung des Schadensfalls nicht finanzierbar. Ein Zusammenhang zwischen Bewegungsgeschwindigkeit und Niederschlägen ist nachgewiesen. Die Massenbewegungen führten bereits zu erheblichen Bauschäden, beispielsweise musste ein Parkplatz geschlossen, die Entwässerungsleitung der Autobahn erneuert und ein Brückenbauwerk wegen irreparabler Schäden abgebrochen werden.

### 8.3 Rutschhang Nieder-Gemünden

Das Rutschareal liegt an der Bundesautobahn A 5 Frankfurt–Kassel bei Nieder-Gemünden in Hessen, im nördlichen Vogelsberg (BINARD-KÜHNEL, 2000).

Das Landschaftsbild des Vogelsbergs ist durch den Vulkanismus des Tertiärs geprägt. In Oberflächennähe werden in der Literatur Hangschutte, Basalte, Asche-Tuffite, Asche-Lapilli-Tuffite und im Liegenden Tuffit-Tone, Tone sowie sandige und quarzitische Lagen beschrieben.

Anhand von Bohrungen wurden im Untersuchungsbereich Basalte, Basaltverwitterung, zersetzte Asche-Lapilli-Tuffite, Tuffit-Tone, Quarzite und quarzitisches Sande sowie stellenweise sandfreie Tone ermittelt.

Im Abschnitt Gemünden befinden sich ab km 410+100 nordwestlich der Autobahn Böschungslagen, die sich im labilen Gleichgewicht befinden. Die Autobahn liegt in diesem Bereich auf einer Höhe zwischen 253 m ü. NN und 256 m ü. NN. Böschungsseitig verläuft parallel zur Autobahn ein landwirtschaftlich genutzter Weg. Südöstlich der Autobahn befindet sich der Hirschbach, der auf einer Höhe zwischen etwa 250 m ü. NN und 245 m ü. NN liegt (BINARD-KÜHNEL, 2000).

Bei den Rutscharealen nordwestlich der Autobahn handelt es sich um Kriechhänge, die als solche seit mehreren Jahrzehnten bekannt sind. Bereits in der Nachkriegszeit wurde versucht, durch Entwässerungsmaßnahmen in einer Tiefe von etwa 3,5 m unter GOK in Höhe des landwirtschaftlich genutzten Weges im Böschungsbereich die Böschungsbewegung zu stoppen. Dies gelang so weit, dass im Zusammenhang mit der Nutzung der Autobahn keine Schäden bekannt sind. Die zu dem damaligen Zeitpunkt verlegten Entwässerungssysteme sind inzwischen größtenteils beschädigt und können somit nicht mehr ihren Zweck erfüllen.

Im Zusammenhang mit dem Ausbau der A 5 im Jahre 2000 wurden am Fahrbahnrand Inclinometermessstellen eingerichtet, um mögliche Böschungsbewegungen zu registrieren und zu kontrollieren. Diese wurden teilweise durch Baumaßnahmen an der Strecke zerstört.

Aufgrund der morphologischen Auffälligkeiten in Zusammenhang mit den Inclinometermessungen konnte eine Unterteilung des Abschnittes in zwei

Rutschbereiche, die sich im labilen Gleichgewicht befinden, vorgenommen werden.

Der eine Kriechhang befindet sich zwischen km 410+100 und 410+240 und der andere zwischen km 410+390 und 410+600. Beide Bereiche sind durch eine tiefliegende Gleitscholle und einen oberflächennahen Gleitbereich gekennzeichnet (BINARD-KÜHNEL, 2000).

### 8.4 Rutschung Lißberg-Hirzenhain

Die Rutschung Lißberg-Hirzenhain befindet sich im Bereich der Vogelsbergstraße B 275 bei km 74,150 zwischen Lißberg und Hirzenhain in Hessen (STREIM, 1984).

Im Bereich des Rutschareals befinden sich Basaltgesteine und speziell entlang der Straße Schutt, z. T. in Blöcken, aus basaltischen Gesteinen mit Lehm.

Im Juli 1982 riss die im talseitigen Fahrbahnstreifen der B 275 befindliche Wasserleitung der Stadt Ortenberg, wodurch es zu erheblichen Ausspülungen und Zerstörungen im talseitigen Straßenkörper kam.

Die seit 1979 an der Straße aufgetretenen und bis 1982 zu einem Extremfall angewachsenen Beschädigungen an Straße und Wasserleitung sind auf die Eigenbewegungen des Rutschareals zurückzuführen. Ein Zusammenhang wird zwischen dem Auftreten von Beschädigungen an der Straße und dem Gang der Niederschlagssummen gesehen. Genaue Angaben über die Größenordnung liegen derzeit nicht vor. Auch nach 1982 kam es immer wieder zu Fahrbahnbeschädigungen wie Rissbildungen im Straßenbelag (STREIM, 1984).

## 9 Korrelation Rutschereignisse mit Wetterdaten

Um eine zukünftige Risikoabschätzung möglicher Rutschungshäufigkeiten innerhalb der drei ausgewählten Regionen geben zu können, wurde zunächst eine detaillierte Analyse eines möglichen Zusammenhangs zwischen dokumentierten Rutschereignissen bzw. Ergebnissen von größeren Bewegungsbeschleunigungen und Klimaparametern vorgenommen.

Dafür wurden für jedes der drei ausgewählten Fallbeispiele die vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung stehenden Parameter täglicher Niederschlag und tägliche Tagesmitteltemperatur ( $T_{\text{mittel}}$ ) seit Beginn der Messung bis Ende 2009 der jeweils nächstgelegenen Wetterstation ausgewählt. Für das Beispiel Altmündener Wand wurden die Daten der Wetterstation Göttingen, für Pünderich der Station Bernkastel-Kues und für das Untersuchungsgebiet Wißberg der Station Wolfsheim verwendet.

Für eine weitere Betrachtung und Auswertung wurden die Daten der jeweiligen Wetterstation zunächst aufbereitet und die einzelnen Schadensereignisse mit den folgenden rutschungsrelevanten Parametern korreliert:

- Jahresniederschlagssumme (Schadensjahr sowie die beiden Jahre zuvor),
- Niederschlagssumme des Winter- (Oktober bis März) und Sommerhalbjahres (April bis September),
- Monatsniederschlag (Schadensmonat sowie zwei bis drei Monate zuvor),
- Tagesmitteltemperaturen des Schadensmonates als auch des Monats zuvor.

Zudem wurden Ereignisse mit Angabe des Kalendertages explizit auch hinsichtlich der Tagesniederschläge (Starkniederschlagsereignisse) sowie der Tagestemperaturen vor und zum Zeitpunkt des Schadenseintrittes näher analysiert.

Bei der Datenanalyse wurden die Klimaparameter Jahresniederschlagssumme, monatliche Niederschlagssumme und gemittelte Niederschlagssumme des Winter- und Sommerhalbjahres in Relation zum jeweiligen langjährigen Mittel (1961-1990) gestellt und ausgewertet.

Die wichtigsten Ergebnisse der Analyse für jedes der drei Rutschareale werden nachfolgend zusammengefasst.

Für eine vereinfachte grafische Darstellung hinsichtlich der Korrelation des Schadenszeitpunktes mit der jeweiligen Witterungsbedingung wurden die Niederschlagsparameter Jahresniederschlagssumme und Niederschlagssumme des Winterhalbjahres ausgewählt, da ihnen hinsichtlich der Rutschungsrelevanz eine große Bedeutung zukommt. So sind Jahresniederschlagssummen als auch Niederschlagssummen der Winterhalbjahre jeweils als

Abweichung vom jeweiligen langjährigen Mittel (1961-1990) dargestellt. Letzteres ist auch als 10-jährig gleitendes Mittel sowohl für das Kalender- als auch das meteorologische Jahr in den entsprechenden Grafiken illustriert (Bild 20 bis Bild 23).

Die gemittelten Niederschläge der Sommerhalbjahre wurden bei der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt, da sie in allen drei Beispielen keine rutschungsrelevanten Abweichungen gezeigt haben, d. h., sie liegen größtenteils unterhalb des langjährigen Mittelwertes.

### Fallbeispiel Altmündener Wand

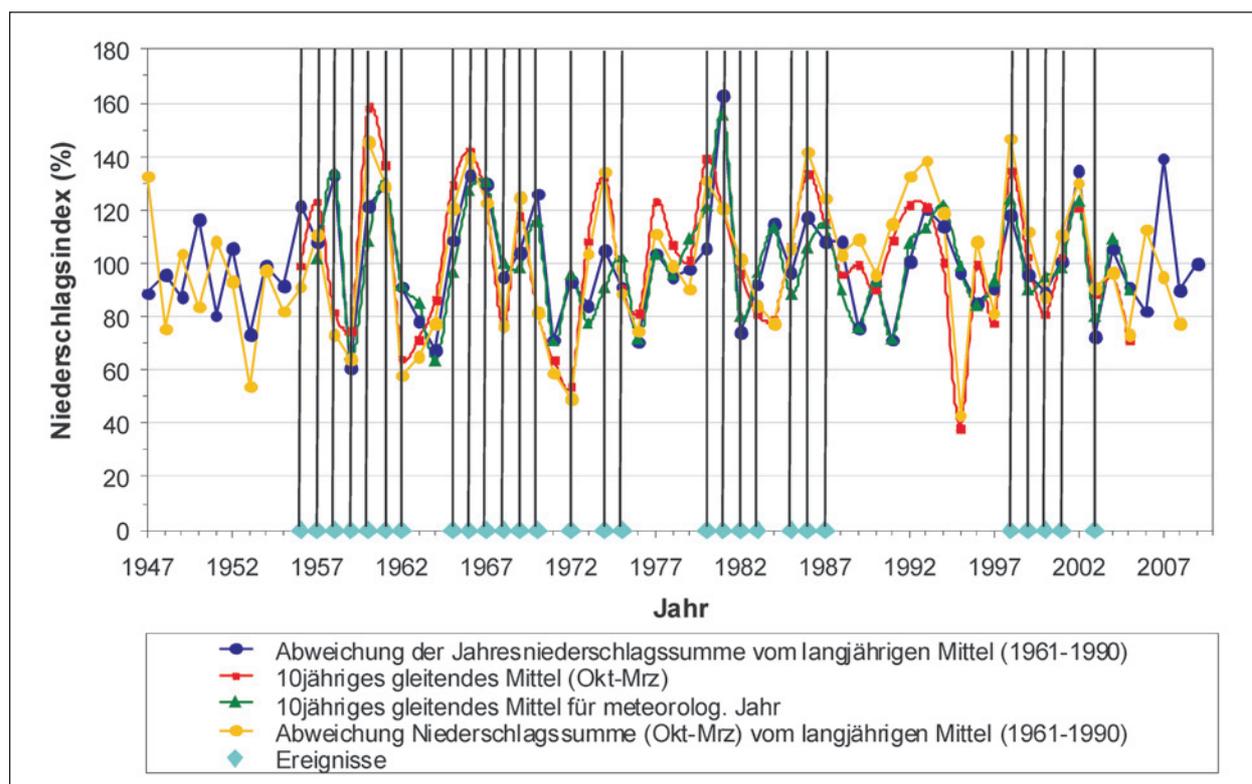
Das Fallbeispiel Altmündener Wand ist hinsichtlich der Schadenereignisse wohl am besten dokumentiert, da es aufgrund seiner zentralen Lage direkt an der Straße und nahe der Stadt Hannoversch Münden schon immer große Aufmerksamkeit erhielt und daher umfangreiche Dokumentationen vorliegen.

Die Analyse der Witterungsbedingungen hinsichtlich der Rutschereignisse (Bild 20) ergab, dass die Jahresniederschlagssumme ein bis zwei Jahre zuvor als auch im Rutschungsjahr im Vergleich zum langjährigen Mittel 1961-1990 mit Abweichungen zwischen 7 % und 33 % deutlich höher lag als während Perioden ohne Rutschereignisse. Im Jahr 1981 überstieg die Niederschlagssumme das langjährige Mittel sogar um mehr als 60 %. Auch spielten die Niederschläge im Winterhalbjahr eine ausschlaggebende Rolle. So zeigten die gemittelten Niederschlagssummen Abweichungen bis zu 46 %.

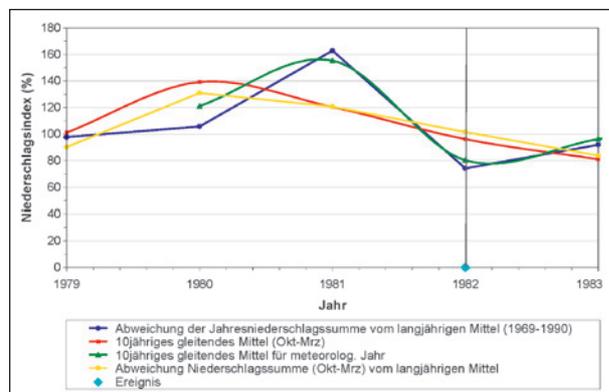
In Bild 21 ist exemplarisch das Schadensjahr 1982 ausgewählt worden und hinsichtlich der Niederschlagssituation im Schadensjahr als auch ein bis zwei Jahre zuvor dargestellt.

Der Einfluss von hohen Niederschlagssummen der vorangehenden ein bis zwei Monate sowie der jeweils betroffenen Monate auf das Auslösen von Schadensereignissen war auch deutlich erkennbar. So zeigten die Niederschlagssummen in Hinblick auf das jeweilige langfristige Monatsmittel Abweichungen von 45 % bis 100 %.

Bei der Korrelation der Rutschereignisse und der Starkniederschlagsereignisse konnte ebenso ein Zusammenhang hergestellt werden. Es wurden zum Beispiel tägliche Niederschlagsintensitäten von bis zu 23 mm zwei bis drei Tage vor einem Schadenseintritt gemessen oder aber auch ein Nie-



**Bild 20:** Fallbeispiel Altmündener Wand. Korrelation der Niederschlagsparameter der Wetterstation Göttingen mit den Schadensereignissen



**Bild 21:** Korrelation der Niederschlagsparameter mit dem Schadensereignisjahr 1982. Dargestellt sind auch die drei Jahre vor dem Ereignisjahr

erschlag von  $p \geq 20,6$  mm unmittelbar am Tag eines Ereignisses. Auftretender Frost-Tau-Wechsel, d. h. länger anhaltende Frosttage mit anschließendem deutlichem Temperaturanstieg, vor einem Schadensereignis war bei einigen der Beispiele höchstwahrscheinlich ein mit auslösender Faktor.

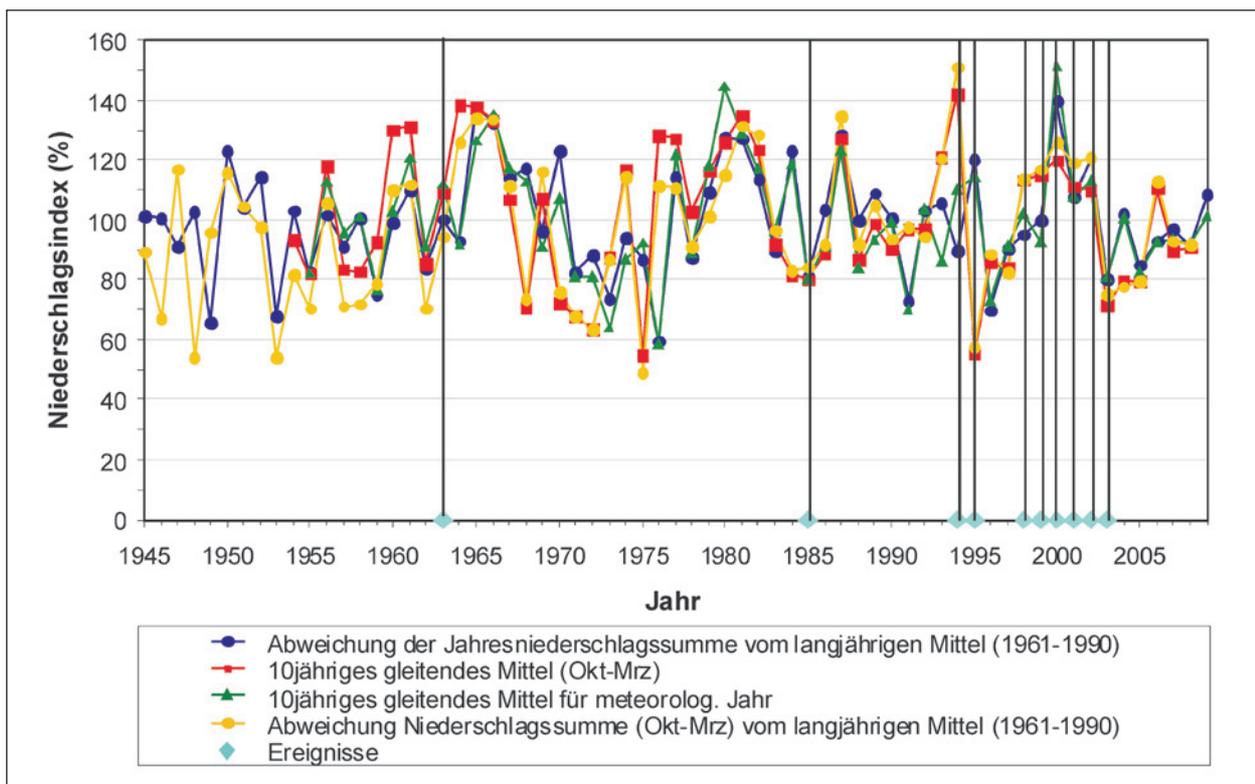
### Fallbeispiel Pünderich

Die Korrelation der Schadensereignisse bzw. der gemessenen Bewegungsbeschleunigungen mit den Witterungsbedingungen ergab für Pünderich

(Bild 22) ein anderes Bild als für die Altmündener Wand. Im Fall von Pünderich stellte sich bei der Analyse der Daten heraus, dass die Rutschungen zwar mit höheren Jahresniederschlägen im Schadensjahr als auch ein bis zwei Jahre zuvor im Vergleich zum langjährigen Mittel 1961-1990 sowie mit höheren Niederschlägen im Winterhalbjahr in Verbindung stehen, aber sowohl die Starkniederschlagsereignisse im Winter- und Sommerhalbjahr als auch die Frost-Tau-Wechsel keinen direkten Einfluss auf die Bewegungsbeschleunigungen des Rutschareals genommen haben.

Die Niederschlagssummen ein bis zwei Jahre zuvor zeigten zum langjährigen Mittel Abweichungen von 8 % bis 50 %. Auch die gemittelten Niederschläge des Winterhalbjahres liegen mit Abweichungen von 13 % bis 51 % deutlich höher. Die Betrachtung der einzelnen Monatsniederschläge vor und zum Zeitpunkt eines Ereignisses bzw. der registrierten Bewegungsbeschleunigung übersteigen mit 22 % bis sogar 318 % deutlich die jeweiligen langjährigen Monatsmittelwerte.

Allerdings bestand bzw. besteht, wie bereits erläutert, auch ein Zusammenhang zwischen den Bewegungsbeschleunigungen und den Wasserstandsänderungen der Mosel. Bewegungsbeschleunigungen



**Bild 22:** Fallbeispiel Pünderich. Korrelation der Niederschlagsparameter der Wetterstation Bernkastel-Kues mit den Schadensereignissen

waren vornehmlich bei größerem (Pegelstand oberhalb 500-cm-Marke) und länger anhaltendem Moselhochwasser eingetreten, welches auf überregionale hohe Niederschläge zurückzuführen ist.

