

Luftbild- und Satellitenbildauswertungen als Hilfsmittel bei der ingenieurgeologischen Untersuchung von Rutschhängen

KLAUS STEINGÖTTER

Kurzfassung: An zwei rheinland-pfälzischen Beispielen werden Möglichkeiten des Einsatzes der Luftbild- und Satellitenbildauswertung bei der ingenieurgeologischen Untersuchung von Rutschhängen dargestellt. Die Auswertung erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird im Luftbild eine Analyse der Oberflächenformen durchgeführt und Photolineare werden kartiert; aus der Linearkarte ist danach eine Schollensynthese zu erarbeiten. Die Kartierung von Satellitenbildlinearen bildet den letzten Auswerteschritt. Begleitende Feldbegehungen („ground check“) sind unerlässlich. Es lassen sich neue Erkenntnisse über die Kinematik und die Ursachen der Rutschungen gewinnen.

Abstract: For engineering-geological investigations of two landslide areas in Rheinland-Pfalz (FRG), aerial photographs and aerospace images (Landsat 2 and 5) have been analyzed. The analysis comprises four steps: Morphologic mapping, documentation of photolinears, block synthesis and mapping of Landsat lineations. The obligatory ground checks were made, too. New results of the kinematic patterns and of the genesis of the landslides have been gathered.

Résumé: Pour la reconnaissance ingénieur-géologique des deux glissements de terrain dans Rheinland-Pfalz (RFA) des photos aériennes et des photos satellites (Landsat 2 et 5) ont été analysées. L'analyse est caractérisée par quatre phases: Cartographie morphologique, détermination des linéations dans des photos aériennes, fixations des districts avec une valeur tectonique supérieure et cartographie des linéations dans des photos des satellites. Travail du terrain était obligatoire. Nouveaux résultats de la cinématique complexe et des causes des glissements de terrain ont été obtenus.

Inhalt

1. Einleitung	136
2. Bildmaterial und Auswertetechnik	136
3. Informationsinhalte	138
3.1. Flächenhafte Bildelemente	138
3.2. Lineare	138
3.3. Synthese von Schollen.	139
4. Tertiär des Mainzer Beckens: Rutschungen am Wißberg nördlich Gau-Bickelheim	139
4.1. Geologische und morphologische Situation	139
4.2. Rutschungen	140
4.3. Formenanalyse	141
4.4. Linearanalyse	144
4.5. Schollensynthese	144

4.6. Satellitenbildlineare	144
4.7. Ursachen des Gleitbewegungen.	144
5. Rheinisches Schiefergebirge: Rutschhang östlich Trarbach	146
5.1. Problemstellung	146
5.2. Geologische und morphologische Situation	146
5.3. Formenanalyse	148
5.4. Linearanalyse	149
5.5. Schollensynthese	150
5.6. Gleitmechanismus	151
5.7. Satellitenbildlineare und Ursachen der Gleitbewegungen.	152
Schriften	154

1. Einleitung

Die qualitative und quantitative Luftbild- und Satellitenbildauswertung ist als Hilfsmittel der Geologie mittlerweile allgemein anerkannt. Auch in Mitteleuropa, mit den hier rezent vorhandenen, gemäßigt humiden und komplexen geologischen Bedingungen, wo durch intensive Bebauung und tiefgreifende anthropogene Eingriffe in die Vegetation, in die Geländeoberflächen und in das Gewässernetz in weiten Bereichen Kulturlandschaften entstanden sind, hat sie sich für Flächen- und Lineationskartierungen bewährt.

Zur Lösung ingenieurgeologischer Fragen wird die Luftbildauswertung international erst seit zwei Jahrzehnten intensiv genutzt. Die entscheidenden Vorteile der Anwendung photo-geologischer Methoden bei der Erfassung und Untersuchung von Rutschhängen liegen in der Zeitersparnis gegenüber einer reinen Geländekartierung sowie der Möglichkeit, einen Überblick über größere Areale zu erhalten, was im Gelände aus der „Froschperspektive“ oft nicht möglich ist. Zudem können durch die Auswertung von vorhandenen Befliegungen aus verschiedenen Jahren im Luftbild Bewegungsmessungen über längere Zeiträume vorgenommen werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern bei der ingenieurgeologischen Untersuchung von Rutschgebieten an rheinland-pfälzischen Beispielen aus dem linksrheinischen Mainzer Becken und aus dem Moseltal beschrieben (Abb. 1). Von den Rutschungen sind im Moseltal vor allem devonische Festgesteine betroffen, im Mainzer Becken vor allem tertiäre, veränderlich-feste Gesteine.

2. Bildmaterial und Auswertetechnik

Für die Auswertungsbeispiele wurden aus Gründen der Verfügbarkeit und der Kosten Schwarz-Weiß-Luftbildkontaktabzüge und Schwarz-Weiß-Abzüge von Satellitenbildnegativen verwendet.

Bei den Luftbildern handelt es sich um Senkrechtaufnahmen, die durch Überlappung eine stereoskopische Auswertung erlauben. Kontaktkopien des Landesvermessungsamtes Rheinland-Pfalz, Koblenz, aus dem Jahr 1982 im Maßstab 1 : 12 500 (Freigabe: LVA Nr. 17/82) standen für die Interpretation in Rheinhessen zur Verfügung. Für den Rutschhang an der Mosel wurden Luftbilder vom 31. 3. 1967 im Maßstab 1 : 6 000 (Freigabe durch den Reg.-Präs. in Münster, Nr. 1371/67) bearbeitet. Die systematische Auswertung der vorliegenden Luftbilder erfolgte mit Hilfe eines Spiegelstereoskops, welches mit eingebauter Gerätelupe über eine bis zu sechsfache Vergrößerung verfügt.

Um weitere Zusammenhänge zwischen dem tektonischen Bau und den Rutschungen erkennen zu können, sind vergrößerte Ausschnitte von Landsat 2 und 5/ERTS Satelliten-aufnahmen im Aufnahmemaßstab 1 : 1 000 000 benutzt worden. Die Landsat-2-Aufnahme vom 10. 8. 1975 des auf 1 : 250 000 vergrößerten Bildausschnitts E 2200-09423 deckt Rhein-

hessen ab. Die Landsat-5-Aufnahme vom 25. 4. 1984, Archiv-Nr. 000232, in der Vergrößerung 1 : 200 000 zeigt den Moselraum. Die Satellitenaufnahmen aus etwa 900 km Höhe erfolgten durch multispektrale Scanner (MSS) in den Kanälen 4 und 7. Der Kanal 7 des Landsat-2-Scanners erfaßt einen Spektralbereich zwischen 800 und 1100 nm, der Kanal 4 des Landsat-5-

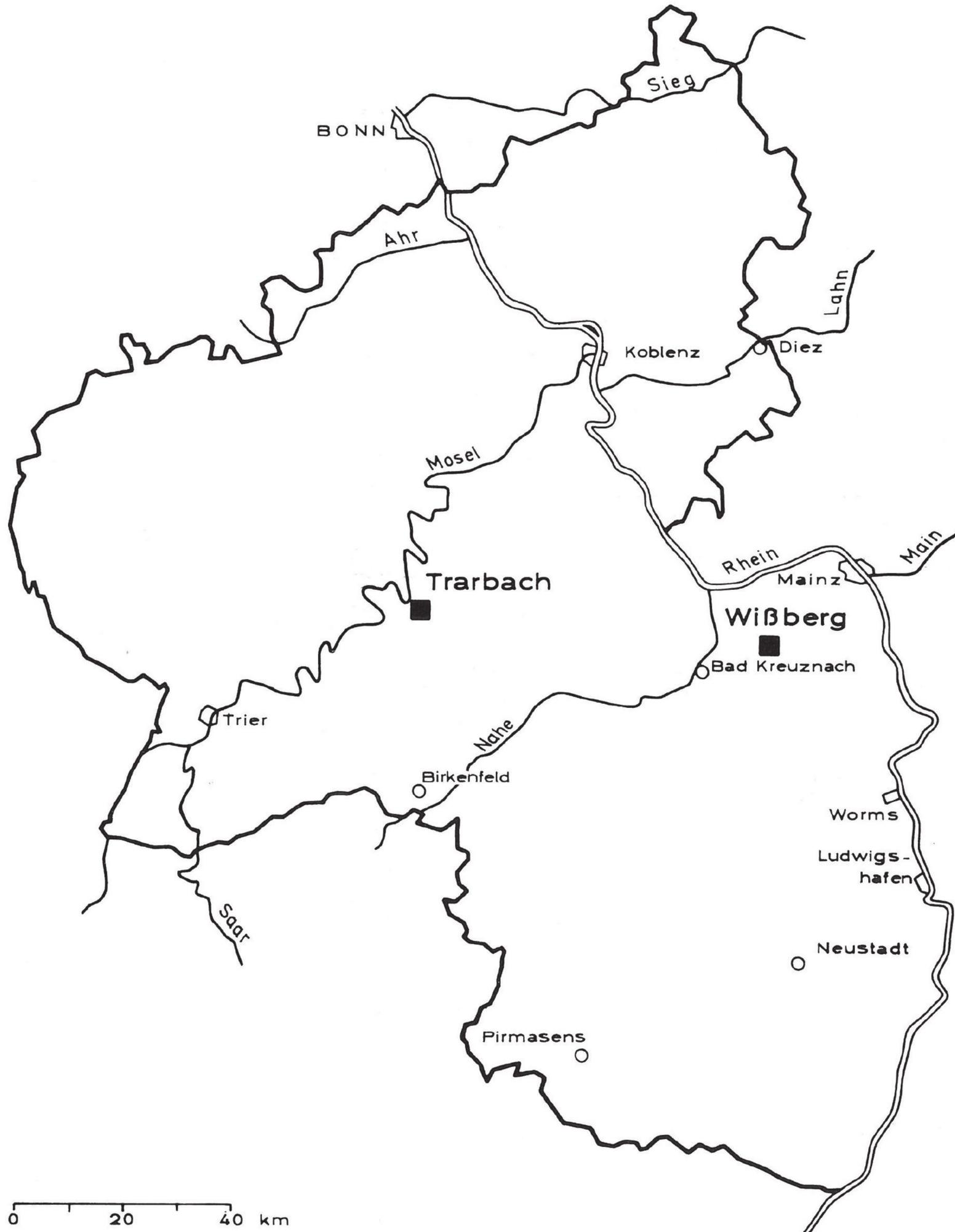


Abb. 1: Lage der Rutschhänge.