Bei der Korrelation von Rutschereignissen mit Klimatelementen spielen immer die Tiefenlage der Gleitfläche und die Beschaffenheit der Überdeckung eine maßgebliche Rolle.

Die Betrachtung eines singulären Parameters kann vor dem Hintergrund der komplexen Zusammenhänge somit immer nur eine grobe Abschätzung bleiben.

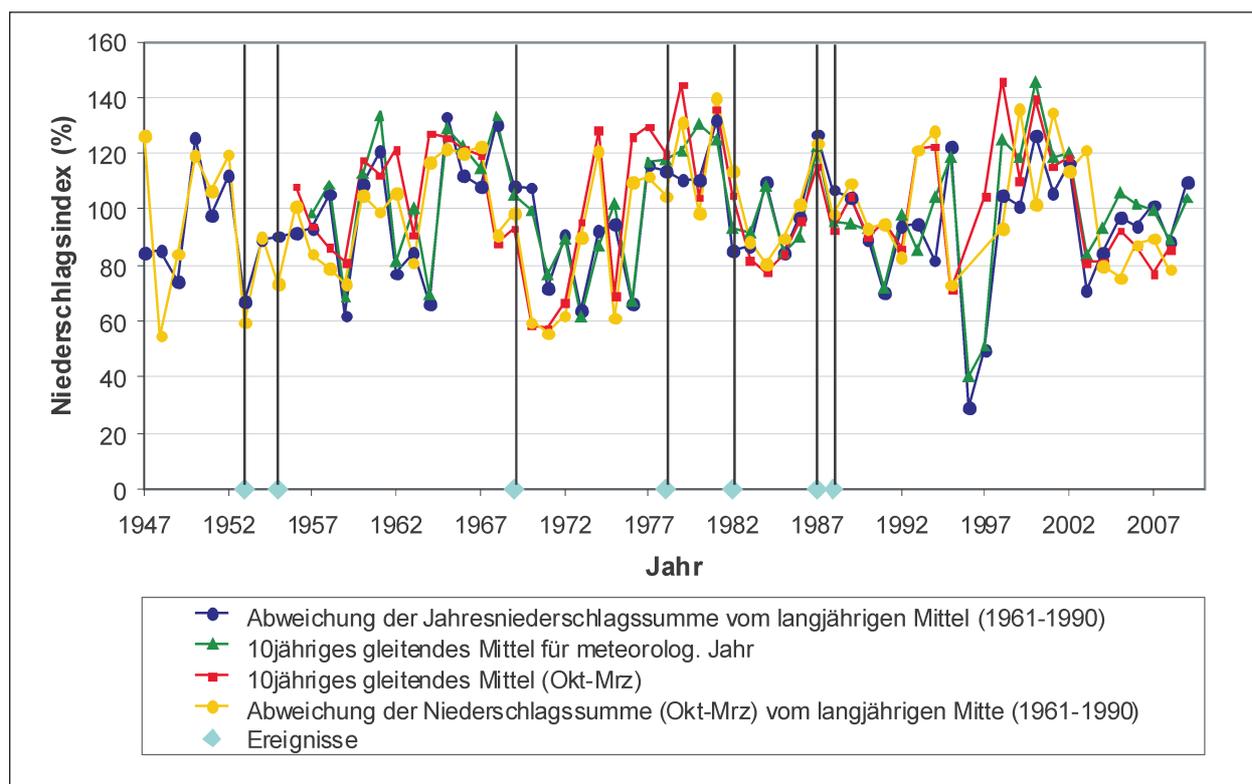
#### Fallbeispiel Wißberg

Die Analyse der Witterungsverhältnisse vor und zum Zeitpunkt der einzelnen Rutschereignisse (Bild 23) zeigte ähnlich wie im Beispiel Altmündener Wand einen Zusammenhang mit hohen Niederschlägen sowohl im Schadensjahr als auch ein bis zwei Jahre zuvor sowie auch im Schadensmonat und den ein bis zwei vorangegangenen Monaten. Auch den Frost-Tau-Wechseln ist hinsichtlich des Eintretens der Schadensereignisse eine bedeutende Rolle zuzuschreiben.

Die Abweichungen der Jahresniederschlagssummen der Jahre zuvor lagen mit 8 % bis 32 % über dem langjährigen Mittel. Auch die winterhalbjährlichen Niederschlagssummen zeigten Abweichungen von 6 % bis 40 % vom langjährigen Mittel. Die Niederschlagssummen der vorangegangenen ein bis zwei Monate als auch des Schadensmonats selbst besaßen entsprechend dem langjährigen Monatsmittel sogar Abweichungen von 37 % bis 148 %.

Die Frost-Tau-Wechsel in Verbindung mit ergiebigen Niederschlägen waren ausschlaggebend für die Verursachung von einigen Rutschereignissen. Gerade im Rutschungsjahr 1981/82 kam es nach einer längeren Frostperiode Mitte Dezember 1981 mit etwa 13 Tagen unter 0 °C zu einem deutlichen Temperaturanstieg bis auf 10 °C Ende Dezember 1981 und Anfang Januar 1982, woraufhin unmittelbar danach die bereits in vielen Publikationen beschriebene Rutschungsphase von mehreren 100 Rutschungen einsetzte.

Ein direkter Einfluss von Starkniederschlagsereignissen auf die dokumentierten Rutschungen konnte nicht ausgemacht werden. Allerdings ist in Rheinhessen neben den Rutschungen im Winter/Frühling generell eine Rutschungshäufigkeit auch in den



**Bild 23:** Fallbeispiel Wißberg. Korrelation der Niederschlagsparameter der Wetterstation Wolfsheim mit den Schadensereignissen

Sommermonaten zu beobachten. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei auftretenden Gewitterregen potenzielle Gleitflächen aufgrund der durch extreme Trockenheit entstandenen Schrumpfrisse bindiger Schichten gezielt bewässert werden und somit Rutschungen unmittelbar ausgelöst werden können. Schrumpfrisse mit einer Öffnungsweite von 10 cm sind noch in 4 m Tiefe aus dem Tertiär in Rheinhessen bekannt (STEINGÖTTER, 1984).

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Grafiken der drei Fallbeispiele zeigen, dass bei den meisten Schadensereignissen bzw. den gemessenen Bewegungen im Vergleich zum jeweiligen langjährigen Mittel größere Jahresniederschlagssummen und winterhalbjährliche Niederschläge im Schadensjahr sowie ein bis zwei Jahre zuvor gemessen wurden.

Das bekannte Rutschungsjahr 1981/82, dem eine deutliche Abweichung der Jahresniederschläge vom langjährigen Mittel vorausgeht, ist in den Grafiken der Fallbeispiele Altmündener Wand und Wißberg als deutliches Kurvenmaximum der Jahresniederschlagssummen zu erkennen. Eine Dokumentation über diese Zeitperiode liegt für das Fallbeispiel Pünderich nicht vor.

Bei der Betrachtung der Schadensereignisse in Hinblick auf die Niederschlagsdaten ist allerdings zu berücksichtigen, dass möglicherweise hinsichtlich fehlender Dokumentation der Schadensereignisse Datenlücken bestehen können.

## 10 Regionales Klimamodell REMO

Die Klimaänderungen werden sich weltweit in großer Streubreite der variierenden Klimaelemente auswirken. In küstennahen Regionen werden sich die beeinflussenden Faktoren beispielsweise anders auswirken als in Niederungen oder Gebirgsregionen. Die geografische Breite, die Kontinentalität etc. spielen eine große Rolle. In Deutschland wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg u. a. die dynamisch-numerische Modellkette REMO (Regional Modelling of Present and Future Climate) entwickelt. Dieses Modell ermöglicht die Berechnung eines regionalen Klimas, basierend auf den globalen Informationen unter Berücksichtigung der lokalen und regionalen Gegebenheiten (JACOB et al., 2008). Demnach ist schon in näherer Zukunft mit höheren Temperaturen, veränderten Niederschlagsverhältnissen und längeren Hitzepe-

rioden zu rechnen, mit erheblichem Anstieg gegen Ende dieses Jahrhunderts. Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen mit einer Auflösung von 10 km x 10 km und den daraus resultierenden 13.189 Gitterboxen stellt das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg zur Verfügung.

Um Klimaprojektionen für die Zukunft rechnen zu können, müssen Annahmen über die möglichen Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre, die durch ihre Strahlungseigenschaften klimawirksam ist, gemacht werden. Dazu sind im Rahmen des Intergovern-Mental-Panel-on-Climate-Change-(IPCC-)Prozesses Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100 basierend auf unterschiedlichen Annahmen zu dem demografischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel entwickelt worden. Den für den 4. Sachstandsbericht des IPCC ausgewählten Emissionsszenarien liegen auch unterschiedliche sozio-ökonomische Annahmen zugrunde.

Die Szenarienfamilie A1 beschreibt eine künftige Welt mit sehr raschem wirtschaftlichem Wachstum, einer Weltbevölkerung, die Mitte des 21. Jahrhunderts zahlenmäßig ihren Höhepunkt erreicht und danach abnimmt, und der raschen Einführung von neuen und effizienteren Technologien. Die wichtigsten Grundannahmen sind die Annäherung der Regionen, der weltweite Aufbau von erforderlichem Know-how und zunehmende kulturelle und soziale Interaktionen, mit einer erheblichen Verminderung der regionalen Differenzen im Pro-Kopf-Einkommen. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich durch ihren jeweiligen technologischen Schwerpunkt: intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (A1FI), nicht-fossiler Energiequellen (A1T) oder Ausgeglichenheit über alle Energieträger hinweg (A1B) (JACOB et al., 2008).

Für dieses Forschungsvorhaben wurden die Klimaprojektionsdaten des Szenariolaufes A1B verwendet, welches ein relativ moderates Szenario darstellt und keine extreme Entwicklung voraussagt.

## 11 Anwendung der modellierten Klimadaten

Das Klimamodell REMO liefert keine genaue Abbildung des tatsächlichen Wettergeschehens (Prognose), sondern stellt ein projiziertes Klima dar, welches statistisch gesehen, also in der Betrachtung

mittlerer Jahresgänge, langjähriger Mittelwerte, Häufigkeitsverteilungen etc., dem realen Klima entspricht.

Generell muss befürchtet werden, dass die potenzielle Gefahr einer höheren Rutschungswahrscheinlichkeit in einem feuchter werdenden Klima sich verstärkt auf das Bundesfernstraßennetz auswirken wird.

Zunächst müssen zur Verifizierung dieser Annahme noch Niederschlags- und Temperaturdaten (Beobachtungsdaten) für eine Abschätzung hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit von Rutschungen herangezogen werden, indem Rutschereignisse der Vergangenheit mit den entsprechenden Wetterdaten korreliert werden.

Die Ergebnisse aus der Korrelation mit den Beobachtungsdaten müssen dann mit den Klimamodelldaten für heutiges Klima, dem Kontrolllauf, verglichen werden. Der Vergleich gibt einen Anhaltspunkt, wie gut die Modelldaten das heutige Klima bzw. die benötigten Klimavariablen abbilden.

Der anschließende Vergleich der Daten aus dem Kontrolllauf mit den Klimamodelldaten für zukünftiges Klima, dem Szenariolauf, ermöglicht Aussagen über den Einfluss der simulierten Klimaänderung auf das prognostizierte Rutschungsrisiko, unabhängig von möglichen systematischen Abweichungen zwischen Beobachtungen und Modell.

Da sowohl Natur als auch Modell eine dekadische Variabilität besitzen, es also in einem eher warmen Klimazustand durchaus auch eine kalte Periode geben kann oder umgekehrt, wird für die Klimabetrachtung das durchschnittliche Wetter über eine Zeitperiode von mindestens 30 Jahren herangezogen. So wurde in diesem Forschungsvorhaben für eine erste Trendbetrachtung der 30-jährige Referenzzeitraum 1961 bis 1990 gewählt und dieser mit den beiden 30-jährigen Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 für zukünftiges Klima verglichen.

## 12 Verwendete Klimaparameter

Sowohl aus der Erfahrung heraus als auch durch gut dokumentierte Ereignisberichte wird das Auslösen von Massenbewegungen oftmals in Zusammenhang mit bestimmten Niederschlags- und Temperaturbedingungen gebracht. Aus diesem Grund

wurden die folgenden Parameter in Hinblick auf niederschlagsreiche Zeitperioden, hohe Niederschlagsintensitäten, Frosttage/-perioden etc. sowohl für den Kontroll- als auch den Szenariolauf ausgewählt:

- Niederschlag – monatliche Summe.
- Niederschlag – Tage pro Monat mit  $p > 20$  mm.
- Temperatur – Tage pro Monat mit  $T_{\text{mittel}} \leq 0$  °C.
- Temperatur – längste zusammenhängende Anzahl an Tagen mit  $T_{\text{mean}} < -5$  °C.

Die Klimadaten (im ASCII-Format) sowie die geografischen Koordinaten der 13.189 Gitterboxen bzw. deren Mittelpunkte mit ihren jeweiligen Höhenangaben wurden vom Forschungsgeber zur Verfügung gestellt.

Da die Datensätze für die einzelnen Klimaparameter jeweils alle Daten für jede einzelne Gitterbox beinhalten – was zu einem sehr großen Datenvolumen von bis zu 15.826.800 Datensätzen führt –, wurden Datenbanken erstellt, um nur die für die Betrachtung relevanten Daten von ausgewählten Gitterboxen herauszufiltern.

Für die Betrachtung der zukünftigen klimatischen Entwicklung in der jeweiligen Region der Fallbeispiele wurden die vier Gitterboxen ausgewählt, die das jeweilige Fallbeispiel umschließen. Die Niederschlags- und Temperaturwerte der einzelnen Gitterpunkte wurden aus der Datenbank abgefragt und die einzelnen Werte zu einem Gebietsmittel zusammengefasst, welches dann für die weitere Auswertung verwendet wurde.

Für eine erste Trendanalyse hinsichtlich der klimatischen Entwicklung wird im späteren Verlauf der 30-jährige Zeitraum aus dem Kontrolllauf als Referenzzeitraum (langjähriges Mittel) mit 30-jährigen Zeiträumen aus dem Szenariolauf verglichen. Die jeweiligen prozentualen Abweichungen (Kapitel 11) stellen schließlich den klimatischen Änderungswert dar. In Hinblick auf die Signifikanzbetrachtung dieser Werte erhalten Abweichungen, die über dem oft gewählten Signifikanzniveau von 5 % (ENZMANN, 2011) liegen, in Bezug auf ihren rutschungsauslösenden Faktor einen höheren Stellenwert.

### 13 Korrelation von Beobachtungs- und Modelldaten

Für den Vergleich der Beobachtungsdaten (DWD-Daten) mit den Daten des Kontrolllaufes wurden zunächst die Parameter tägliche Niederschlagssumme und mittlere Tagestemperatur der nächstgelegenen Wetterstationen für jedes Fallbeispiel vom Deutschen Wetterdienst angefordert.

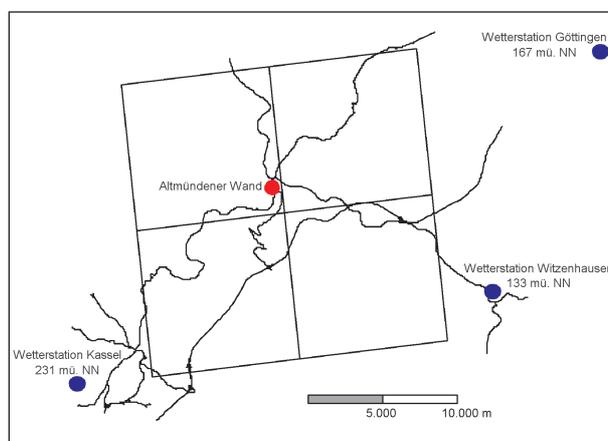
Für die Altmündener Wand waren dies die Stationen Kassel, Witzenhausen und Göttingen (Bild 24).

Die Wetterstationen Bernkastel-Kues und Kinheim wurden für das Fallbeispiel Pünderich herangezogen (Bild 25) und für das Beispiel Wißberg die Stationen Wolfsheim, Alzey und Wörrstadt (Bild 26).

Die Beobachtungsdaten mussten entsprechend den folgenden ausgewählten Parametern des Klimamodells aufbereitet werden:

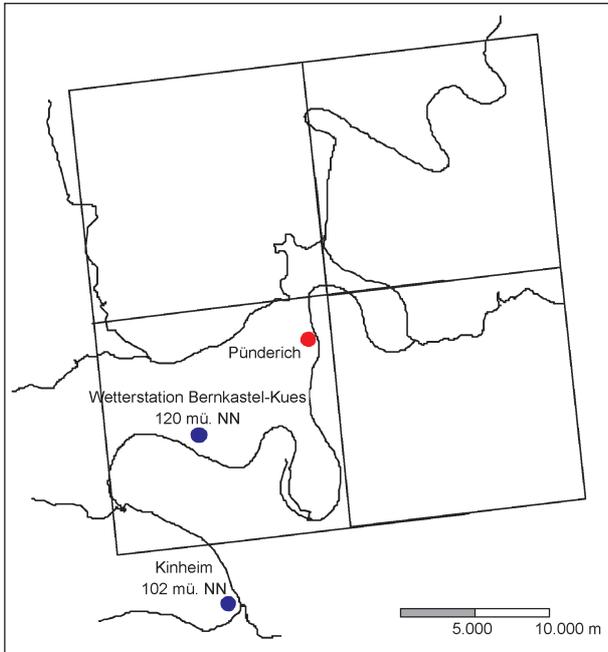
- Niederschlag – monatliche Summe.
- Niederschlag – Tage pro Monat mit  $p > 20$  mm.
- Temperatur – Tage pro Monat mit  $T_{\text{mittel}} \leq 0$  °C.
- Temperatur – längste zusammenhängende Anzahl an Tagen mit  $T_{\text{mean}} < -5$  °C.

Eine Höhenkorrektur der Temperaturbeobachtungen musste nicht vorgenommen werden, da die Höhe der Messstationen mit der zugehörigen Höhe im Modell annähernd übereinstimmt. Klassischerweise nutzt man für die Höhenkorrektur einen konstanten Gradienten von etwa 0,64 °C/100 m.