Scanners einen Bereich zwischen 760 und 900 nm. Die Bildszenen der Kanäle 4 und 7 von Mitteleuropa eignen sich besonders für die durchgeführte geologische Analyse, da hier neben den Oberflächenformen des Geländes sowie der Vegetation auch die Feuchtigkeitsverteilung im Untergrund deutlich sichtbar wird. Die Auswertung der Satellitenbildvergrößerungen geschah mit bloßem Auge. Die Überprüfung der aus den Luft- und Satellitenbildinterpretationen gewonnenen Ergebnisse im Gelände durch den sogenannten „ground check“ ist unerlässlich.

3. Informationsinhalte

Allgemein erlaubt die geologische Analyse von Luft- und Satellitenbildern die Beschreibung und Abgrenzung von Grautondifferenzen und Texturunterschieden. Diese ermöglichen nach KRONBERG (1984) die Kartierung

- von Landschafts- und Reliefformen wie Talrichtungsmustern, Hangformen und -neigungen,
- des Entwässerungsnetzes,
- der Unterschiede der Verwitterungsbeständigkeit von Gebirgskomplexen,
- der Orientierung von Schicht-, Schieferungs- und Klufflächen sowie von Störungen,
- der Deckschichten,
- der Vegetation und
- der Landnutzung.

In der Praxis unterscheidet man insbesondere flächenhafte und lineare Bildelemente.

3.1. Flächenhafte Bildelemente

Flächenhafte Bildelemente, die sich von ihrer Umgebung durch deutliche Grauton- und Reliefänderungen abheben, sind z. B. auf geologische Einheiten mit unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften zurückzuführen. So heben sich im Luftbild beispielsweise Terrassen-sedimente, die wassererfüllte Porenspeicher darstellen, über undurchlässigeren Gesteinen deutlich ab. Besonders Rutschgebiete, die sich im Luftbild anhand der differierenden Oberflächenformen von den nicht gravitativ bewegten Hangbereichen unterscheiden, sind hier einzuordnen.

3.2. Lineare

Lineare Bildelemente werden als Photolineare oder auch -lineationen bzw. als Satellitenbildlineare bezeichnet. Sie können Trennflächen oder Störungszonen des Gebirges direkt zugeordnet werden (FÜRST & MÜLLER & KRUPP 1978), sind also Spuren des Gefüges.

Nach REUL (1973) sind Photolineare vor allem auf hydraulisch wirksame Trennflächen zurückzuführen. Es lassen sich als deskriptive Begriffe nach FÜRST (1980) unterscheiden

- Grauton- und Grautonwechsellineare,
- Vegetations- und Vegetationswechsellineare,
- Gewässernetz- und Talrandlineare,
- morphologische Lineare (positiv oder negativ ausgeprägt oder als versetzte Schollenkanten) und
- kombinierte Lineare.

Die Lineare zeichnen sich selbst dann im Luftbild und Satellitenbild erkennbar und kartierbar ab, wenn die Ausstrichbreite von Kluff- und Störungszonen unterhalb der theoretischen Auflösung liegt (KRONBERG 1984, S. 252). Mit der Luftbildlinearanalyse können z. B. auch Hinweise auf Störungen mit überwiegendem Horizontalversatz gefunden werden, die weiter verbreitet sind als bisher angenommen wurde und bei denen konventionelle Untersuchungsmethoden fast gänzlich versagen (PRINZ 1980).

Auf die Ursachen von Fehlinterpretationen weisen FÜRST & KRUPP & MÜLLER (1978, S. 10) und KRAUTER & HÄFNER (1980, S. 208) hin. Fehlerquellen sind außer durch die Aufnahme- und Reproduktionstechnik der Bilder (z. B. können in der 100°-Scanzeilenrichtung im Satellitenbild keine Lineare festgelegt werden) auch durch Wolkenschattenwirkungen gegeben. Möglichkeiten von Fehlinterpretationen treten daneben vor allem durch anthropogene Eingriffe in den Untergrund auf, die Lineare vortäuschen, wie z. B. verfüllte Ver- und Entsorgungsleitungsgräben, ehemalige Straßen- und Wegenetze, Ackergrenzen, Bauwerksfundamente und Drainsysteme.

Eine Möglichkeit, um sich als Lineare abzeichnende Kluft- oder Störungszonen mit erhöhter Wasserführung im Gelände nachzuweisen, ist die Messung des CO₂- und CH₄-Gehaltes der Bodenluft auf Profillinien quer zu den Linearen (ERNST 1968). Über Kluft- und Störungszonen steigen diese Werte auf das Doppelte bis Dreifache der „Backgroundwerte“ an. Der Nachweis von Linearen im Mainzer Becken mit Hilfe dieser Methode gelang erstmals WELLING (1984).

Die ermittelten Lineare ermöglichen eine statistische Auswertung ihrer Längen und Streichrichtungen mit Hilfe der EDV. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Bearbeitung mit Hilfe eines Digitalplanimeters und dem Computerprogramm TEKLA 2.

3.3. Synthese von Schollen

Die Interpretation der Linearkarte, der Bestandsaufnahme aller erkennbaren Photolineare, wird als Schollensynthese, nach FÜRST & KRUPP & MÜLLER (1978) auch als 2. Ableitung bezeichnet; diese filtert aus den erkannten Linearen solche mit übergeordneter Wertigkeit heraus, die einzelne Schollen begrenzen. Schollengrenzen lassen sich charakterisieren durch

- vorrangige Lineare, an denen andere Lineare absetzen,
- einzelne Lineare mit, im Vergleich zu den übrigen Elementen, großer streichender Erstreckung,
- gestaffelte, auf einer Linie liegende Lineare und
- morphologische Lineare übergeordneter Bedeutung.

Schollengrenzen fallen z. B. häufig mit tektonisch kontrollierten Talrandlinearen zusammen. Besonders die Verschneidungen von Schollengrenzen besitzen hohe hydraulische Bedeutung. Durch die Definition von Schollen können in ihrer Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit voneinander unabhängige Bereiche von Großrutschungen unterschieden sowie Rutschgebiete abgegrenzt werden.

4. Tertiär des Mainzer Beckens: Rutschungen am Wißberg nördlich Gau-Bickelheim

Im Tertiär des Mainzer Beckens stellen Massenbewegungen vor allem durch Gleiten an den relativ flachen Hängen (meist < 15° Neigung) und trotz des relativ trockenen Klimas (mittlerer Jahresniederschlag unter 600 mm) ein häufiges Ereignis dar. Unter Gleiten werden im Sinne von NEMČOK & PAŠEK & RYBÁŘ (1972) Bewegungen zusammenhängender Massen entlang einer oder mehrerer definierter Gleitflächen verstanden.

4.1. Geologische und morphologische Situation

Der Wißberg, ein Zeugenberg, baut sich aus zwei ± horizontal lagernden Gesteinsfolgen auf (Blatt 6114 Wörrstadt). Die oligozänen, pelitischen Schichten (Tone, Schluffe, Mergel) mit feinsandigen Einschaltungen, welche z. T. gespanntes Grundwasser führen, werden von miozänen Kalksteinen und Mergeln sowie plio-pleistozänen klastischen Sedimenten (Schluffe, Sande, Kiese) überlagert. Oligozäne Schichten bauen die flacheren Unter- und Mittelhänge auf. Miozäne Schichten bilden schichtstufenähnlich die steileren Oberhänge. Die Hangneigungen reichen von etwa 3-15°. Höhendifferenzen zwischen Talboden und Plateauhochfläche von etwa 150 m (120 bis 270 m NN) treten auf.

4.2. Rutschungen

Massenbewegungen durch Gleiten finden sich besonders im Bereich unterhalb der Miozänbasis, die auch einen Quellhorizont darstellt. Die Bewegungen sind so stark, daß die langzeitigen Längenänderungen selbst in den Katasterplänen berücksichtigt werden müssen. Der Tiefgang der Gleitbewegungen dürfte maximal bis etwa 20 m reichen (STEINGÖTTER 1984). Derartige tiefreichende Bohrlochverformungsmessungen mit Hilfe von Inklinometern oder Mehrfach-Extensometern zur Ermittlung der Gleitflächentiefen fehlen jedoch bislang.

Im oberen Abschnitt des Südhanges, der wie alle Hänge des Weißberges mit Weinreben bestanden ist, befindet sich eine etwa 1 km breite Nische, die den Abrißbereich von fossilen, wahrscheinlich pleistozänen (SONNE 1974) Rutschungen darstellt. Eine fossil abgeglittene Miozän-Kalksteinscholle lagert heute im Bereich des südöstlichen Hangfußes (Abb. 2).

Aus jüngster Zeit sind umfangreiche Gleitbewegungen, vor allem als Sekundärrutschungen in fossilen Rutschmassen, aus den Jahren 1953, 1955, 1969, 1978 und insbesondere 1982 bekanntgeworden. Im Januar 1982 erreichte das Ausmaß der Rutschungen am Weißberg fast 70 ha (STEINGÖTTER 1984, S. 135). Eine geodätische Präzisionsvermessung in Fallinie des Südhanges vom Oktober 1981 bis November 1982 ergab Bewegungen bis 73,1 cm horizontal und