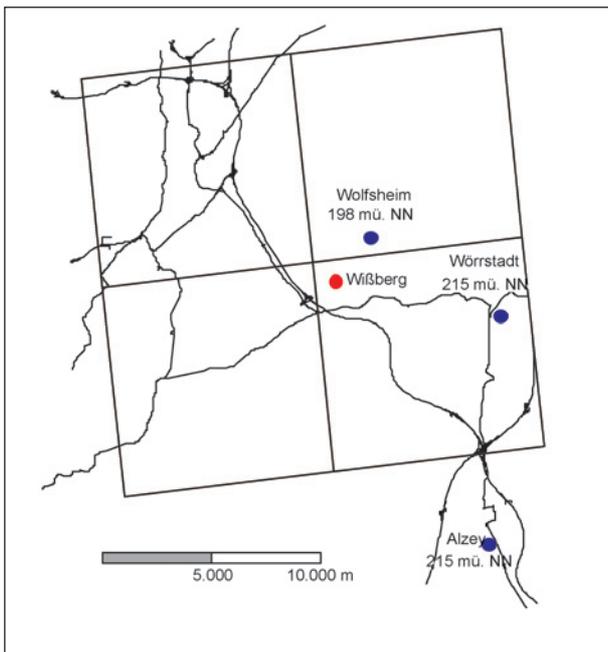


**Bild 24:** Übersicht der Wetterstationen des DWD für das Fallbeispiel Altmündener Wand. Dargestellt wird die Lokation der Wetterstationen mit ihren jeweiligen Höhenlagen, die für die Analyse verwendeten Gitterboxen und das Bundesfernstraßennetz

Das Klimamodell benutzt für den Kontrolllauf die beobachteten Treibhausgaskonzentrationen. Laut dem Infoblatt Hinweise für REMO-Datennutzer des MPI stellt dieser das heutige Klima nur im Mittel dar, das Wettergeschehen kann somit nicht direkt dar-



**Bild 25:** Übersicht der Wetterstationen des DWD für das Fallbeispiel Pünderich. Dargestellt wird die Lokation der Wetterstationen mit ihren jeweiligen Höhenlagen, die für die Analyse verwendeten Gitterboxen und das Bundesfernstraßennetz



**Bild 26:** Übersicht der Wetterstationen des DWD für das Fallbeispiel Wißberg. Dargestellt wird die Lokation der Wetterstationen mit ihren jeweiligen Höhenlagen, die für die Analyse verwendeten Gitterboxen und das Bundesfernstraßennetz

gestellt werden. Daher werden mittlere Zustände und Statistiken verglichen. Die Daten des Kontrolllaufes können nicht direkt mit Beobachtungen verglichen werden, allerdings lassen sich die Trends und die Variabilitäten miteinander vergleichen. Die Absolutwerte können dabei jedoch voneinander abweichen.

Aus den Beobachtungsdaten der einzelnen Wetterstationen wurde ein Gebietsmittel für die Niederschlags- und Temperaturparameter ermittelt. Dieser Mittelwert wurde bestimmt, um das jeweilige Modellgebiet zu vergrößern und somit einen adäquaten Vergleich der Daten mit denen des Kontrolllaufes im Vergleichszeitraum 1961 bis 1990 möglich zu machen.

Die Auswertung der Parameter ergab folgendes Resultat:

### Frostperioden

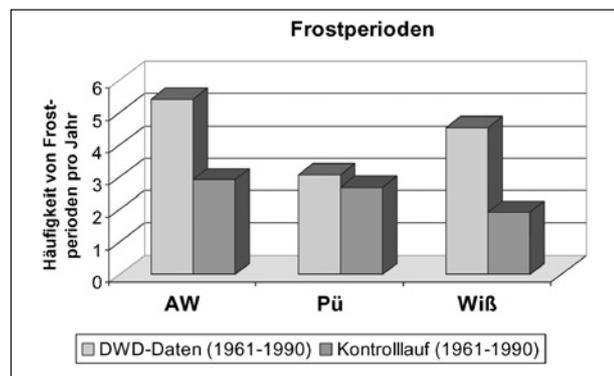
In Hinblick auf länger anhaltende Frostperioden zeigen die Beobachtungsdaten in allen drei Fallbeispielen eine größere Häufigkeit an Frostperioden als die modellierten Daten (Bild 27).

### Frosttage

Auch im Fall der einzelnen Frosttage lässt die Auswertung der Beobachtungsdaten erkennen, dass die Häufigkeit über das Winterhalbjahr gesehen in allen drei Beispielen höher liegt als im Vergleich zum Kontrolllauf (Bild 28).

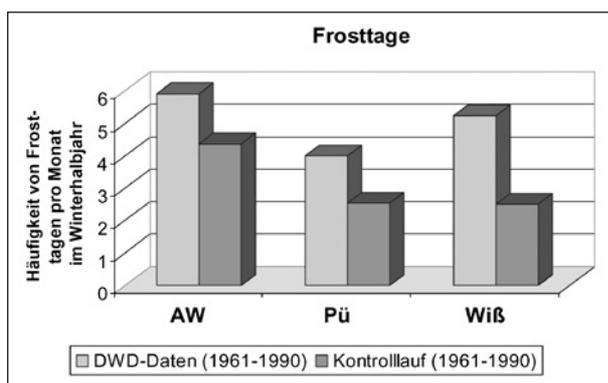
### Starkniederschlagsereignisse

Der Vergleich des Parameters für die Anzahl von Starkniederschlagsereignissen verdeutlicht in allen

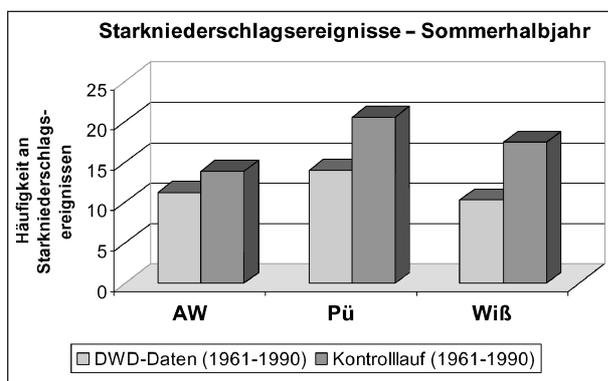


**Bild 27:** Korrelation der Beobachtungsdaten (DWD) mit den Daten des Kontrolllaufes bezüglich des Parameters Frostperioden für alle drei Fallbeispiele

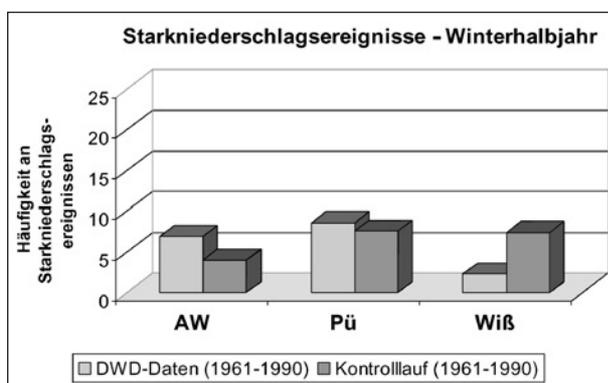
drei Fallbeispielen, dass die Häufigkeit der niederschlagsreichen Tage sowohl bei der Betrachtung der Beobachtungsdaten als auch der Kontrolllauf-Daten im Sommerhalbjahr höher liegt als im Winterhalbjahr (Bilder 29 und 30). Dabei zeigen allerdings die simulierten Daten generell höhere Häufigkeiten der Tage mit intensivem Niederschlag an.



**Bild 28:** Korrelation der Beobachtungsdaten (DWD) mit den Daten des Kontrolllaufes bezüglich des Parameters Frosttage für alle drei Fallbeispiele



**Bild 29:** Korrelation der Beobachtungsdaten (DWD) mit den Daten des Kontrolllaufes bezüglich des Parameters Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr für alle drei Fallbeispiele

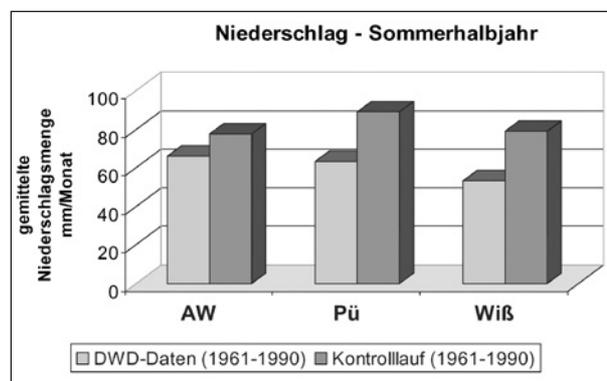


**Bild 30:** Korrelation der Beobachtungsdaten (DWD) mit den Daten des Kontrolllaufes bezüglich des Parameters Starkniederschlagsereignisse im Winterhalbjahr für alle drei Fallbeispiele

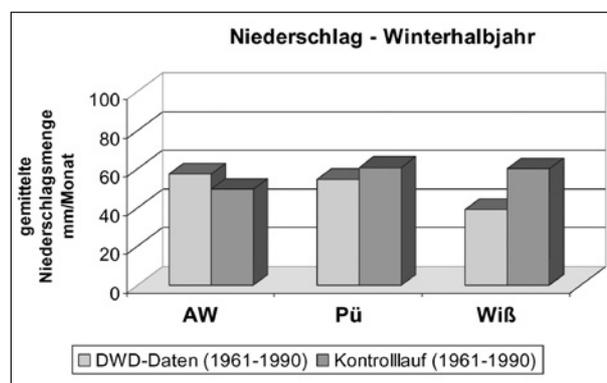
## Niederschläge

Betrachtet man die gemittelten monatlichen Niederschlagsmengen über das Sommer- und Winterhalbjahr, so zeigen die Kontrolllaufdaten generell höhere Niederschlagswerte als die Beobachtungsdaten (Bilder 31 und 32). Nur im Fall der Altmündener Wand liegt der Niederschlagswert des Kontrolllaufes unterhalb des Beobachtungswertes (Bild 32). Der Trend, dass die Sommerhalbjahre (April bis September) im Gegensatz zu den Winterhalbjahren (Oktober bis März) niederschlagsreicher sind, ist allerdings aus beiden Datensätzen abzulesen.

Der Vergleich zeigt, dass der jeweilige Trend von Beobachtungsdaten und der Daten des Kontrolllaufes für die verschiedenen Niederschlags- und Temperaturparameter meist übereinstimmt, die einzelnen Absolutwerte allerdings voneinander abweichen.



**Bild 31:** Korrelation der Beobachtungsdaten (DWD) mit den Daten des Kontrolllaufes bezüglich des Parameters Niederschlag im Sommerhalbjahr für alle drei Fallbeispiele



**Bild 32:** Korrelation der Beobachtungsdaten (DWD) mit den Daten des Kontrolllaufes bezüglich des Parameters Niederschlag im Winterhalbjahr für alle drei Fallbeispiele

## 14 Klimaänderung – regionaler Vergleich

Um die zukünftige regionale Klimaänderung fassen zu können, wird eine beliebige 30-jährige Zeitperiode aus dem Kontrolllauf mit beispielsweise zwei 30-jährigen Zeitperioden aus dem entsprechenden Szenariolauf korreliert und der jeweilige Änderungswert bestimmt, wobei der eine Wert die zeitnahe Klimaänderung und der andere Wert die klimatische Entwicklung zum Jahrhundertende hin widerspiegelt.

Für den Vergleich der Daten wurden für jedes Fallbeispiel aus dem Kontrolllauf die Zeitperiode 1961 bis 1990 und aus dem Szenariolauf die beiden Zeitperioden 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 gewählt und für sämtliche Klimaparameter analysiert (s. a. Kapitel 11).

Die Trendbetrachtung zeigt für die Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg folgendes Ergebnis:

### Frostperioden

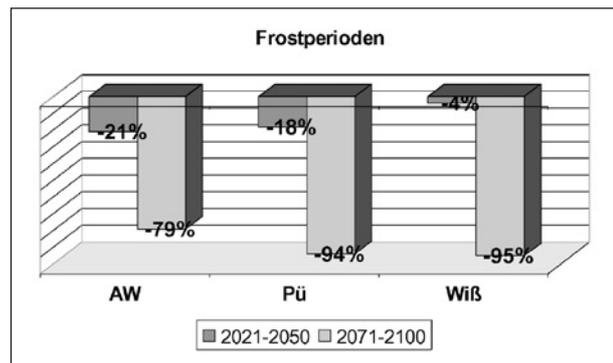
In allen drei Fallbeispielen zeigt der Trend der modellierten Daten, dass die Frostperioden in Zukunft abnehmen werden (Bild 33).

Vergleicht man das langjährige Mittel des Kontrolllaufs mit den Mittelwerten der beiden Szenariozeitperioden 2021-2050 und 2071-2100, zeigt sich im Gebiet der Altmündener Wand eine Abnahme der Frostperioden von 21 % bzw. im weiteren Zeitverlauf von 79 %. Im Fallbeispiel Pünderich lässt sich für die Zukunft eine Abnahme von 18 % bzw. 94 % erkennen. Am Wißberg nehmen die langen Frostperioden in den nächsten Jahrzehnten um 4 % ab. In Hinblick auf das Jahrhundertende lässt sich allerdings eine deutliche Abnahme von 95 % verzeichnen. Bis zum Ende der Modellbetrachtung im Jahr 2100 wird es dort sogar keine längeren Frostperioden mehr geben.

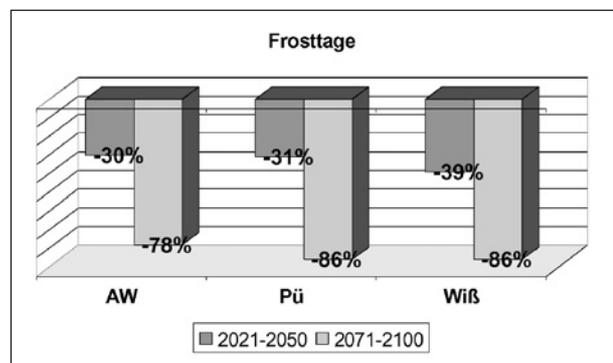
### Frosttage

Hinsichtlich der Frosttage ist bei allen drei Fallbeispielen eine zukünftige Abnahme zu erkennen (Bild 34).

In der Region der Altmündener Wand nehmen die Frosttage der Kontrolllauf-Zeitperiode 1961-1990 bis zur Szenariozeitperiode 2021 bis 2050 um 30 % ab und im weiteren Verlauf sogar um 78 %.



**Bild 33:** Prozentuale Änderungswerte (Abweichungen) für den Parameter Frostperiode bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 des Kontrolllaufes. Betrachtet wurden dabei die Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 des Szenariolaufes



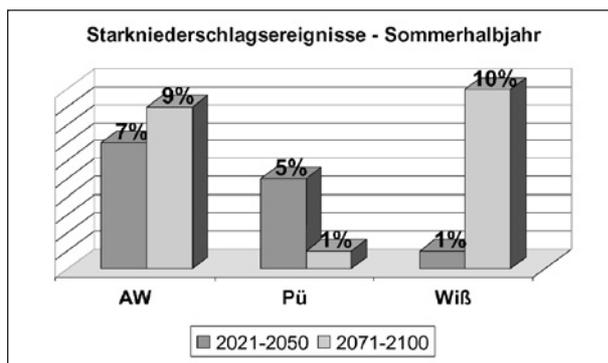
**Bild 34:** Prozentuale Änderungswerte (Abweichungen) für den Parameter Frosttage bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 des Kontrolllaufes. Betrachtet wurden dabei die Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 des Szenariolaufes

Die Frosttage reduzieren sich im Untersuchungsgebiet Pünderich zunächst um 31 % und in Hinblick auf die zweite Periode 2071 bis 2100 deutlich um 86 %. Betrachtet man die Region des Wißberges, lässt sich eine Abnahme der Frosttage von zunächst 39 % bis zur Periode 2021-2050 und bis zum Jahr 2100 von deutlichen 86 % erkennen.

### Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr

Der Vergleich der Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr (April bis September), zeigt für die Zukunft einen überwiegend steigenden Trend (Bild 35).

Im Fallbeispiel Altmündener Wand nehmen die Starkniederschlagsereignisse während des Sommerhalbjahres beim Vergleich der Kontrolllauf-Zeitperiode 1961-1990 mit der ersten Periode 2021 bis 2050 um 7 % zu. Zum Jahrhundertende hin, zwi-



**Bild 35:** Prozentuale Änderungswerte (Abweichungen) für den Parameter Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 des Kontrolllaufes. Betrachtet wurden dabei die Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 des Szenariolaufes

schen 2071 und 2100, beträgt die Zunahme 9 %. Im Fall Pünderich nehmen die Starkniederschlagsereignisse um 5 % zu. Zwischen 2071 bis 2100 ist nur eine Zunahme der Tage um 1 % im Vergleich zur Zeitperiode von 1961 bis 1990 zu verzeichnen, d. h., gegenüber dem Zeitintervall 2021-2050 ist hier eine Abnahme festzustellen. Während der Monate April bis September nehmen die intensiven Niederschläge in der Region des Wißberges bis zur ersten Periode nur geringfügig um 1 % zu. Zum Jahrhundertende hin ist eine starke Zunahme von 10 % zu verzeichnen.

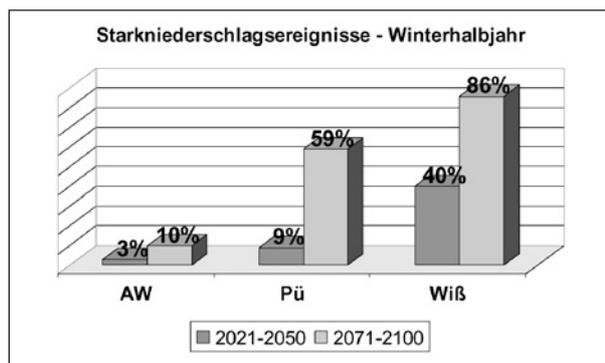
### Starkniederschlagsereignisse im Winterhalbjahr

Auch im Winterhalbjahr (Oktober bis März) werden zukünftig die Starkniederschlagsereignisse zunehmen (Bild 36).

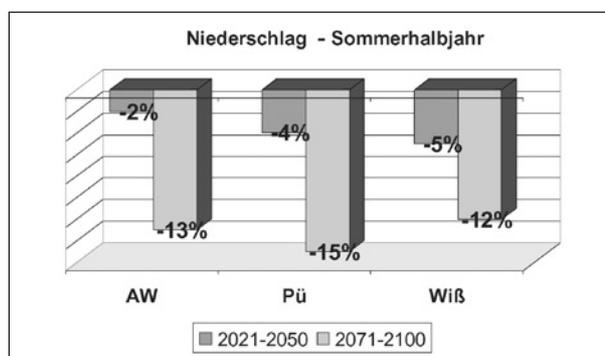
So steigen die Starkniederschlagsereignisse in der Region der Altmündener Wand zunächst um 3 % und in Hinblick auf das Jahrhundertende um 10 % an. Im Beispiel Pünderich nehmen die Starkniederschlagsereignisse während der Monate Oktober bis März in der Zeitperiode 2021 bis 2050 um 9 % und zwischen 2071 und 2100 um 59 % zu. Am Wißberg ist sogar eine deutliche Zunahme von 40 % bis zur Zeitperiode von 2021 bis 2050 und bis zum Jahr 2100 von 86 % zu verzeichnen.

### Niederschlag im Sommerhalbjahr

Die Auswertung der monatlichen Niederschlagssummen für die Fallbeispiele verdeutlicht, dass im Falle des vorgegebenen Szenarios mit abnehmen-



**Bild 36:** Prozentuale Änderungswerte (Abweichungen) für den Parameter Starkniederschlagsereignisse im Winterhalbjahr bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 des Kontrolllaufes. Betrachtet wurden dabei die Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 des Szenariolaufes



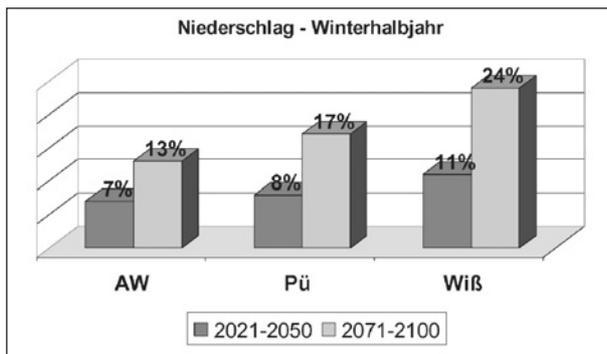
**Bild 37:** Prozentuale Änderungswerte (Abweichungen) für den Parameter Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 des Kontrolllaufes. Betrachtet wurden dabei die Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 des Szenariolaufes

den Niederschlägen im Sommerhalbjahr gerechnet werden kann (Bild 37).