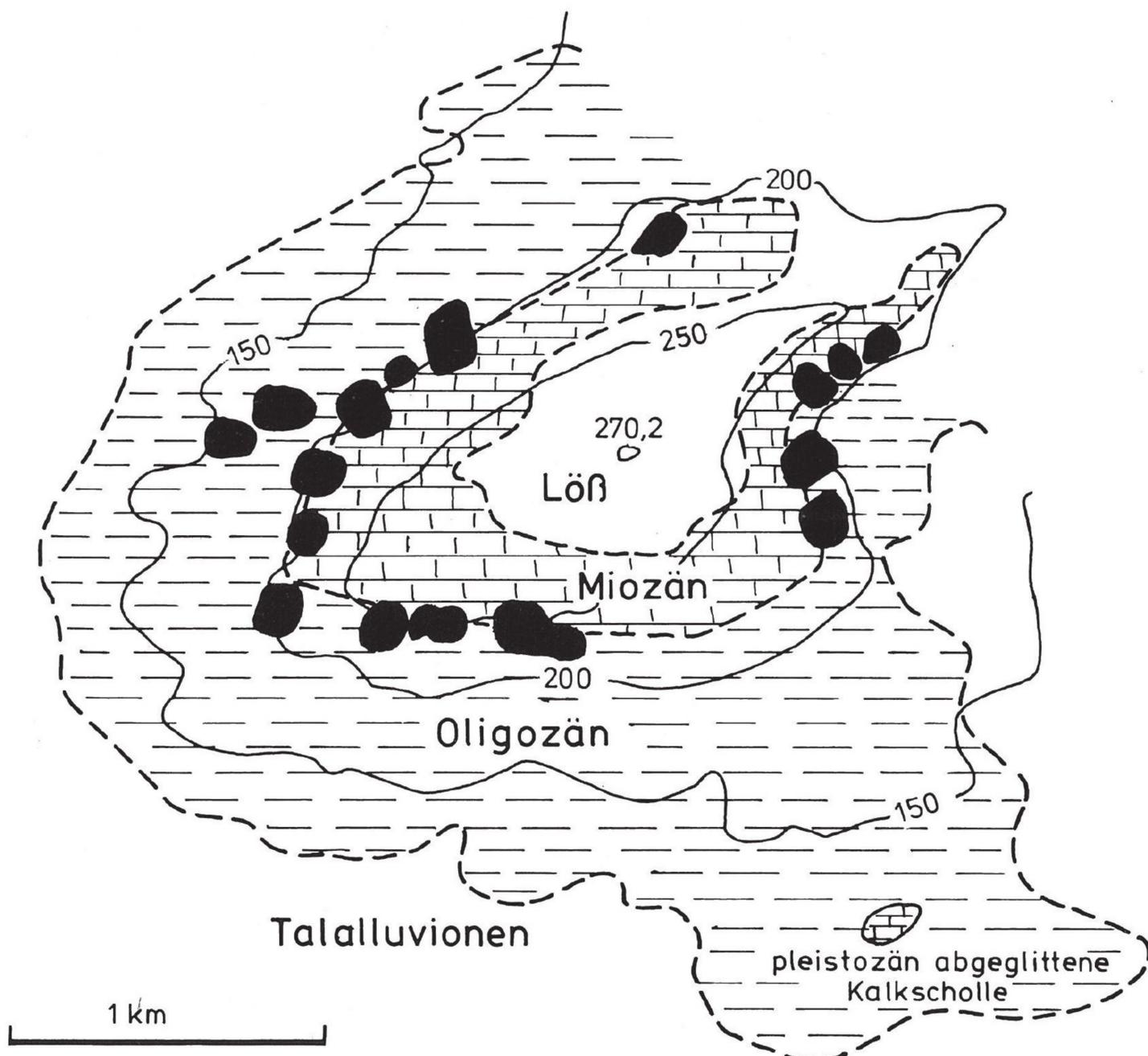


Abb. 2: Skizze der Geologie des Weißberges mit Rutschungen (vereinfacht nach WAGNER 1935).

bis 10,2 cm vertikal (Setzung). Ein wichtiges Ergebnis war, daß die andauernden Verschiebungen unterschiedlicher Geschwindigkeit selbst im trockenen Sommer 1982 nicht völlig zum Stillstand kamen (STEINGÖTTER 1984).

4.3. Formenanalyse

Im Luftbild (Abb. 3) konnte der fossile Abrißbereich im südlichen Oberhang gut ausgehalten werden. Die fossilen Rutschmassen dagegen waren nur noch sehr unscharf abzugrenzen. Hinweise darauf waren, gegenüber anderen Hangbereichen, die konkave und gestreckte Formen aufwiesen, konvexe Hangformen mit sanften Wellen, die aber nur noch wenig den Formen von typischen Rutschkörpern (Abb. 4) entsprachen. Von jungen und sekundären Massenbewegungen betroffene Hangflächen waren wesentlich leichter und präziser zu identifizieren und abzugrenzen. Sie wiesen im Luftbild bei sechsfacher Vergrößerung deutlich sichtbare Abrisse z. T. mit Grabenstrukturen auf sowie typische wellige und bucklige Oberflächenformen mit abflußlosen Senken im Mittelbereich der Rutschung. Der Stirnbereich, der meist das Vorland überfahren hat, ist konvex ausgebildet. Hier finden sich dann auch Fließbewegungen. An den Rändern und in den abflußlosen Senken sind Verlässungen als dunklere Grautöne festzustellen. Die Buckel und die Rutschungstirn zeigen infolge der Auflockerung des Bodens dagegen eine schnellere Austrocknung als unverlagerte



Abb. 3: Luftbild des Weißberges.