Betrachtet man die Region der Altmündener Wand, zeigen die Sommerhalbjahre zwischen 2021 bis 2050 eine Niederschlagsabnahme von 2 % und zwischen 2071 bis 2100 von 13 %. Im Beispiel Pünderich zeigt die Auswertung der Modellzeitabschnitte ein Absinken von 4 % und gegen Ende des Jahrhunderts um 15 %. Im Fallbeispiel Wißberg ist das Sommerhalbjahr im ersten Szenarioabschnitt im Vergleich zum Kontrolllauf um 5 % und während des Zeitraums 2071 bis 2100 um 12 % niederschlagsärmer.

### Niederschlag im Winterhalbjahr

Die Niederschläge während des Winterhalbjahres werden gemäß der erwarteten Klimaänderung in allen drei Untersuchungsgebieten in Zukunft zunehmen (Bild 38).



**Bild 38:** Prozentuale Änderungswerte (Abweichungen) für den Parameter Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr bezogen auf das langjährige Mittel 1961-1990 des Kontrolllaufes. Betrachtet wurden dabei die Zeitperioden 2021-2050 und 2071-2100 des Szenariolaufes

Im Bereich der Altmündener Wand werden die Niederschläge um 7 % und hinsichtlich der zweiten Periode um 13 % ansteigen. Das Beispiel Pünderich zeigt bis zur ersten Szenario-Zeitperiode einen Anstieg von 8 % und in Hinblick auf den zweiten Zeitraum von 2071 bis 2100 von 17 %. Das Winterhalbjahr des Szenariolaufes weist am Wißberg in Bezug zum Kontrolllauf größere Niederschlagsmengen auf. Bis zum ersten Zeitabschnitt steigen die Niederschläge um 11 % an und hinsichtlich der zweiten Zeitperiode um 24 %.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Auswertung der einzelnen Klimaparameter zeigt, dass der Trend der Klimaänderung in den drei Untersuchungsgebieten zwar überwiegend gleich ist, die Änderungsraten aber regional unterschiedlich sind.

So ist eine signifikante Abnahme der Frostperioden und -tage in allen drei Fallbeispielen zu erkennen. Allerdings ist die Rate unterschiedlich hoch. Die Starkniederschlagsereignisse werden in den Sommer- und insbesondere in den Wintermonaten ansteigen, wobei die jeweilige prozentuale Ab- bzw. Zunahme regional auch unterschiedlich ausfällt. In allen drei Regionen wird die Niederschlagsmenge während des Winterhalbjahres zunehmen und während des Sommerhalbjahres abnehmen. Unter dem Aspekt der niedrigen Evapotranspiration im Winterhalbjahr muss dabei dem Anstieg eine höhere Bedeutung zugemessen werden.

Die regionale Trendanalyse hinsichtlich der Klimaänderung in den drei Untersuchungsgebieten zeigt, abgesehen von einer Ausnahme – Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr im Mo-

dellgebiet Pünderich –, dass sich die hohen Änderungswerte der Klimaparameter signifikant in der zweiten Jahrhunderthälfte rutschungsbegünstigend auswirken werden.

Aufgrund unterschiedlich hoher Änderungswerte für die einzelnen Klimaparameter wird sich die Rutschungshäufigkeit auch unterschiedlich in den Regionen entwickeln.

## 15 Auswirkungen der potenziellen Klimaänderung auf Rutschungen

Die aus den Modelldaten abgeleiteten Ergebnisse der drei Fallbeispiele Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg lassen erkennen, dass bei Eintreten des Klimaszenarios A1B in den Winterhalbjahren mit höheren Niederschlagssummen und mit einer Erhöhung der Tage mit Niederschlagsintensitäten von mehr als 20 mm (Starkniederschlagsereignisse) sowohl im Winter als auch im Sommer zu rechnen wäre. Auch würden die Frostperioden bzw. Frosttage bis 2100 drastisch abnehmen.

In Hinblick auf das mögliche Eintreten von Massenbewegungen würde dieser Entwicklung eine bedeutende Rolle zukommen, da aus Erfahrung der letzten Jahrzehnte Rutschungen häufig gegen Ende des Winterhalbjahres, nach länger anhaltenden Niederschlägen und in Verbindung mit dem Auftauen des Bodens aufgetreten sind. Nicht nur die Monatsniederschläge vor einem Ereignis, sondern auch die Jahresniederschläge der letzten ein bis zwei Jahre zuvor spielen u. a. durch die langfristige Erhöhung des Grundwasserspiegels eine entscheidende Rolle für das Auslösen von Rutschungen, insbesondere, wenn der Grundwasserspiegel im Bereich der Gleitfläche liegt.

Die Zunahme der Starkniederschlagsereignisse während des Sommer- und Winterhalbjahres wird sich vor allem dahingegen auswirken, dass Schlamm- und Schuttströme an Böschungen zunehmen.

Bei der Betrachtung der Rutschungshäufigkeit in Abhängigkeit von langen Frostperioden und der Anzahl der Frosttage muss zwischen Fest- und Lockergesteinböschung unterschieden werden.

Als Lockergesteine wird nach allgemeingültiger Definition ein noch nicht verfestigtes Haufwerk ange-

sehen, dessen Gemengteile keinen festen Zusammenhalt, also wenig Kornbindung, haben. Hierunter fallen vor allem Kiese, Sande, Schluffe und Tone.

Die Entstehung rutschungsbegünstigender Verhältnisse in Lockergesteinsböschungen tritt unter geänderten Frostbedingungen durch Abminderung des Reibungswinkels oder der Kohäsion z. B. bei Vorliegen folgender geologischer Verhältnisse auf (Richtlinie Geotechnik des Sächsischen Oberbergamtes, 2005):

- Schichten mit geringer Scherfestigkeit (z. B. mit Gehalt an quellfähigen Dreischicht-Tonmineralen) und böschungsauswärtigem Schichteinfallen,
- hohe Kornanteile an feinsandigem oder bindigem Material mit geringer Ungleichförmigkeitszahl,
- Anstieg der Wassersättigung,
- Anstieg des Porenwasserdruckes,
- Anstieg des Strömungsdruckes durch Suffosion feiner Kornbestandteile.

Festgesteine sind als mechanisch widerstandsfähige Gesteine definiert, deren Struktur und Verformbarkeit der von Festkörpern entsprechen. Hierzu zählen die drei Gesteinsarten Magmatite (Plutonite, Vulkanite und Ganggesteine), Sedimentite und Metamorphite.

Folgende Bedingungen können die Standsicherheit in Festgesteinen generell herabsetzen, die sich je nach Frosteinfluss ändern können (Richtlinie Geotechnik des Sächsischen Oberbergamtes, 2005):

- ungünstige Trennflächenstellung zur Böschung,
- häufige Wechsel im Trennflächengefüge (z. B. bei Faltung oder Störungen),
- Trenn- und Grenzflächen oder Schwächezonen, deren Einfallrichtung etwa der der Böschung entspricht, deren Einfallswinkel flacher ist als der Böschungswinkel oder wasserführend sind,
- Ausbildung mächtiger Verwitterungs- oder Auflockerungszonen.

Die Reduzierung von Frostereignissen (Kapitel 14) wird sich in Festgesteinsböschungen durch eine Abnahme der Frostsprengungsprozesse äußern. Bei der isolierten Betrachtung des Klimatelements Frost muss unter diesen Voraussetzungen im Win-

terhalbjahr außerhalb von Permafrostgebieten sogar von einem Rückgang der Rutschungen im Sinne von Steinschlag-, Felssturz- und Bergsturzereignissen ausgegangen werden. Auf der anderen Seite führt der vermehrte Niederschlag im Winterhalbjahr mit niedriger Verdunstungsrate zu einer Zunahme von Verwitterungs- und Erosionsprozessen und trägt damit letztendlich zu einer Destabilisierung des Gesteinsverbandes bei. Eine Abschätzung der Entwicklung von gravitativen Massenbewegungen kann daher nur unter Betrachtung und Bewertung möglichst vieler die Bewegungen aktivierender bzw. steuernder Klimafaktoren erfolgen.

## 16 Modellentwicklung zur Gefährdungsabschätzung

Da sich viele Böschungen nahe dem Grenzgleichgewicht (treibende Kräfte entsprechen den zurückhaltenden Kräften) befinden, kommt gerade dem Umstand eine große Bedeutung zu, dass sich die die Böschungsstabilität beeinflussenden klimatischen Veränderungen regional zeitlich verzögert einstellen werden.

Nach der Trendbetrachtung hinsichtlich der klimatischen Veränderungen in den drei ausgewählten Regionen wird eine Ausweisung regionaler Gefährdungsbereiche in Hinblick auf zeitabhängige Eintrittswahrscheinlichkeiten von Schadensereignissen entlang des Bundesfernstraßennetzes angestrebt.

Diese Einschätzung soll mittels eines grafischen klimatisch-ingenieurgeologischen Modells vorgenommen werden, wobei Gefährdungsklassen hinsichtlich der zeitabhängigen Rutschungsanfälligkeit entlang des Bundesfernstraßennetzes empirisch-statistisch ermittelt werden.

Die einzelnen Schritte sind in den nachfolgenden Kapiteln und in der Anlage 1 näher erläutert.

### 16.1 Modellgebiete

Bei der Modellbetrachtung wurden für die Untersuchungsgebiete Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg jeweils neun Gitterboxen verwendet, wobei bei der Auswahl der Gitterboxen darauf geachtet wurde, dass das jeweilige Rutschareal möglichst im Zentrum des Modellgebietes lokalisiert ist.

A1	A2	A3
B1	B2	B3
C1	C2	C3

**Bild 39:** Kennzeichnung der Gitterboxen

Die Gitterboxen wurden aufgrund der vorliegenden Koordinaten ihres Mittelpunktes konstruiert.

Da die einzelnen Gitterboxen eine Abmessung von etwa 10 km x 10 km besitzen, umfassen die Modellgebiete jeweils eine Fläche von etwa 900 km<sup>2</sup> (30 km x 30 km).

Um eine Vereinfachung bei der weiteren Betrachtung bzw. Dokumentation der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die neun Gitterboxen für jedes Beispiel gemäß Bild 39 von links oben nach rechts unten gekennzeichnet.

Die einzelnen zur Analyse herangezogenen Rutschungsareale befinden sich jeweils in der Gitterbox B2 und damit im Zentrum der Modellgebiete.

### 16.1.1 Klimatisches Modell

Basierend auf der Analyse der Wetterdaten aus den drei Regionen wurden aus dem Klimamodell REMO rutschungsrelevante Parameter ausgewählt bzw. ermittelt. Aus den vorliegenden Niederschlags- und Temperaturparametern

- Niederschlag – monatliche Summe,
- Niederschlag – Tage pro Monat mit  $p > 20$  mm,
- Temperatur – Tage pro Monat mit  $T_{\text{mittel}} \leq 0$  °C,
- Temperatur – längste zusammenhängende Anzahl an Tagen mit  $T_{\text{mean}} < -5$  °C

wurden folgende Parameter für jede Gitterbox der drei Fallbeispiele ermittelt:

- Niederschlagssumme über das Winterhalbjahr (Oktober bis März),
- Anzahl an Tagen mit Niederschlag  $p > 20$  mm (Starkniederschlagsereignisse) im Winterhalbjahr (Oktober bis März),
- Anzahl an Tagen mit Niederschlag  $p > 20$  mm (Starkniederschlagsereignisse) im Sommerhalbjahr (April bis September),

- Jahresniederschlagssumme,
- Anzahl an Tagen mit  $T_{\text{mittel}} \leq 0$  °C (Frosttage),
- längste zusammenhängende Anzahl an Tagen mit  $T_{\text{mean}} < -5$  °C (Frostperioden).

Um die zukünftige klimatische Veränderung bis zum Jahr 2100 aufzuzeigen, wurde der Untersuchungszeitraum 2011 bis 2100 gewählt und gemäß der Klimadefinition in sieben 30-jährige Perioden unterteilt (s. a. Kapitel 11):

- 2011-2040,
- 2021-2050,
- 2031-2060,
- 2041-2070,
- 2051-2080,
- 2061-2090,
- 2071-2100.

Für jeden Klimaparameter wurde aus dem Kontrolllauf die Periode 1971-2000 als zeitnahe Referenzzeitraum gewählt und das jeweilige langjährige Mittel gebildet, welches mit dem langjährigen Mittel des zutreffenden Klimaparameters der entsprechenden 30-jährigen Zeitperioden aus dem Szenariolauf korreliert wurde. Die ermittelten prozentualen Abweichungen spiegeln den Änderungswert für jeden der einzelnen Parameter wider (Anlage 2).

### 16.1.2 Ingenieurgeologisches Modell

#### Digitales Geländemodell (DGM)

Für alle drei Modellgebiete Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg wurde jeweils das digitale Geländemodell 25 (DGM, Maßstab 1:25.000) als Gauß-Krüger-Abbildung verwendet (Anlage 3). Die Vektordaten (x-, y- und z-Koordinaten) für die Modellgebiete wurden im ASCII-Format entsprechend ihrer Lage hinsichtlich der Meridianstreifeneinteilung des Gauß-Krüger-Koordinatensystems dem Forschungsnehmer zur Verfügung gestellt.

#### Böschungsneigung

Die Böschungsneigung ist für die Abschätzung von möglichen Massenbewegungen entlang des Bundesfernstraßennetzes von großer Bedeutung. Dabei muss allerdings zwischen Locker- und Festgesteinsböschungen unterschieden werden.

Generell wird bei der Planung zur Böschungsherstellung die Neigung von Böschungen aufgrund sorgfältiger Erkundung der Boden-, Fels-, Wasser- und Klimaverhältnisse festgelegt. Dabei werden Böschungen i. d. R. mit der Regelneigung gemäß RAS-Q ausgeführt, wenn ihre Standsicherheit gewährleistet ist. Böschungen in wenig geklüftetem Festgestein können steiler hergestellt werden.

Die häufigsten Rutschungen treten in mäßig bis steil geneigtem Gelände auf, da hier der Einfluss der Schwerkraft, also der treibenden Kraft, am größten ist. In einigen Regionen, wie im Hügelland Rheinhessens, sind allerdings auch Rutschungen an flachen Böschungen ( $< 10^\circ$ ) bekannt. Das bedeutet, der geologische Aufbau spielt eine maßgebende Rolle.

Nach der Neigung werden die Böschungen für das vorliegende Forschungsprojekt nach eigenen ingenieurgeologischen Erfahrungen in der Baupraxis in fünf Gruppen unterteilt:

$\leq 5^\circ$	extreme Flachböschungen im Lockergestein
$> 5^\circ - 24^\circ$	Flachböschungen im Lockergestein
$> 24^\circ - 35^\circ$	Straßenböschungen, einschl. Regelneigung 1:1,5
$> 35^\circ - 50^\circ$	mäßig steile Böschungen
$> 50^\circ - 90^\circ$	Steilböschungen, Festgesteinsböschungen

Die Böschungsneigungen in den drei Modellgebieten wurden mit Hilfe des digitalen Geländemodells und der Computersoftware Golden Software Surfer9 zur Visualisierung reeller algebraischer Geometrie in Echtzeit berechnet und grafisch mittels einer definierten Farbgebung dargestellt (Anlage 3).

### Punktekataster von Rutschereignissen

Um in den jeweiligen Modellen eine Rutschungsfälligkeit bzw. -häufigkeit regionalstatistisch zu ermitteln und somit deren Vulnerabilität aufzuzeigen, wurden alle bekannten bzw. beschaffbaren Schadensereignisse, die sich innerhalb der Modellgebiete bereits ereignet haben, hinzugezogen (Anlage 3, rote Punkte).

Für das Modellgebiet Altmündener Wand existiert ein Rutschungskataster mit etwa 250 Datensätzen (schriftliche Mitteilung Prof. Dr. Damm, Hochschule

Vechta). Allerdings wurde die Verwendung des Rutschungskatasters vom Urheber für diesen Projektrahmen nicht genehmigt. Lediglich die Koordinaten des Rutschareals der Altmündener Wand und der vier Schadensstellen, die von der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr zur Verfügung gestellt wurden und wovon nur ein Rutschereignis (B 3, bei Scheden) innerhalb des Modellgebietes liegt (Anlage 3.1).

Im Fall der beiden Beispiele aus Rheinland-Pfalz, Pünderich und Wißberg, wurde auf die Rutschungsdatenbank von Rheinland-Pfalz zurückgegriffen und die Lokationen der Schadensereignisse in Form eines Punktekatasters (Hoch- und Rechtswerte der Schadensereignisse) in die grafische Darstellung der Modelle integriert (Anlagen 3.2 und 3.3).

Das Modellgebiet Pünderich umfasst 321 Schadensereignisse, die entsprechend ihrer Lage den topografischen Karten (TK 25) Cochem (5808), Treis-Karden (5809), Alf (5908), Zell (5909), Wittlich (6007), Bernkastel-Kues (6008) und Neumagen-Dhron (6107) zugeordnet wurden. Für das Modell um den Wißberg konnte auf 202 Ereignisse innerhalb der TK 25 Stromberg (6012), Bingen (6013), Ingelheim (6014), Mainz (6015), Waldböckelheim (6112), Bad Kreuznach (6113), Wörrstadt (6114), Udenheim (6115), Meisenheim (6212), Kriegsfeld (6213), Alzey (6214) und Gau-Odernheim (6215) zurückgegriffen werden. Die Anzahl der Schadensfälle bezieht sich auf die generelle Anzahl der bekannten Rutschereignisse und nicht allein auf die Lokation. Auch muss auf mögliche Datenlücken hingewiesen werden, da höchstwahrscheinlich nicht alle Rutschungen dokumentiert und in der Datenbank registriert wurden. Sicherlich liegen weit mehr Rutschungen in den beiden Modellgebieten vor als aufgeführt sind.

### Digitales Bundesfernstraßennetz

Für die drei Modellgebiete wurde das jeweilige digitale Bundesfernstraßennetz aus dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra) in der für jedes Beispiel entsprechenden Gauß-Krüger-Darstellung von der BAST zur Verfügung gestellt. Anhand des jeweiligen Straßennettausschnittes, der in das entsprechende digitale Geländemodell der Beispiele integriert wurde (Anlage 3), sollen die Bereiche herausgestellt werden, die für die spätere Analyse hinsichtlich der Abschätzung einer möglichen Gefährdung durch Rutschungen entlang der Bundesstraßen und -autobahnen von Bedeutung sind.

Die Straßen, die durch die Untersuchungsgebiete verlaufen, wurden hinsichtlich ihrer Bezeichnung und Klassifizierung als Bundesautobahn und Bundesstraße unterschieden, wobei jeweils folgende Straßenabschnitte erfasst wurden:

Modellgebiet Altmündener Wand

Teilabschnitt der Autobahn A 7 sowie der Bundesstraße B 3, B 7, B 80, B 83, B 251, B 496 und B 520

Modellgebiet Pünderich

Teilabschnitt der Autobahn A 1 und A 60 sowie der Bundesstraße B 49, B 50, B 53, B 269, B 327 und B 421

Modellgebiet Wißberg

Teilabschnitt der Autobahn A 60, A 61 und A 63 sowie der Bundesstraße B 41, B 48, B 50, B 271, B 420 und B 428

## 17 Auswertung der Modellparameter

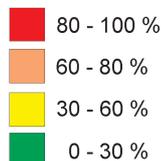
### 17.1 Auswertung der einzelnen Klimaparameter

Anhand der Mittelwerte der sechs Klimaparameter (Kapitel 16.1.1) über 30-jährige Perioden wurden prozentuale Abweichungen vom jeweiligen langjährigen Mittel des Kontrolllaufes (1971-2000) ermittelt (Anlage 2).

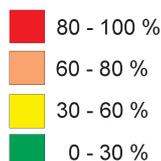
Zur Vereinheitlichung hinsichtlich der späteren Korrelation mit dem ingenieurgeologischen Parameter Böschungsneigung wurden im nächsten Schritt die prozentualen Abweichungen für jeden Parameter in vier bzw. zwei Gruppen zusammengefasst, die durch definierte Farben im Modell dargestellt sind. Dabei stellen die Farben Rot, Orange, Gelb und Grün eine relative Gewichtung der Daten hinsichtlich ihrer Abweichung vom langjährigen Mittel dar (Anlage 2). Rot bedeutet dabei grundsätzlich eine sehr hohe Abweichung und Grün eine geringe Abweichung, wobei die Abweichungen für die verschiedenen Klimaparameter unterschiedlich definiert wurden.

Für die sechs Klimaparameter wurden folgende Gruppierungen mit entsprechender Farbgebung vorgenommen (s. a. Anlage 2):

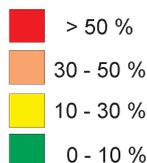
- Prozentuale Abweichung der gemittelten Anzahl an zusammenhängenden Tagen mit  $T_{\text{mean}} < -5 \text{ °C}$  (Frostperiode) vom langjährigen Mittel:



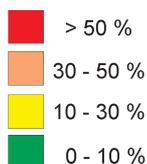
- Prozentuale Abweichung der gemittelten Anzahl an Tagen mit  $T_{\text{mittel}} \leq 0 \text{ °C}$  (Frosttage) vom langjährigen Mittel:



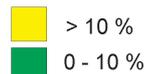
- Prozentuale Abweichung der gemittelten Anzahl an Tagen mit Niederschlag  $p > 20 \text{ mm}$  der Winterhalbjahre (Starkniederschlag) vom langjährigen Mittel:



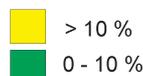
- Prozentuale Abweichung der gemittelten Anzahl an Tagen mit Niederschlag  $p > 20 \text{ mm}$  der Sommerhalbjahre (Starkniederschlag) vom langjährigen Mittel:



- Prozentuale Abweichung der gemittelten Niederschlagssumme über die Winterhalbjahre vom langjährigen Mittel:



- Prozentuale Abweichung der gemittelten Jahresniederschlagssummen vom langjährigen Mittel:



Die jeweilige Gruppierung der prozentualen Abweichungen für jeden Klimaparameter basiert auf der

vorherigen statistischen Analyse der Daten. Bei der Festlegung der Grenzbereiche wurde auf Erfahrungswerte zurückgegriffen.

Sowohl die Niederschläge während des Winterhalbjahres als auch die Jahresniederschläge besitzen mit einer eher relativ geringen Varianz der Zunahmeraten von 0,6 % bis 29,9 % bzw. 0,1 % bis 12,6 % eine untergeordnete Rutschungsrelevanz. Zur Vereinfachung wurde eine Einteilung in nur zwei Gruppen vorgenommen.

Die Abweichungen der Frostperioden bzw. -tage und die Abweichungen der Starkniederschlagsereignisse sowohl im Sommer- wie auch im Winterhalbjahr wurden in vier Gruppen eingeteilt (Anlage 2), wobei bei der Art und Weise der Gruppierung wiederum die Auswertung der einzelnen Datensätze und ihre Bedeutung hinsichtlich einer rutschungsauslösenden Relevanz herangezogen wurden.

Somit bekommt jede der sieben 30-jährigen Zeitperioden einer Gitterbox für jeden Klimaparameter eine entsprechende Farbe zugeordnet.

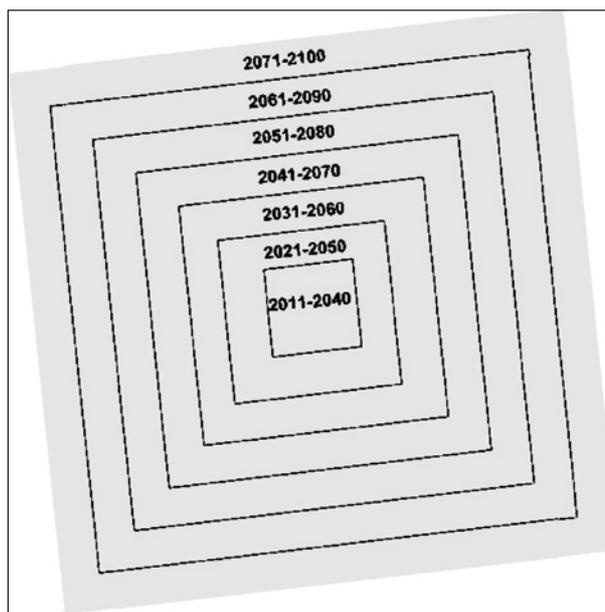
Die Farbgebung ist demzufolge mit der Einstufung hinsichtlich der Rutschungsrelevanz eines Klimaparameters (Rutschungsrisiko) gleichzusetzen und wird folgendermaßen definiert:

<span style="color: red;">■</span>	sehr hoch
<span style="color: orange;">■</span>	hoch
<span style="color: yellow;">■</span>	mäßig
<span style="color: green;">■</span>	gering

Dies bedeutet beispielsweise, dass Zeitperioden, die rot gekennzeichnet sind, einen höheren Einfluss auf das Auslösen von Rutschungen besitzen als die grün gekennzeichneten Zeitperioden.

Die grafische Darstellung der Zeitperioden erfolgt in Form konzentrisch angeordneter Rechtecke innerhalb einer Gitterbox (Bild 40). Dabei beinhaltet das innere Rechteck die Zeitperiode 2011-2040. Nach außen hin folgen die nächsthöheren 30-jährigen Perioden bis hin zur letzten Zeitperiode 2071-2100 als äußerstes Rechteck (s. a. Anlage 4).

Mit Hilfe dieser Darstellung der verschiedenen Zeitperioden wird der zeitliche Verlauf der zukünftigen Klimaentwicklung für jeden Klimaparameter visuell dargestellt. Auch wird aufgezeigt, welche Gitterbox und welche Zeitperiode unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen am ehesten für Rutschungen prädestiniert wären.



**Bild 40:** Grafische Darstellung der Zeitperioden innerhalb einer Gitterbox

Da nicht jeder gemittelte Klimaparameterwert einer Zeitperiode eine mögliche rutschungsrelevante Abweichung vom langjährigen Mittel besitzt, wurde diese bei der weiteren Analyse nicht berücksichtigt (Anlage 2, grau hinterlegte Felder).

## 17.2 Auswertung des ingenieur-geologischen Parameters

Zunächst wurde für jede der neun Gitterboxen eines Modellgebietes eine Voreinstufung der Straßenabschnitte aufgrund des Reliefs des Geländes in Hinblick auf ihre Gefährdung durch mögliche Rutschungen vorgenommen und eine Auswahl für eine weitere Auswertung getroffen.

Da für die generelle Abschätzung der Rutschungsgefährdung im vorliegenden Forschungsvorhaben nur die Gebiete entlang der Bundesfernstraßen von Interesse sind, wurden auch jeweils nur die Gitterboxen mit in die weitere Analyse einbezogen, die eine oder auch mehrere Bundesfernstraßenabschnitte beinhalten. Gitterboxen ohne entsprechende Straßenabschnitte wurden nicht weiter berücksichtigt.

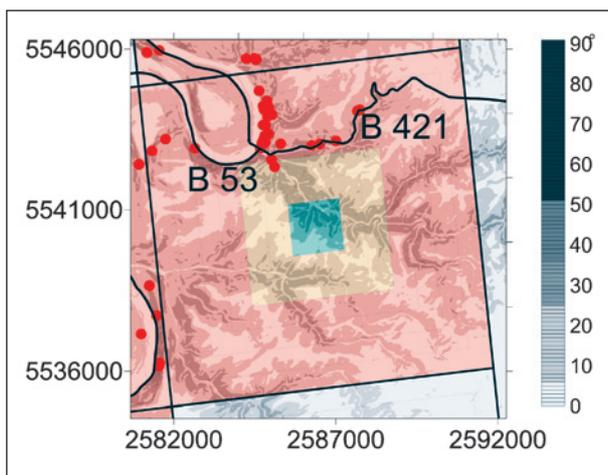
Im nächsten Schritt wurde die unterschiedliche Böschungsneigung innerhalb der Modellgebiete mit Hilfe der jeweiligen digitalen Geländemodelle berechnet und visualisiert, wobei die in Kapitel 16.1.2 aufgeführte Unterteilung in fünf Gruppen berücksichtigt wurde.

Letztlich sind nur die Gitterboxen für eine Korrelation mit den klimatischen Parametern von Bedeutung, deren Straßenteilabschnitte sich aus ingenieurgeologischer Sicht entlang von rutschungsanfälligen Böschungsbereichen erstrecken.

## 18 Auswertung der Fallbeispiele

Für die spätere Ausweisung von Gefährungsklassen hinsichtlich der grundsätzlichen Rutschungsanfälligkeit entlang des Bundesfernstraßennetzes wurden die infrage kommenden Gitterboxen ausgewählt. Dabei wurde auf die Verschneidung im Sinne der bei Geoinformationssystemen üblichen Überlagerung von Themenebenen als Raster- oder als Vektorebene mit den Sachdaten (Klimaparameter) zurückgegriffen.

Die Ergebnisse der einzelnen Klimaparameter für jede Gitterbox wurden miteinander korreliert und interpretiert. D. h., das Zusammenwirken der Niederschlags- und Temperaturparameter musste hinsichtlich ihrer Relevanz in den jeweiligen Modellgebieten für das Auslösen von Schadensereignissen beurteilt werden. Somit lässt sich diejenige Gitterbox ermitteln, deren Region unter klimatischen Gesichtspunkten für jeden betrachteten Zeitabschnitt am rutschungsanfälligsten sein könnte.



**Bild 41:** Beispielhafter Ausschnitt aus dem Modellgebiet Pünderich. Dargestellt ist die Gitterbox B3 mit der Bundesstraße B 421 und B 53, dem Punktekataster von Schadensereignissen und der mittels Graustufen dargestellten Klassifikation der Böschungeneigung. Zudem ist die Klimaentwicklung über die nächsten 90 Jahre hinsichtlich Starkniederschlagsereignissen im Winterhalbjahr und der damit verbundenen Einstufung in Bezug auf das Gefährdungspotenzial (grün = gering, orange = hoch, rot = sehr hoch) zu erkennen

Durch die Verschneidung der Ergebnisse aus klimatischer und ingenieurgeologischer Analyse für jede Gitterbox wurde zunächst für jedes Modellbeispiel die Gitterbox mit den entsprechenden Straßenabschnitten ermittelt, die aufgrund der zuvor genannten Kriterien und hinsichtlich der zeitlichen Eintrittswahrscheinlichkeit in der Zukunft am rutschungsgefährdetsten sein könnten (Bild 41).

Weitere Analysen in Hinblick auf die regionale, zeitliche Einstufung der Rutschungsgefährdung folgen in den nächsten Kapiteln und den Anlagen 5 und 6.

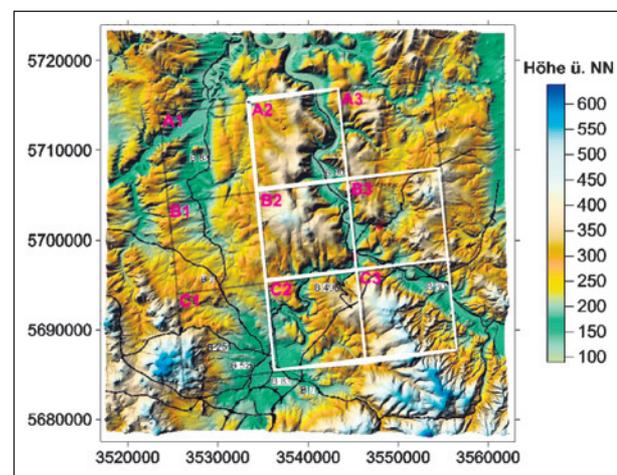
### Modellgebiet Altmündener Wand

Im Fall des Modellgebiets um die Altmündener Wand (Bild 42) entsprachen folgende Gitterboxen den Auswahlkriterien für eine weitere Analyse unter den klimatischen und ingenieurgeologischen Gesichtspunkten:

- A2
- B2, B3
- C2, C3

Die klimatischen Bedingungen der entsprechenden Gitterboxen für die nächsten 90 Jahre wurden untersucht und bewertet (Anlage 2.1). Eine entsprechende grafische Darstellung der Klimaentwicklung ist Anlage 4.1 zu entnehmen.

Die größten Abweichungen besitzen die Starkniederschlagsereignisse mit einem bis zu 64%igen Anstieg im Sommerhalbjahr (C3) und bis zu 200 % (C3) im Winterhalbjahr. Auch die Frostperioden und



**Bild 42:** 3D-Modell des Fallbeispiels Altmündener Wand. Dargestellt sind das Geländehöhenprofil (Höhe m ü. NN), das Bundesfernstraßennetz, das Rutschkataster (rote Punkte) und die Gitterboxübersicht (weiße Rahmen = für die Analyse infrage kommende Gitterboxen)

die Frosttage zeigen mit einer Abnahme von bis zu 82,4 % (B2) bzw. bis zu 82,1 % (A2) eine deutliche klimatische Veränderung. Aus diesem Grund erhalten diese Klimaparameter bei der Auswertung der klimatischen Entwicklung innerhalb des Modells bzw. der einzelnen Gitterboxen eine besondere Bedeutung und Gewichtung.

Der gemittelte Winterniederschlag an sich besitzt mit einer zukünftigen Zunahme von 9,0 % (C2) bis 24,0 % (A2) relativ gesehen keine ausschlaggebende Rutschungsrelevanz. Allerdings bekommt dieser Parameter im Zusammenwirken mit den Starkniederschlagsereignissen im Winterhalbjahr sowie den Frostperioden und -tagen eine Bedeutung zugesprochen und wird bei der Analyse miteinbezogen.

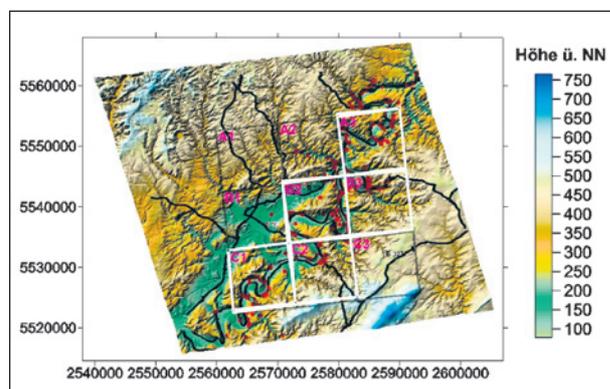
Der gemittelte Jahresniederschlag einer 30-jährigen Zeitperiode ist aufgrund der geringen Zunahme von 0,1 % (A2) bis 10,0 % (B3) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1971-2000) eher vernachlässigbar.

### Modellgebiet Pünderich

Für das Modellgebiet Pünderich (Bild 43) sind folgende Gitterboxen mit Bundesfernstraßen für die weitere Betrachtung von Relevanz:

- A3
- B2, B3
- C1, C2

Die Anzahl der Starkniederschlagsereignisse im Sommer- und Winterhalbjahr sowie die Frostperioden bzw. -tage weichen jeweils deutlich vom jeweiligen langjährigen Mittel ab (Anlage 2.2). So be-



**Bild 43:** 3D-Modell des Fallbeispiels Pünderich. Dargestellt sind das Geländehöhenprofil (Höhe m ü. NN), das Bundesfernstraßennetz, das Rutschkataster (rote Punkte) und die Gitterboxübersicht (weiße Rahmen = für die Analyse infrage kommende Gitterboxen)

laufen sich die positiven Abweichungen der Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr auf bis zu 274,1 % (C1) und im Winterhalbjahr sogar auf bis zu 2.527,3 % (C1). Dieser extrem hohe Anstieg ist allerdings nur in der Gitterbox C1 festzustellen. Die Anstiegsraten sind in dieser Region über die nächsten 90 Jahre mit deutlichem Abstand am höchsten. Die Frostperioden und die Frosttage lassen eine Abnahme von bis zu 100 % (B3) bzw. 88,6 % (B2) im Vergleich zum langjährigen Mittel erkennen.

Die gemittelten Winterniederschläge mit Anstiegen zwischen 0,6 % (A3) und 17,3 % (B3) fallen auch verhältnismäßig gering aus. Zusammen mit den anderen Klimaparametern für das Winterhalbjahr bekommen sie allerdings wiederum einen bedeutenderen Stellenwert.

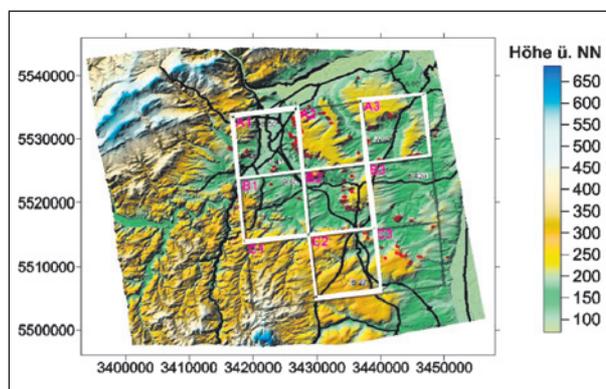
Der Einfluss des Jahresniederschlages ist bei diesem Beispiel auch vernachlässigbar, da die positiven Abweichungen vom langjährigen Mittel zwischen 0,2 % (A3) und 3,9 % (B3) liegen.

### Modellgebiet Wißberg

Für die weitere Auswertung im Fall des Modells Wißberg (Bild 44) kommen nachfolgende Gitterboxen in Betracht:

- A1, A3
- B1, B2
- C2

Für die Analyse hinsichtlich rutschungsgefährdeter Regionen wurde für das Modellgebiet um den Wißberg auch die Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens (Maßstab 1:50.000) des



**Bild 44:** 3D-Modell des Fallbeispiels Wißberg. Dargestellt sind das Geländehöhenprofil (Höhe m ü. NN), das Bundesfernstraßennetz, das Rutschkataster (rote Punkte) und die Gitterboxübersicht (weiße Rahmen = für die Analyse infrage kommende Gitterboxen)

Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz, miteinbezogen. In dieser ingenieurgeologischen Karte sind sowohl bereits nachgewiesene als auch vermutete Rutschgebiete ausgewiesen. Diese Information ist für eine Abschätzung hinsichtlich des möglichen zunehmenden Gefährdungspotenzials durch Rutschungen entlang der Straße sehr nützlich.