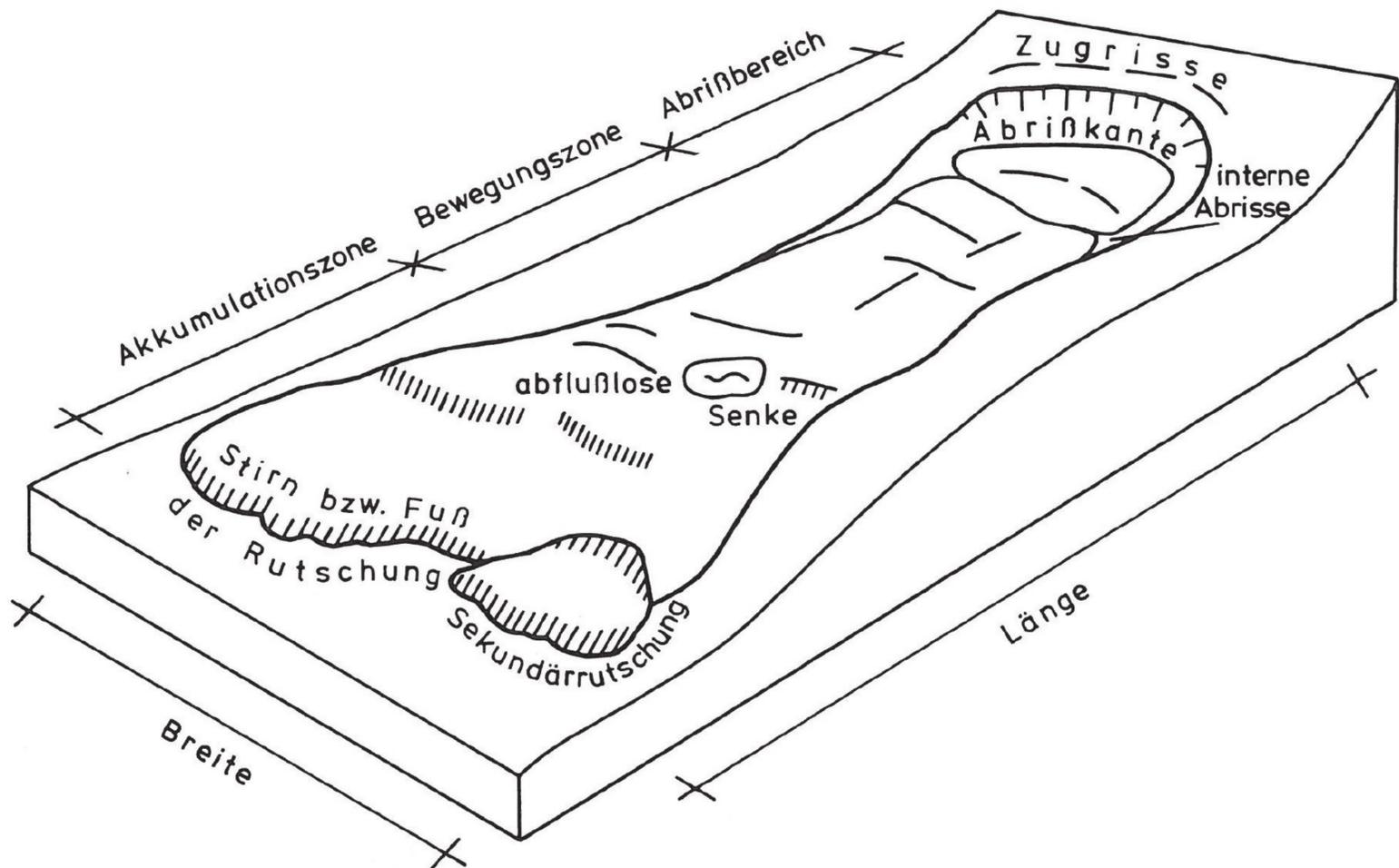


Abb. 4: Prinzipskizze einer Rutschung (nach KLENGEL & PAŠEK 1974).

Hangbereiche. Als dunklere Grautöne werden auch an einigen Stellen „Wasserfahnen“ sichtbar, die meist nicht im Hanggefälle verlaufen, so daß sie wahrscheinlich Diskontinuitäten im Untergrund folgen. Sie können nicht mit den symmetrisch angeordneten Drainsystemen verwechselt werden.

Die Oberflächenformen deuten oft auf Serienrutschungen hin (Abb. 5), die das Bild wesentlich komplizieren. Es lassen sich in einigen Hangbereichen, besonders im Südhang, mehrere unterschiedlich alte Bewegungsphasen jedoch nur undeutlich erkennen.