Sowohl die Starkniederschlagsereignisse im Sommer- und Winterhalbjahr als auch die Frostperioden und -tage weichen deutlich vom langjährigen Mittel ab (Anlage 2.3). So nehmen die intensiven Niederschläge im Sommerhalbjahr um bis zu 636,5 % (B1) und im Winterhalbjahr um bis zu 672,7 % (B1) zu. Die Frostperioden und -tage besitzen eine deutliche negative Abweichung von bis zu 97,1 % (B2) bzw. 88,7 % (C2).

Die Winterniederschläge zeigen Zunahmen zwischen 3,4 % (A1) und 29,9 % (B1) und bekommen wiederum durch die Interaktion mit den anderen Klimaparametern eine entscheidende Rolle hinsichtlich des auslösenden Momentes für Rutschungen.

Der Jahresniederschlag spielt wie bei den anderen beiden Modellbeispielen keine ausschlaggebende Rolle bei der klimatischen Beurteilung, da über das in Betracht kommende Gebiet gesehen nur positive Abweichungen von 1,4 % (A1) bis 12,6 % (B1) vom langjährigen Mittel zu verzeichnen sind.

## 18.1 Abschätzung des Gefährdungspotenzials

Die Bewertung und Abschätzung des Gefährdungspotenzials hinsichtlich der möglichen Zunahme von Rutschungen aufgrund der erwarteten Klimaänderung entlang des Bundesfernstraßennetzes erfolgen zunächst separat für das Sommer- und Winterhalbjahr, da sich die klimatischen Bedingungen in diesen beiden Zeiträumen erheblich unterschiedlich entwickeln werden. Anschließend erfolgt eine Bewertung für das gesamte Jahr. Somit ist auch mit unterschiedlichen Ausgangssituationen für Rutschungen zu rechnen.

Für die Betrachtung hinsichtlich des Sommer- und Winterhalbjahrs werden die entsprechenden Klimaparameter ausgewählt und bewertet (Anlage 5). Dies geschieht zum einen mittels der Aufsummierung der jeweiligen prozentualen Abweichungen vom entsprechenden langjährigen Mittel und zum anderen unter dem empirischen Gesichtspunkt. Für

das Sommerhalbjahr wird nur der rutschungsrelevante Klimaparameter Starkniederschlag  $p > 20$  mm betrachtet. Eine Aufsummierung der Abweichungen bei den Klimaparametern erfolgt nur für das Winterhalbjahr. Darauf basierend erfolgen eine Einstufung in vier Gruppen hinsichtlich des Rutschungsrisikos und eine entsprechende grafische Darstellung mittels der definierten Farbgebung Rot, Orange, Gelb und Grün:

	sehr hoch
	hoch
	mäßig
	gering

Im nächsten Schritt erfolgt wieder die grafische Verschneidung mit dem ingenieurgeologischen Parameter Böschungsneigung (Anlage 6). Die Straßenabschnitte, die aufgrund ihrer Böschungsneigung in der entsprechenden Region und in Verbindung mit den klimatischen Bedingungen für Rutschungen anfällig sein könnten, werden hinsichtlich ihres Gefährdungsgrades farblich in hellroter Farbe auf der Karte kenntlich gemacht. Dabei wird für jeden der sieben 30-jährigen Zeitperioden eine Übersichtskarte mit der entsprechenden Klimaentwicklung für Sommer- und Winterhalbjahr sowie über das gesamte Jahr innerhalb der für die Betrachtung infrage kommenden Gitterboxen und des gekennzeichneten Gefährdungsbereichs für Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes erstellt.

Bei der Analyse wird bezüglich Lockergesteins- und Festgesteinsböschungen unterschieden, da sich die klimatischen Veränderungen auch unterschiedlich auf die verschiedenen Boden- und Gesteinsarten auswirken werden.

In den folgenden Kapiteln werden zum einen die jahreszeitliche Betrachtungsweise von Sommer- und Winterhalbjahr jeweils separat voneinander (Kapitel 18.1.1) und zum anderen die Beurteilung über das Jahr (Kapitel 18.1.2) für jedes der drei Untersuchungsgebiete Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg aufgezeigt.

### 18.1.1 Jahreszeitliche Betrachtung

Für die jahreszeitliche Betrachtung des Gefährdungspotenzials werden für das Sommerhalbjahr der Parameter Anzahl an Starkniederschlagsereignissen (Anlage 5.1) und für das Winterhalbjahr die Klimaparameter Winterniederschlagssumme, An-

zahl der Starkniederschlagsereignisse, Frostperioden und Frosttage (Anlage 5.2) verwendet.

Da, wie bereits in Kapitel 14 dokumentiert, die Niederschlagsmenge während der Sommerhalbjahre generell abnehmen wird, fließt dieser Klimaparameter nur indirekt bei der weiteren Analyse mit ein. Der Parameter Anzahl an Tagen mit Niederschlagsintensitäten von über 20 mm (Starkniederschläge) bekommt hingegen bei der Beurteilung einen sehr hohen Stellenwert, da verstärktes Eintreten von Starkniederschlagsereignissen ein Einsetzen von Schlamm- und Schuttströmen bei Lockergesteinsböschungen auslösen könnte. Wenn die Sommer insgesamt trockener werden, entstehen tiefe Schrumpfrisse in bindigen Böden.

Die führen bei Niederschlägen zu einem gezielten Bewässern potenzieller Gleitflächen, wodurch Rutschungen ausgelöst werden (KRAUTER, 2001). Bei zunehmendem Wassergehalt von Lockergesteinsmassen nimmt deren Scherfestigkeit ab, die abschiebenden Kräfte werden dadurch verstärkt und es kann zum Einsetzen von flachen Rutschungen kommen.

In geklüftetem Festgestein können durch die Zunahme von intensiven Niederschlagsereignissen und daraus resultierendem steigendem Kluft- bzw. Strömungsdruck die rückhaltenden Kräfte herabgesetzt werden. Auf potenziellen Gleitflächen kann schon ein dünner Wasserfilm ausreichen, um die Scherfestigkeit unter das Grenzgleichgewicht der Standsicherheit zu bringen.

Im Winterhalbjahr werden die Frostperioden und die einzelnen Frosttage abnehmen und somit auch ein häufiger Frost-Tau-Wechsel ausbleiben, welcher bei Festgesteinsböschungen durch den häufigen Temperaturwechsel zu Spannungsumlagerungen führt und somit eine Auflockerung des Gesteinsverbandes bewirken kann. Die Niederschlagsmengen sowie die Starkniederschlagsereignisse werden aber deutlich zunehmen. Diese klimatische Gesamtsituation würde sich dann dahingehend auf Lockergesteinsböschungen auswirken, dass der Boden durch abnehmende Bodenfrostperioden für den zunehmenden Winterniederschlag sowie die steigende Anzahl an Starkniederschlagsvorkommen aufnahmefähiger ist, d. h., es wird wesentlich mehr Wasser in den Boden versickern. Besonders kritisch sind extremer Starkniederschlag nach niederschlagsreichen Monaten und Abschmelzen einer Schneedecke durch anhaltende Regenfälle. In bereits aufgelockerten Rutschmas-

sen können Niederschläge leicht versickern, sodass es schnell zur drastischen Durchfeuchtung des Untergrundes kommt. Bei Überschreitung der Feldkapazität in den oberflächennahen Bodenschichten wird das Wasser in darunter liegende Schichten weiter sickern und könnte somit potenzielle Gleitflächen befeuchten, was zu einer wesentlichen Erhöhung der Rutschungsgefährdung der Böschung führen kann.

Im Nachfolgenden wird das Gefährdungspotenzial einzelner Straßenabschnitte der drei Modellgebiete Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg zunächst für das Sommerhalbjahr und im Anschluss für das Winterhalbjahr analysiert und bewertet (Anlage 5). Die Darstellung erfolgt grafisch, indem für jede 30-jährige Zeitperiode eine Karte (Anlage 6) erstellt wird und die klimatische Einstufung des Gefährdungspotenzials mittels o. g. vordefinierter Farbgebung aufgezeigt wird.

### Sommerhalbjahr

Für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials im Sommerhalbjahr wurde eine Einstufung in vier Gruppen vorgenommen, wobei die jeweiligen prozentualen Abweichungen vom langjährigen Mittel (1971-2000) des Kontrolllaufes herangezogen und hinsichtlich ihrer rutschungsrelevanten Bedeutung (Rutschungsrisiko) empirisch eingeteilt und bewertet wurden. Zum besseren Vergleich wurde eine einheitliche Einteilung hinsichtlich der ermittelten Abweichungen vom langjährigen Mittel für alle drei Beispiele vorgenommen und somit für die Einstufung des Gefährdungspotenzials.

Klimatischer Bewertungsparameter:

Prozentuale Abweichung der gemittelten Anzahl an Tagen mit Niederschlag  $p > 20$  mm der Sommerhalbjahre (Starkniederschlag) vom langjährigen Mittel:

	> 60 %	- sehr hohes Risiko
	30 - 60 %	- hohes Risiko
	20 - 30 %	- mäßiges Risiko
	0 - 20 %	- geringes Risiko

Die anschließende grafische Verschneidung mit den unterschiedlichen Böschungsneigungen der für mögliche Massenbewegungen prädestinierten Böschungen soll aufzeigen, in welcher Zeitperiode an welchem Straßenabschnittsbereich eine Gefahr für die Straße bestehen könnte. In Anlage 6.1 sind

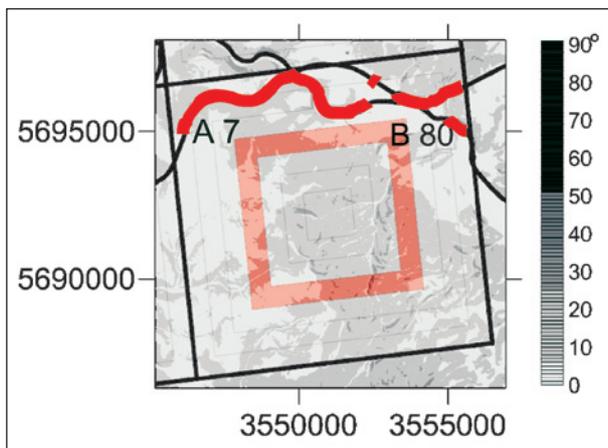
die potenziell gefährdeten Straßenabschnitte farblich in den Modelldarstellungen für jede Zeitperiode kenntlich gemacht. Die Gitterboxen mit den entsprechenden relevanten Straßenabschnitten werden in den Tabellen 1 bis 3 für jedes Modellgebiet aufgeführt.

**Modellgebiet Altmündener Wand**

Im Modellgebiet Altmündener Wand sind die klimatischen Bedingungen in Hinblick auf eine mögliche Zunahme von Starkniederschlagsereignissen und somit einer Gefährdung von Straßenabschnitten im Vergleich zu den anderen beiden Untersuchungsgebieten geringer. Betrachtet man das Beispiel für sich, werden die Starkniederschlagsereignisse innerhalb der Gitterbox C3 (Anlage 4.1) über die nächsten 90 Jahre am häufigsten eintreten. Die Zunahme der Anzahl an Tagen mit Niederschlagsintensitäten von über 20 mm beläuft sich in dieser Region auf bis zu 64 % (Anlage 5.1.1). Besonders während der Zeitperiode von 2041 bis 2070 könnte es bei Straßenabschnitten der Bundesstraße B 80 und der Bundesautobahn A 7 (Tabelle 1 und Bild 45 sowie Anlage 6.1.1) zu einer höheren Gefährdung kommen, da die o. g. Zunahme von 64 % in dieser

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2041-2070	C3	B 80, A7

**Tab. 1:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Altmündener Wand



**Bild 45:** Darstellung der Gitterbox C3 des Modellgebietes Altmündener Wand mit der Bundesstraße B 80 sowie der Autobahn A 7 und der klimatischen Einstufung des Gefährdungspotenzials (rot = sehr hoch) in der Zeitperiode 2041-2070 hinsichtlich des Sommerhalbjahres, der Böschungsneigung (Graustufen) und den potenziell gefährdeten Straßenabschnitten (hellrot)

Periode relativ hoch liegt und somit das Gefährdungspotenzial in diesem Bereich als sehr hoch eingestuft werden kann.

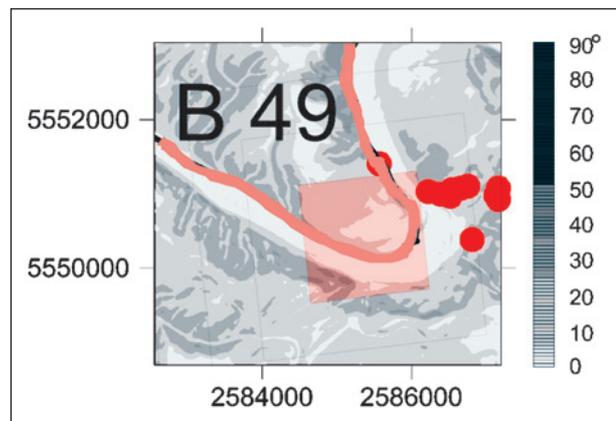
**Modellgebiet Pünderich**

Im Untersuchungsgebiet Pünderich sind bereits zwischen 2011 und 2040 Straßenabschnitte in der Gitterbox A3 und C1 durch eine Zunahme der Starkniederschlagsereignisse von 171,7 % bzw. 267,2 % als möglicherweise sehr hoch gefährdet einzustufen (Anlage 5.1.2). Dies würde Abschnitte der Bundesstraße B 49 (A3) (Bild 46) und der B 53 (C1) betreffen, die entlang der Mosel verlaufen (Tabelle 2 und Anlage 6.1.2).

Auch in den darauf folgenden Zeitperioden 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070 sowie 2051-2080 wären die Straßenabschnitte, die in Anlage 5.1.2 visualisiert sind, gefährdet. In der Region der Gitterbox A3 sind während dieser Zeitperioden Zunahmen von bis zu 192,5 % zu verzeichnen (Anlage 5.1.2). Die Region der Gitterbox C1 zeigt bis 2080

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2040	A3	B 49
2021-2050		B 49
2031-2060		B 53
2041-2070	C1	B 53
2051-2080	C1	B 53

**Tab. 2:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Pünderich



**Bild 46:** Ausschnitt aus dem Modellgebiet Pünderich. Dargestellt ist ein Ausschnitt der Gitterbox A3 mit der Bundesstraße B 49, dem Punktekataster von Schadensereignissen, der klimatischen Einstufung des Gefährdungspotenzials (rot = sehr hoch) für die Zeitperiode 2011-2040 hinsichtlich des Winterhalbjahres, der Böschungsneigung (Graustufen) und dem potenziell gefährdeten Straßenabschnitt (hellrot)

eine deutliche Zunahme an Starkniederschlägen von bis zu 274,1 %. Die intensiven Niederschläge werden innerhalb der Gitterbox A3 nach 2070 zwar wieder abnehmen, liegen aber immer noch mit Abweichungen von 28,3 % bis 54,7 % über dem langjährigen Mittel. In der Gitterbox C1 gehen die Starkniederschlagsereignisse bis zum Jahrhundertende sogar drastisch zurück. So liegt ihre Eintrittshäufigkeit in der Periode 2071-2100 unterhalb des langjährigen Mittels.

Das mögliche zeitliche Eintreten von Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes ist in der Tabelle 2 aufgeführt. Die potenziell gefährdeten Straßenbereiche sind den Abbildungen in der Anlage 6.1.2 zu entnehmen.

#### Modellgebiet Wißberg

Während der Sommerhalbjahre werden sich die Regionen der Gitterboxen A1, B1 und C2 in den fünf Zeitperioden von 2011-2040 bis 2051-2080 im Hinblick auf Starkniederschlagsereignisse am meisten verändern (Tabelle 3 und Anlage 5.1.3).

Das Zusammenspiel der 304,3%igen Zunahme der Starkniederschlagsereignisse in der Gitterbox A1 bereits im Zeitabschnitt 2011-2040, gefolgt von mehr als 113,0%igen Anstiegen während der Perioden 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070 und 2051-2080, und der für Rutschungsereignisse prädestinierten Böschungen lässt auf eine Gefährdung von Straßenabschnitten der B 41 und der B 48 schließen (Tabelle 3 und Anlage 6.1.3).

In den gleichen Zeitperioden könnten innerhalb der Gitterbox B1 Bereiche der B 420 und der B 428 gefährdet sein (Tabelle 3 und Anlage 6.1.3). Der Anstieg an Starkniederschlagsvorkommen liegt in dieser Region bei bis zu 636,5 % (Anlage 5.1.3). Genauso könnten zwischen 2011 und 2080 möglicherweise Abschnitte der B 271 und der Autobahn A 63 der Gitterbox C2 (Tabelle 3 und Anlage 6.1.3) für Rutschungen anfällig werden. Die Zunahme beträgt

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2040		
2021-2050	A1	B 48, B 41
2031-2060	B1	B 420, B 428
2041-2070	C2	B 271, A 63
2051-2080		

**Tab. 3:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Wißberg

dort bereits zwischen 2011 und 2040 bis zu 406,8 % (Anlage 5.1.3).

Zum Ende des Jahrhunderts wird das Rutschungsrisiko wohl geringer ausfallen, da die Extremwetterereignisse in den betrachteten Regionen deutlich abnehmen werden. Allerdings liegen sie noch über dem langjährigen Mittel von 1971-2000.

#### Winterhalbjahr

Um das Gefährdungspotenzial während des Winterhalbjahres beurteilen zu können, wurden die für die Wintermonate relevanten Klimaparameter bzw. deren jeweilige prozentualen Abweichungswerte zusammengefasst, bewertet und eine Einstufung vorgenommen (Anlage 5.2).

Klimatischer Bewertungsparameter:

Summe der prozentualen Abweichungen der Klimaparameter Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr, Starkniederschlagsereignisse, Frostperioden und -tage vom langjährigen Mittel:

	> 200 %	- sehr hohes Risiko
	150 - 200 %	- hohes Risiko
	100 - 150 %	- mäßiges Risiko
	0 - 100 %	- geringes Risiko

In Anlage 6.2 ist die grafische Korrelation der Klimabewertung mit dem ingenieurgeologischen Parameter Böschungsneigung für jede 30-jährige Zeitperiode dargestellt. Von Rutschungen möglicherweise betroffene Straßenabschnitte sind in hellroter Farbe in den jeweiligen Karten gekennzeichnet und die Straßenbezeichnung mit der jeweiligen dazugehörigen Gitterboxbezeichnung in den Tabellen 4 bis 6 für die drei Fallbeispiele aufgeführt.

#### Modellgebiet Altmündener Wand

Während der Winterhalbjahre könnten über die nächsten 90 Jahre die Straßenabschnitte der Gitterboxen B3 und C3 für Rutschungen generell am anfälligsten sein (Tabelle 4 und Anlage 6.2.1).

In der Periode 2021-2050 tritt möglicherweise eine erste größere Gefährdung ein, da der Bewertungsparameter mit deutlichen Abweichungen von bis zu 280,1 % (Anlage 5.2.1) sehr hoch liegt und somit bestimmte Straßenabschnitte der B 3 bzw. B 80 und A 7 für Rutschungen gefährdet sein könnten (Anlage 6.2.1). Auch in den darauf folgenden

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2021-2050	B3	B 3
	C3	B 80, A 7
2031-2060	C3	B 80, A 7
2041-2070	B3	B 3
	C3	B 80, A 7
2051-2080	A2	B 80
	B2	B 3, B 80
	C2	B 3, B 496
	C3	B 80, A 7
2061-2090	A2	B 80
	B2	B 3, B 80
	B3	B 3
	C2	B 3, B 496
	C3	B 80, A 7
2071-2100	A2	B 80
	B2	B 3, B 80
	C2	B 3, B 496
	C3	B 80, A 7

**Tab. 4:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Altmündener Wand

Perioden sind diese Straßenabschnitte als sehr gefährdet einzustufen (Anlagen 5.2.1 und 6.2.1 sowie Tabelle 4). Ab 2051 sind zudem noch Straßenabschnitte der Bundesstraßen B 3, B 80 und B 496 innerhalb der Gitterboxen A2, B2 und C2 als sehr gefährdet einzustufen, da der Bewertungsparameter dann jeweils über 200 % liegt und somit bestimmte Böschungen für Rutschungen prädestiniert sein könnten (Tabelle 4 und Anlage 5.2.1). Das mögliche zeitliche Eintreten für Rutschungen entlang der Straße ist der Tabelle 4 zu entnehmen.

#### Modellgebiet Pünderich

Die Gitterboxen A3 und C1 sind aufgrund ihres extrem hohen Bewertungsparameters von bis zu 2.585,1 % (C1) über die sieben Zeitperioden gesehen am meisten von der Klimaänderung betroffen (Anlage 5.2.2). Straßenabschnitte der B 49 bzw. der B 53 sind dabei aufgrund rutschungsanfälliger Böschungsneigungen möglicherweise gefährdet (Tabelle 5 und Anlage 6.2.2).

Auch Straßenabschnitte der Gitterboxen B2, B3 und C2 (Tabelle 5 und Anlage 6.2.2) sind in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts aufgrund des hohen Bewertungsparameters von bis zu 596,5 % (A3) gefährdet (Anlage 5.2.2).

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2040	A3	B 49
2021-2050	C1	B 53
2031-2060	A3	B 49
2041-2070	A3	B 49
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
2051-2080	A3	B 49
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
	C2	B 53, B 50
2061-2090	A3	B 49
	B2	B 49, B 53
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
	C2	B 53, B 50

**Tab. 5:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Pünderich

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2040	A1	B 48, B 41
2021-2050	B1	B 420, B 428
2031-2060	C2	B 271, A 63
2041-2070	A1	B 48, B 41
	B1	B 420, B 428
	B2	B 271, B 420
	C2	B 271, A 63
2051-2080	A1	B 48, B 41
	A3	A 63
	B1	B 420, B 428
	B2	B 271, B 420
	C2	B 271, A 63

**Tab. 6:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Wißberg

#### Modellgebiet Wißberg

Die Gitterboxen A1, B1 und C2 sind hinsichtlich der Klimaänderung über die Winterhalbjahre am meisten gefährdet. Der Bewertungsparameter liegt über alle sieben Zeitperioden mit Werten bis zu 774,5 % sehr hoch (Anlage 5.3.3). Durch die Verschneidung mit dem Neigungsparameter ergibt sich für einen Abschnitt der B 48 und der B 41 innerhalb der Gitterbox A1, für Bereiche der B 420 und der B 428 in der Gitterbox B1 sowie für Teilbereiche der B 271 und der A 63 ein sehr hohes Gefährdungspotenzial (Tabelle 6 und Anlage 6.2.3).

Auch Straßenbereiche der Gitterboxen A3 und B2, die in Tabelle 6 aufgelistet und in der Anlage 6.2.3 grafisch kenntlich gemacht sind, könnten ab 2041 bzw. 2051 besonders gefährdet sein.

### 18.1.2 Ganzjährige Betrachtung

Da das Fernziel darin bestehen könnte, eine bundesweite Gefahrenkarte zu erstellen, werden zur Vereinfachung der Betrachtungsweise bzw. der späteren Anwendung für potenzielle Nutzer einer solchen Karte alle ausgewählten Klimaparameter für Sommer- und Winterhalbjahr hinsichtlich ihres rutschungsrelevanten Einflusses zusammengefasst und bewertet.

Auch der gemittelte Jahresniederschlag, der zwar im Vergleich zum langjährigen Mittel 1971-2000 nicht nennenswert zunehmen und somit auch keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die mögliche Zunahme von Rutschungen haben wird, fließt in die Gesamtbetrachtung mit ein.

Der Jahresniederschlag wird sich hauptsächlich dahingehend verändern, dass eine Verlagerung der Niederschlagsverhältnisse über das Jahr zu verzeichnen sein wird, und zwar so, dass die Sommerniederschlagsmengen abnehmen und die Niederschläge während des Winterhalbjahres zunehmen werden.

Die Bewertung und Einstufung der Klimaparameter basieren auf der Aufsummierung aller Klimaparameter bzw. deren prozentualen Abweichungen vom langjährigen Mittel sowie der Gewichtung in Bezug auf den jeweiligen auslösenden Faktor eines einzelnen Parameters aus ingenieurgeologischer Sicht.

Klimatischer Bewertungsparameter:

Summe der prozentualen Abweichungen aller Klimaparameter vom langjährigen Mittel

	> 200 %	- sehr hohes Risiko
	150 - 200 %	- hohes Risiko
	100 - 150 %	- mäßiges Risiko
	0 - 100 %	- geringes Risiko

Die klimatische Gesamtbewertung der drei Fallbeispiele Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg ist in der Anlage 5.3 dokumentiert. In Anlage 6.3 sind die potenziellen Gefährdungsbereiche der Straßen grafisch ausgewiesen.

#### Modellgebiet Altmündener Wand

Betrachtet man die klimatische Gesamtsituation im Modellgebiet Altmündener Wand, zeigt sich, dass sich die Regionen der Gitterboxen B3 und C3 in

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2050	C3	B 80, A 7
2021-2050	B3	B 3
2031-2060		
2041-2070	A2 B3 C2 C3	B 80 B 3 B 3, B 496 B 80, A 7
2051-2080	A2 B2	B 80 B 3, B 80
2061-2090	B3	B 3
2071-2100	C2 C3	B 3, B 496 B 80, A 7

Tab. 7: Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Altmündener Wand

den nächsten 90 Jahren am meisten verändern werden (Anlage 5.3.1). Korreliert man dieses Ergebnis mit dem ingenieurgeologischen Parameter, um eine Abschätzung hinsichtlich des Gefährdungsgrades von Straßenabschnitten zu erhalten, ergibt sich daraus, dass Bereiche der B 3, B 80 und der A 7 unter den genannten Gesichtspunkten für Rutschungen sehr anfällig sind (Anlage 6.3.1). Bereits in der Periode 2011-2040 sind Abschnitte der B 80 und die A 7 sehr hoch gefährdet.

Straßenbereiche der B 80, B 3 und B 496 innerhalb der Gitterboxen A2, B2 und C2 könnten gegebenenfalls in Hinblick auf ihren hohen Bewertungsparameter in der zweiten Jahrhunderthälfte auch für Rutschungen empfänglich sein. In der Gitterbox A2 könnte dies ab 2041 und in den anderen beiden Gitterboxen B2 und C2 ab 2051 der Fall sein (Anlage 5.3.1).

Der mögliche zukünftige zeitliche Verlauf für das Eintreten von Rutschungen und das damit verbundene Gefährdungspotenzial für bestimmte Straßenabschnitte sind der Tabelle 7 und der Anlage 6.3.1 zu entnehmen.

#### Modellgebiet Pünderich

Für das Modellgebiet Pünderich wird sich das Klima besonders deutlich innerhalb der Gitterboxen A3 und C1 bis 2100 verändern (Anlage 5.3.2). Straßenabschnitte der B 49 und B 53 könnten aufgrunddessen und unter den ingenieurgeologischen Gegebenheiten in Hinblick auf das mögliche Eintreten von Rutschungen besonders hoch gefährdet sein (Anlage 6.3.2).

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2040	A3	B 49
2021-2050	C1	B 53
2031-2060	A3	B 49
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
2041-2070	A3	B 49
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
2051-2080	A3	B 49
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
	C2	B 53, B 50
2061-2090	A3	B 49
	B2	B 49, B 53
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
	C2	B 53, B 50
2071-2100	B2	B 49, B 53
	B3	B 53, B 421
	C1	B 53
	C2	B 53, B 50

**Tab. 8:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Pünderich

In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts könnten zudem Böschungen entlang der Bundesstraßen B 49, B 53, B 421 und B 50 innerhalb der Gitterboxen B2, B3 und C2 hinsichtlich möglicher Rutschungsereignisse beeinträchtigt sein. Die klimatische Gesamtsituation innerhalb dieser drei Gebiete verändert sich besonders ab 2041 bzw. 2051 (Anlage 5.3.2). Welche Straßen wann und wo am meisten gefährdet sein könnten, ist der Tabelle 8 und der Anlage 6.3.2 zu entnehmen.

#### Modellgebiet Wißberg

Die klimatische Veränderung wird sich in den Gitterboxen A1 und B1 und C2 des Untersuchungsgebietes Wißberg am meisten auswirken (Anlage 5.3.3). Die Interaktion der einzelnen Klimaparameter ist in diesen Regionen über die nächsten neun Jahrzehnte als besonders kritisch hinsichtlich des möglichen Auslösens von Massenbewegungen einzustufen. Die Starkniederschlagsereignisse im Sommer- und Winterhalbjahr werden extrem zunehmen und die Frostperioden/-tage deutlich abnehmen. Dadurch sind abschnittsweise die Bundesstraßen B 41, B 48, B 420, B 428, B 271 und die Bundesautobahn A 63 als sehr gefährdet anzusehen (Anlage 6.3.3).

Zeitperiode	Gitterbox	Straßenabschnitt
2011-2040	A1	B 48, B 41
2021-2050	B1	B 420, B 428
2031-2060	C2	B 271, A 63
2041-2070	A1	B 48, B 41
	B1	B 420, B 428
	B2	B 271, B 420
2051-2080	C2	B 271, A 63
	A1	B 48, B 41
	A3	A 63
	B1	B 420, B 428
2061-2090	B2	B 271, B 420
2071-2100	C2	B 271, A 63

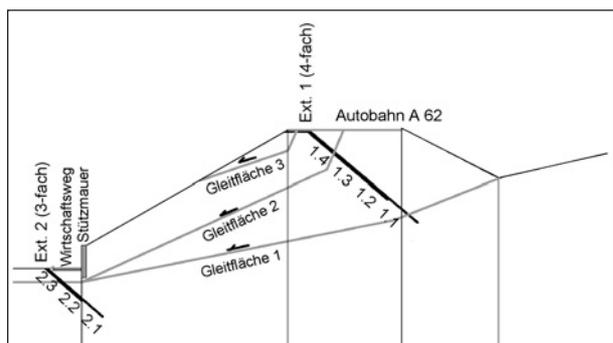
**Tab. 9:** Übersicht über die zeitliche Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Straßenabschnitten im Modellgebiet Wißberg

Ab der zweiten Jahrhunderthälfte könnte auch in den Regionen der Gitterboxen A3 und B2 mit möglichen Rutschungen zu rechnen sein (Anlage 5.3.3). So könnten Bereiche der Bundesstraße B 271 und B 420 äußerst gefährdet sein (Anlage 6.3.3).

## 19 Kontroll- und Frühwarnsystem zur Überwachung von Böschungsbewegungen

Die Stabilisierung von Rutschhängen mit tiefliegenden Gleitflächen oder sehr großen Kubaturen ist häufig aus wirtschaftlichen Erwägungen nicht umsetzbar. Liegen Verkehrswege oder Bauwerke innerhalb solcher aktiver Rutschungen, kann eine permanente Kontrolle der Bewegungsraten eine Stabilisierungsmaßnahme zumindest zeitweise ersetzen. Zur dauerhaften Kontrolle von Böschungsbewegungen werden Wegaufnehmer (z. B. Extensometer) bzw. Neigungsmesser (Inklinometer) eingebaut, die mit einer elektronischen Datenerfassungseinheit verbunden sind. Mit standardisierten Datenübertragungsdiensten (GSM, DSL etc.) werden in bestimmten – vom Gefährdungsgrad abhängigen – Zeitintervallen Messwerte zu einem Server oder PC übermittelt, dort berechnet und grafisch dargestellt. Wird ein vorbestimmter Grenzwert überschritten, löst die Anlage vor Ort via Mitteilung über Sprachanruf, SMS, E-Mail an die zuständigen Stellen – evtl. verbunden mit optischen oder akustischen Signalen vor Ort – Alarm aus.

Ein Beispiel für ein großes und aktives Rutschareal ist der Autobahndamm der A 62 Landstuhl–Trier bei



**Bild 47:** Schematische Darstellung der Funktionsweise der beiden Mehrfach-Extensometer anhand potenzieller Gleitflächen im Querprofil des Autobahndammes der A 62

Quirnbach/Pfalz (Bild 47). Seit einigen Jahrzehnten kommt es dort zu Verformungen in den Fahrbahnen und zu Schäden im umliegenden Gelände durch konstante Böschungsdeformationen.

Zur Minimierung des Gefährdungsausmaßes für die A 62 und das umliegende Gelände wurde ein permanentes Monitoring der Dammbewegungen mittels eines Messsystems bestehend aus Bohrloch-Extensometern und einer Messzentrale veranlasst.

Die Extensometer, die zur Erfassung von Verschiebungen längs der Messachse dienen, wurden zum einen im Bereich der Dammschulter an der Autobahn und zum anderen im Dammfuß im unteren Geländebereich installiert. Über Sammelkabel werden sowohl die Daten der Längenmessung als auch der Temperaturmessung durch Sensoren am Extensometerkopf an die Messzentrale weitergeleitet, von wo sie durch permanente Kommunikation mit der Anlage abgerufen und ausgewertet werden können.

Bewegungen, die durch Niederschläge bzw. auch Starkniederschlagsereignisse aktiviert werden würden, könnten durch diese Art von Kontrollsystem erkannt werden.

Diese Art von Kontroll- und Frühwarnsystem könnte in rutschungsgefährdeten Böschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes eingebaut werden, womit eine dauerhafte Überwachung von Böschungsbewegungen gewährleistet wäre. Im Fall von sich beschleunigenden Böschungsbewegungen könnten zeitnah sofort Sicherungsmaßnahmen getroffen werden.

Mit solchen Systemen kann bei konstanten Bewegungsabläufen ein hoher Kostenaufwand präventiv vermieden werden. Unter Umständen müssen nur

geringe Kosten für die Unterhaltung der Straßeninstandsetzung (Ausbesserung der Schwarzdecke o. Ä.) aufgewendet werden.

## 20 Zusammenfassung

Abschließend sollen noch einmal die wichtigsten Ergebnisse dieses Forschungsprojektes hervorgehoben werden.

Unter dem Aspekt der erwarteten Klimaänderung des Szenarios A1B wird sich das regionale Klima innerhalb der drei ausgewählten Fallbeispiele Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg folgendermaßen verändern:

- deutliche Zunahme der Starkniederschlagsereignisse sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr,
- Zunahme der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr,
- Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr,
- geringe Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge,
- deutliche Abnahme der Frostperioden und der einzelnen Frosttage.

Zusammenfassend bedeutet dies eine generelle Abnahme der Niederschlagsmengen im Sommerhalbjahr, d. h., der Sommer wird generell trockener, aber die Starkniederschlagsereignisse mit Intensitäten von über 20 mm am Tag werden deutlich zunehmen. Die Winterhalbjahre werden zum einen durch die Zunahme der Niederschlagssummen als auch durch zunehmende Starkniederschlagsereignisse gekennzeichnet sein und zum anderen durch die deutliche Abnahme sowohl der einzelnen Frosttage als auch der Frostperioden.

Diese klimatische Entwicklung wird sich auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Rutschereignissen wie folgt auswirken:

Im Fall von Lockergesteinsböschungen:

- Zunahme von oberflächennahen Rutschungen, Schlamm- und Schuttströmen.
- Anstieg der Rutschungshäufigkeit gegen Ende des Winterhalbjahres aufgrund verstärkter Ver-

sickerung der Niederschläge in den Boden und der damit verbundenen längerfristigen Erhöhung des Wassergehaltes im Untergrund, was zu einer Verminderung der rückhaltenden Kräfte führt und letztendlich zur Auslösung von Rutschungen in den Deckschichten und der Verwitterungs- und Auflockerungszone des Festgesteins.

Im Fall von Festgesteinböschungen:

- Zunahme von Verwitterungs- und Erosionsprozessen und Versickerung von Niederschlägen in Trennflächen aufgrund des vermehrten Niederschlags bei niedriger Verdunstungsrate im Winter, was zu einer Destabilisierung des Gesteinsverbandes führt.

Mittels einer empirisch-statistischen Analyse von klimatischen und ingenieurgeologischen rutschungsrelevanten Parametern sowie der zusätzlichen Verknüpfung mit dem digitalen Bundesfernstraßennetz und einem digitalen Punktekataster von Schadensereignissen wird eine zeitliche Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von möglichen zukünftigen Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes möglich. Das potenzielle Rutschungsrisiko kann auf diese Weise zeitabhängig entlang einzelner Straßenabschnitte abgeschätzt werden.

Der Vergleich der klimatischen Entwicklung in den Regionen der ausgewählten Gitterboxen bzw. die Interaktion der Klimabedingungen und der Böschungsneigungen entlang des Bundesfernstraßennetzes zum einen jahreszeitlich und zum anderen über das gesamte Jahr zeigt hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung innerhalb der drei Fallbeispiele sowohl regionale Unterschiede als auch Gemeinsamkeiten.

Folgende Analyseergebnisse für die drei Modellgebiete Altmündener Wand, Pünderich und Wißberg sollen an dieser Stelle noch einmal aufgeführt werden:

- Einige Regionen (Gitterboxen) in den drei Modellgebieten sind aufgrund der dortigen klimatischen Entwicklung und der vorherrschenden ingenieurgeologischen Gegebenheiten über die nächsten 90 Jahre hinsichtlich des Eintretens von Schadensereignissen gefährdeter als andere Regionen in den jeweiligen Modellgebieten, was sich dementsprechend auf die Bundesfernstraßen auswirken wird.

- Über das Sommerhalbjahr gesehen ist das Gefährdungspotenzial hinsichtlich potenzieller Rutschereignisse entlang der Bundesfernstraßen im Modellgebiet Wißberg im Vergleich zu den anderen beiden Gebieten am höchsten einzustufen, da mehr Zeitperioden über mehrere Gitterboxen als sehr hoch gefährdet eingestuft wurden. Im Modellgebiet Pünderich betrifft diese Einstufung zwei Gitterboxen. Im Gegensatz dazu ist nur die Zeitperiode 2041-2070 in einer Gitterbox im Modellgebiet Altmündener Wand als sehr hoch gefährdet einzuschätzen.