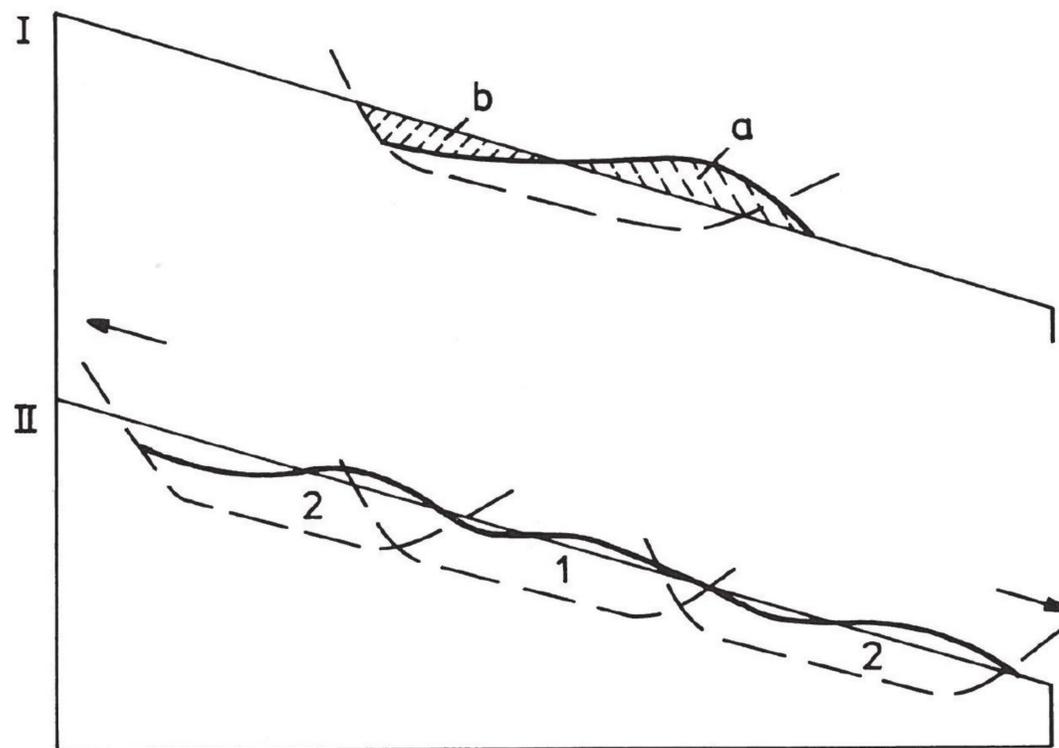


Abb. 5: Entstehung von Serienrutschungen. I = Primärrutschung, II = Ausbreitung der Gleitbewegungen; a = Last auf Unterhang, b = Entlastung des Oberhanges; 1 = Primärrutschung, 2 = induzierte Folgerutschungen (KRAUTER & STEINGÖTTER 1980).

Teilweise sind in den jungen Rutschgebieten die sonst vorherrschenden Weinberge nicht wieder bestockt, so daß sich Wildgräser und -sträucher ausbreiten. Auffallend sind auch Deformationen und Verschiebungen von Weinbergszeilen und Wirtschaftswegen.