In allen drei Fällen nimmt das Gefährdungspotenzial gegen Ende des Jahrhunderts wieder ab, d. h., die Zeitperiode zwischen 2011 und 2080 ist aus klimatischer Sicht kritischer einzustufen und somit auch die Gefährdung rutschungsanfälliger Böschungen.

- In Hinblick auf das Gefährdungspotenzial über das Winterhalbjahr gesehen zeigt die Region um den Wißberg, gefolgt von dem Modellgebiet Pünderich und Altmündener Wand, generell in den nächsten Jahren ein häufigeres Auftreten von sehr hohen Gefährdungspotenzialen. So könnten Straßenabschnitte innerhalb der Gitterboxen A1, B1 und C2 hinsichtlich potenzieller Rutschereignisse in den nächsten 90 Jahren durchgehend sehr hoch gefährdet sein. Im Modellgebiet Pünderich ist dies auch innerhalb der Gitterboxen A3 und C1 bis zum Jahr 2100 der Fall. Für das Gebiet um die Altmündener Wand sind erst ab der zweiten Jahrhunderthälfte möglicherweise höhere Risiken für Straßenbereiche auszumachen.

Betrachtet man die das Winterhalbjahr betreffende Gesamtsituation in allen Modellgebieten, erkennt man, dass in allen drei Modellgebieten alle Gitterboxen, die für die Analyse infrage kommen, ein sehr hohes Gefährdungspotenzial ab der zweiten Jahrhunderthälfte besitzen. D. h., die unter ingenieur-geologischen Gesichtspunkten ausgewählten Böschungen innerhalb dieser Gebiete könnten potenziell rutschungsgefährdet sein.

- Die Betrachtung hinsichtlich der Gesamtsituation über das Jahr gesehen, d. h. unter Einbeziehung aller Klimaparameter inklusive Jahresniederschlag, zeigt ein ähnliches Bild wie bereits im Fall der Winterhalbjahr-Analyse. Im Modellgebiet Wißberg und Pünderich verändert sich

die zeitabhängige Einstufung hinsichtlich des Gefährdungspotenzials im Vergleich zur winterhalbjährigen nicht. Im Modellgebiet Altmündener Wand wirkt sich hingegen die zusätzliche Einbeziehung der Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr und der Jahresniederschlag bei der Einstufung dahingehend aus, dass Zeitperioden in einer Gitterbox eine nächsthöhere Bewertung bzw. Einstufung hinsichtlich des Gefährdungspotenzials erhalten.

Bei der Modellbetrachtung hinsichtlich der Abschätzung des zukünftigen Gefährdungspotenzials entlang der Bundesstraßen und Bundesautobahnen ist jedoch auch explizit darauf hinzuweisen, dass bestimmte Faktoren unberücksichtigt bleiben, so zum Beispiel die Tatsache, dass die Projektion für das potenzielle Risiko für die Zeitperioden nach Abgang sämtlicher rutschgefährdeter Bodenmassen nicht mehr zutreffen würde, da sich der betreffende Böschungsabschnitt dadurch selbst „stabilisieren“ kann und damit die Eintrittswahrscheinlichkeit einer erneuten Massenbewegung an der gleichen Stelle zu einem späteren Zeitpunkt unwahrscheinlicher macht.

## 21 Ausblick

Bei der in diesem Projektvorhaben ersten Abschätzung einer möglichen Zunahme von Rutschereignissen und deren Auswirkung auf das Bundesfernstraßennetz in ausgewählten Gebieten ist darauf hinzuweisen, dass die Aussage auf einem ersten Modellansatz basiert, der neben diversen Klimaparametern nur die Böschungsneigung berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung weiterer rutschungsrelevanter Parameter wie Geologie (boden- und felsmechanische Parameter), Exposition, Grundwasserverhältnisse, Vegetation etc. muss das Modell noch weiter ausgearbeitet und verfeinert werden. Zudem beruht die Abschätzung auf einem bestimmten zukünftigen Klimaszenario, d. h., auch nur bei Eintritt dieses Szenarios würde die Risiko einschätzung entlang des Bundesfernstraßennetzes zum tragen kommen.

Das Ergebnis des Forschungsprojektes zeigt, dass die angewendete Vorgehensweise hinsichtlich einer Abschätzung eines möglichen zunehmenden Gefährdungspotenzials durch Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes unter klimatischen

und morphologischen Gesichtspunkten erfolgversprechend ist. Daher ist es empfehlenswert, die begonnene Modellbetrachtung anhand weiterer Fallbeispiele fortzuführen und zu intensivieren, damit das Netz von regionaltypischen Informationen verdichtet werden kann.

Das Fernziel sollte daher die Entwicklung eines bundesweiten Modells sein, in das sowohl der Trend der Klimaänderung bis zum Jahr 2100 als auch weitere bereits erwähnte rutschungsrelevante Parameter mit einfließen sollten, und das für die Benutzer grafisch anschaulich visualisiert werden kann. Verknüpft mit einem Rutschungsereigniskataster und dem digitalen Bundesfernstraßennetz könnte so eine bundesweite Risikokarte für das Bundesfernstraßennetz entwickelt werden, aus der potenzielle rutschungsgefährdete Straßenabschnitte mit der dazugehörigen Kilometrierung für bestimmte Zeitperioden ermittelt und entsprechend ihrem Gefährdungsgrad farblich visualisiert werden könnten.

Diese Risikokarte könnte dazu herangezogen werden, rutschungsgefährdete Böschungen zu lokalisieren, die dann im nächsten Schritt zu ausgearbeiteten Handlungsempfehlungen näher untersucht werden könnten, z. B. durch den Einsatz von Erkundungs- und Überwachungsmethoden. Somit wäre es möglich, mit Hilfe rechtzeitig ausgeführter Anpassungsmaßnahmen Rutschungen und daraus resultierende Schäden zu minimieren bzw. auch zu vermeiden und (Folge-)Kosten zu reduzieren.

## Verzeichnis der Anlagen

Der Originalbericht enthält die folgenden Anlagen, die dieser Veröffentlichung auf CD beigelegt sind:

- Anlage 1** Fließdiagramm zur Entwicklung des klimatisch-ingenieurgeologischen Modells
- Anlage 2** Abweichungen der Klimaparameter vom langjährigen Mittel (1971-2000) und Einstufung
  - Anlage 2.1** Modellgebiet Altmündener Wand
  - Anlage 2.2** Modellgebiet Pünderich
  - Anlage 2.3** Modellgebiet Wißberg

- Anlage 3** Grafische Darstellung der Böschungsneigungen und Lokation der Rutschungen in den Modellgebieten
- Anlage 3.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 3.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 3.3 Modellgebiet Wißberg
- Anlage 4** Grafische Darstellung der Klimaentwicklung anhand der Klimaparameter
- Anlage 4.1 Grafische Darstellung der Klimaentwicklung im Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 4.1.1 Klimaparameter Frostperioden
- Anlage 4.1.2 Klimaparameter Frosttage
- Anlage 4.1.3 Klimaparameter Niederschlag im Winterhalbjahr
- Anlage 4.1.4 Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Winterhalbjahr
- Anlage 4.1.5 Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr
- Anlage 4.1.6 Klimaparameter Jahresniederschlag
- Anlage 4.2 Grafische Darstellung der Klimaentwicklung im Modellgebiet Pünderich
- Anlage 4.2.1 Klimaparameter Frostperioden
- Anlage 4.2.2 Klimaparameter Frosttage
- Anlage 4.2.3 Klimaparameter Niederschlag im Winterhalbjahr
- Anlage 4.2.4 Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Winterhalbjahr
- Anlage 4.2.5 Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr
- Anlage 4.2.6 Klimaparameter Jahresniederschlag
- Anlage 4.3 Grafische Darstellung der Klimaentwicklung im Modellgebiet
- Anlage 4.3.1 Klimaparameter Frostperioden
- Anlage 4.3.2 Klimaparameter Frosttage
- Anlage 4.3.3 Klimaparameter Niederschlag im Winterhalbjahr
- Anlage 4.3.4 Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Winterhalbjahr
- Anlage 4.3.5 Klimaparameter Starkniederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr
- Anlage 4.3.6 Klimaparameter Jahresniederschlag
- Anlage 5** Bewertung des klimatischen Gefährdungspotenzials
- Anlage 5.1 Bewertung für das Sommerhalbjahr
- Anlage 5.1.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 5.1.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 5.1.3 Modellgebiet Wißberg
- Anlage 5.2 Bewertung für das Winterhalbjahr
- Anlage 5.2.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 5.2.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 5.2.3 Modellgebiet Wißberg
- Anlage 5.3 Bewertung für das gesamte Jahr
- Anlage 5.3.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 5.3.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 5.3.3 Modellgebiet Wißberg
- Anlage 6** Grafische Darstellung zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials von Rutschungen entlang des Bundesfernstraßennetzes
- Anlage 6.1 Gefährdungsabschätzung im Sommerhalbjahr
- Anlage 6.1.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 6.1.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 6.1.3 Modellgebiet Wißberg
- Anlage 6.2 Gefährdungsabschätzung im Winterhalbjahr
- Anlage 6.2.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 6.2.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 6.2.3 Modellgebiet Wißberg
- Anlage 6.3 Gefährdungsabschätzung über das gesamte Jahr
- Anlage 6.3.1 Modellgebiet Altmündener Wand
- Anlage 6.3.2 Modellgebiet Pünderich
- Anlage 6.3.3 Modellgebiet Wißberg

## Literatur

- BARTHEL, F.: Ingenieurgeologische Untersuchungen von Massenbewegungen im Rahmen einer geplanten Flurbereinigung am Wißberg/Rheinhesen, Diplomarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, unveröffentlicht, 1989
- BECKER, M.: Entwicklung von computergestützten Hangstabilitätsmodellen zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für die Region Rheinhesen. Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 2005
- BERZ, G.: Naturkatastrophen und Klimaänderung – und ihre Folgen für die Versicherungswirtschaft, RISKNEWS, Vol. 1, Issue 6, S. 6-20, 2004
- BINARD-KÜHNEL, Y.: Ingenieurgeologisches Gutachten A 5 Rutschhang Niedergemünden, Baustoff- und Bodenprüfstelle Wetzlar, unveröffentlicht, 2000
- BRODBECK, M.: Klima und Hangkinematik am Beispiel der Großschollenrutschung „Wildenberger Hang“ (BAB A 81, nördlich Heilbronn), Vortragsfassung, 42. Erfahrungsaustausch des Bundes und der Länder über Erdarbeiten im Straßenbau (EAT) in Nürnberg-Wetzendorf am 05. und 06. Mai 2010
- DAMM, B.: Gravitative Massenbewegungen in Südniedersachsen. Die Altmündener Wand – Analyse und Bewertung eines Rutschungsstandortes. Z. Geomorph. N. F., Suppl.-Bd. 138: 189-209, 2005
- DAMM, B. & PFLUM, S.: Geomorphologische Naturgefahren und Raumplanung – Bewertungsprobleme am Beispiel von Rutschgefahren in Südniedersachsen. Z. Geomorph. N. F., Suppl.-Bd. 135: 127-146, 2004
- DAMM, B.: Die „Altmündener Wand“ am Rabanenkopf, 120 Jahre Hangrutschungen – Rutschungsgeschichte, Sanierungskonzepte, Hang- und Verkehrssicherung. Göttinger Jahrbuch 50: 7-20, 2002
- DAMM, B.: Hangrutschungen im Mittelgebirgsraum – Verdrängte „Naturgefahr“? Standort, Zeitschrift für Angewandte Geographie 24: 27-34, 2000
- ENZMANN, D.: Was ist Signifikanz? Skript zur Vorlesungsveranstaltung Logik des Signifikanztests, statistische Tests für Mittelwerte einer Population, Hypothesentests für Mittelwertunterschiede, Universität Hamburg, 2011
- GIDDE, A.: Fallbeispiele Böschungsschäden in Niedersachsen, Vortragsfassung, 42. Erfahrungsaustausch des Bundes und der Länder über Erdarbeiten im Straßenbau (EAT) in Nürnberg-Wetzendorf am 05. und 06. Mai 2010
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2007: The Physical Science Basis, [SOLOMON, S. et al. (Hrsg.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2007
- JACOB, D., GOETTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, P. & SIEK, K.: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Climate Change, Umweltbundesamt, 11/08
- KRAUTER, E. & LAUTERBACH, M.: Systematische Bestandsaufnahme – Abschätzung des Gefahrenpotenzials durch Steinschlag, Felssturz und Rutschung sowie Empfehlung erforderlicher Sicherungsmaßnahmen – an der DB-Strecke Koblenz-Perl (3010) zwischen Bahn-km 61,6 und 62,1, geo-international, Mainz, unveröffentlicht, 2004
- KRAUTER, E.: Kontrollmaßnahmen im Bereich der Rutschung Pünderich an der DB-Strecke Koblenz-Perl (3010) zwischen Bahn-km 61,600 u. 62,100: Beschreibung der automatischen Hangüberwachungsanlage Pünderich, geo-international, Mainz, unveröffentlicht, 2001
- KRAUTER, E.: Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In: SMOLTCZYK, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 6. Aufl, Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- KRAUTER, E.: Ingenieurgeologisch-geotechnisches Gutachten über Kontrollmaßnahmen im Bereich der Rutschung Pünderich auf der DB-Strecke Koblenz-Perl (3010) auf Bahn-km 61,6 bis 62,1, Az.: 142-0500-Kr, geo-international, Mainz, unveröffentlicht, 2000
- KRAUTER, E.: Rutschungen unter Kontrolle? Monitoring und Stabilisierung von Massenbewegungen. Geospektrum (1998), Heft 4, S. 20-24, Heidelberg, 1998

- KRAUTER, E.: Ingenieurgeologisch-geotechnisches Gutachten „Rutschung Reil-Pünderich, Az.: Pün-96, geo-international, Mainz, unveröffentlicht, 1996
- KRAUTER, E.: Böschungsrutschungen im Rheinischen Schiefergebirge, u. a. am Beispiel des Autobahnabschnittes an der A 61 bei Bengen. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 34. Erfahrungsaustausch in Bad Bergzabern, 1995
- KRAUTER, E., KERZAN, K. & HOFMANN, G.: Deformationen an Felshängen. In: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, 5, S. 57-59, Kirschbaum, Bonn, 1989
- KRAUTER, E. & STEINGÖTTER, K.: Die Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens. Geol. Jb., C 34, S. 3-31, Hannover, 1983
- KRAUTER, E.: Möglichkeiten der Klassifizierung und Sanierung von Rutschungen. In: Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen: Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“; H. 3, S. 83-88, Kirschbaum, Bonn-Bad Godesberg, 1980
- LAUTERBACH, M. & FEUERBACH, J.: Ingenieurgeologisch-geotechnischer Zwischenbericht: Kontrollmaßnahmen im Bereich der Rutschung Pünderich an der DB-Strecke Koblenz-Perl (3010) zwischen Bahn-km 61,600 u. 62,100, geo-international, Mainz, unveröffentlicht, 2010
- LAUTERBACH, M.: Überwachung der Hang- und Böschungsbewegungen im Bereich des Autobahndammes der A 62 bei Quirnbach/Pfalz mittels Einbaus eines permanenten Messsystems mit Bohrloch-Extensometern, Handbuch mit Beschreibung zur Messanlage und Erläuterung der Alarmeinrichtung, geo-international, Mainz, unveröffentlicht, 2009
- LAUTERBACH, M.: Ingenieurgeologisch-geotechnische Untersuchungen der Rutschung des Autobahndammes der A 62 bei Quirnbach/Pfalz. 181 S., Diplomarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, unveröffentlicht, 1999
- MATTHESIUS, H. J.: Entwicklung eines Geotechnischen Informationssystems zur Kontrolle von Hangrutschungen, Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 1994
- Multilingual Landslides Glossary: The International Geotechnical Societies UNESCO Working Party for World Landslide Inventory. The Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers Ltd., 1993
- PRINZ, H.: Abriss der Ingenieurgeologie, Enke Verlag Stuttgart, 546 S., 3. Auflage, 1997
- Richtlinien Geotechnik – Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes über die geotechnische Sicherheit im Bergbau über Tage, SächsABl. Jg. 2005, Bl.-Nr. 14, S. 285, Gkv-Nr.: 610-V05.1, 2005
- STEGING, M.: Untersuchungsbericht: Böschungsrutschung im Zuge der Bundesstraße B 3 – km 23,2 – zwischen Scheden und Volkmarshausen, Risikoabschätzung weiterer Böschungsrutschungen im Streckenabschnitt von km 22,5 bis 23,4, Untersuchungsbericht, 16 S., 8 Anlagen, Ingenieurbüro R.-U. Wode, unveröffentlicht, 2005
- STEINGÖTTER, K.: Hangstabilitäten im linksrheinischen Mainzer Becken – Ingenieurgeologische Untersuchungen und kartenmäßige Darstellung, Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 1984
- STREIM, A. W.: Gutachten Rutschung in der Vogelsbergstraße B 275 bei km 74,150 zwischen Lißberg und Hirzenhain, Sozietät Grundbau + Ingenieurgeologie (SGI) Streim & Rathgeb, Frankfurt, unveröffentlicht, 1984
- REMO – Hinweise für Datennutzer, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2001
- WALLRAUCH, E.: Geotechnisches Gutachten zur „Rutschung Wildenberg“, A 81 Weinsberg-Neuenstadt, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg, 21 S., 8 Anlagen, unveröffentlicht, 1989
- WERNER, C.: Kinematik und Ursachen der Rutschung Reil-Pünderich an der Mosel, Diplomarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, unveröffentlicht, 1997

## **Verwendete Daten**

Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes Offenbach

Klimaparameter des Max-Planck-Institutes für Meteorologie, Hamburg

Digitales Bundesfernstraßennetz aus dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra), BASt

Gitterdaten des digitalen Geländemodells DGM 25, Bundesanstalt für Kartographie und Geodäsie

Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz: in Kooperation der Forschungsstelle Rutschungen Mainz mit dem Landesamt für Geologie und Bergbau, Mainz (in Arbeit)

Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens (Maßstab 1:50.000) des Landesamtes für Geologie und Bergbau, Mainz

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

### 2001

S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung  
€ 19,50

S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen  
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,  
v. d. Elshout, Sym € 10,50

### 2002

S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Konsolidationsverfahren -  
Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund  
Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolidationsverfahren  
Koch € 17,50

S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 16,50

### 2003

S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Aufgeständerte Gründungspolster  
Rogner, Stelter € 14,00

S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung der ZTV-M 02  
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50

S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundesfernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00

S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saarbrücken € 13,50

### 2004

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –  
€ 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues  
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen  
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

### 2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren  
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

### 2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt  
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben  
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt  
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund  
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

### 2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen  
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00 -

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen  
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

### 2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise  
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses "Straßenrecht" der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden  
€ 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSUB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

## 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offener Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenerporigen Asphalten (OPA)  
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. -  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00 -

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus  
Freudenstein, Birmann € 14,00

## 2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen  
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. -  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Canzler, Winkler € 16,50 -

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.  
Ripke

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen  
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.  
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung,  
Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 20./21. September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenerporigen Asphalten - Teil 2: Neue Baumaßnahmen  
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenheitsauswerteverfahren "Bewertetes Längsprofil" – Weiterentwicklung der Längsebenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

## 2012

S 74: Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 2" – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche  
Projektgruppe "Leiser Straßenverkehr 2" € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen  
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.