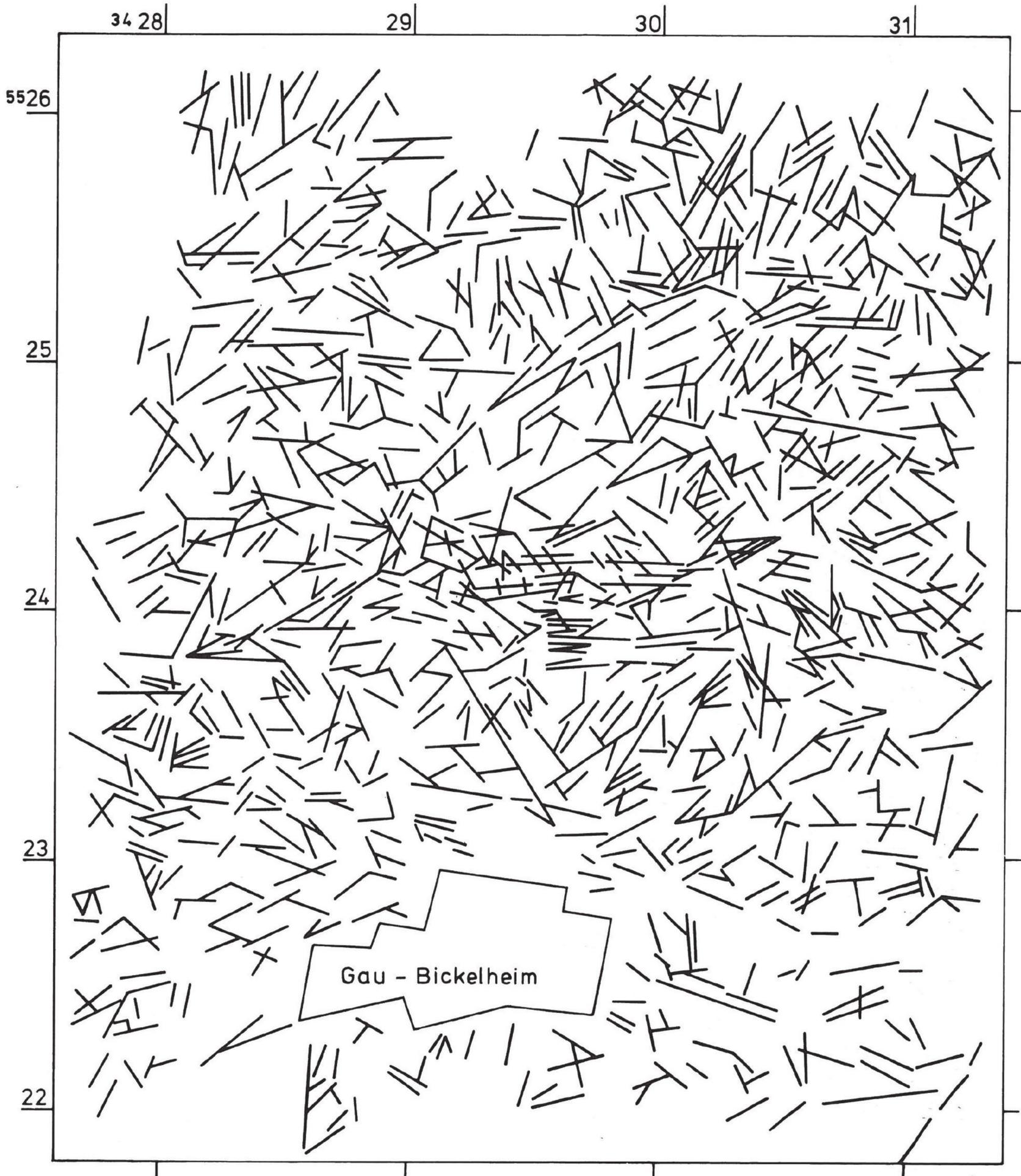


Abb. 6: Linearkarte des Wißberges.

4.4. Linearanalyse

Die Linearkarte für den Bereich des Weißberges (Abb. 6) zeigt eine hohe Lineardichte. Die Trennflächen des tertiären Gebirges pausen sich auch in den Deckschichten aus Löß- und Gehängelehm durch. Besonders der Südhang scheint eine ausgesprochen hohe Dichte von Trennflächen aufzuweisen. Die Richtungsrose der Lineare (Abb. 7) zeigt Maxima bei 60° und 90° , daneben bei 30° , 45° , 60° , 110° und 150° .

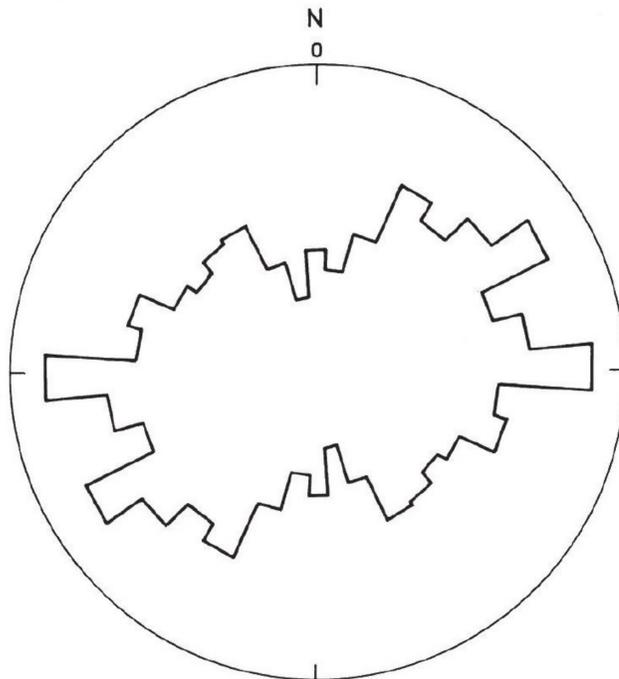


Abb. 7: Richtungsrose der Lineare am Weißberg ($R = 10\%$, $N = 1131$).

4.5. Schollengrenzen

Die Begrenzung des Miozänkalkstein-Plateaus kommt in der 2. Ableitung (Abb. 8) deutlich zum Ausdruck. Die durch Diskontinuitäten des Gebirges vorgegebene Form wurde durch die Erosion herauspräpariert. Vor allem die fossile Abrißkante am Südhang wird auch bei der Schollensynthese betont. Die Abb. 9 dokumentiert die Richtungsrose der Schollengrenzen. Maxima der Streichrichtungen liegen bei 10° , $45-60^\circ$, $80-100^\circ$ und 150° .

4.6. Satellitenbildlineare

Im Bereich des Weißberges sind 3 Satellitenbildlineare in N-S, NE-SW und W-E-Richtung (Abb. 10) zu erkennen. Besonders das Linear in N-S-Richtung zeigt eine große Länge. In den Schollengrenzen finden sich die Satellitenbild-Linearrichtungen NE-SW und W-E deutlich wieder. Die N-S-Richtung tritt dagegen, zumindest in der Länge, etwas zurück.

4.7. Ursachen der Gleitbewegungen

Die großen Rutschungen des Jahres 1982 sind meist an Schollengrenzen sowie deren Verschneidungen gebunden (Abb. 8). Die Schollengrenzen, die auf Diskontinuitätsflächen bzw. -zonen des Gebirges mit meist starker Auflockerung zurückgehen, bewirken eine erhöhte Wasserwegsamkeit. Gespanntes Grundwasser aus schluffigen Feinsandlinsen in den Peliten kann auf diesen hydraulisch wirksamen Elementen aufsteigen. Daneben kann hier auch Oberflächenwasser leichter in den Untergrund eindringen. Das Wasser, welches das auslösende Moment der Rutschungen darstellt, baut hydrostatischen Druck auf und durchfeuchtet selektiv potentielle, meist \pm schichtparallele Gleitflächen bzw. -horizonte und mindert dort die Scherfestigkeit. Gleichzeitig bilden die Diskontinuitäten Schwächezonen im Gebirge, die sowohl die seitliche Einspannung stark verringern, als auch potentielle Abrißkanten für Gleitungen vorzeichnen.

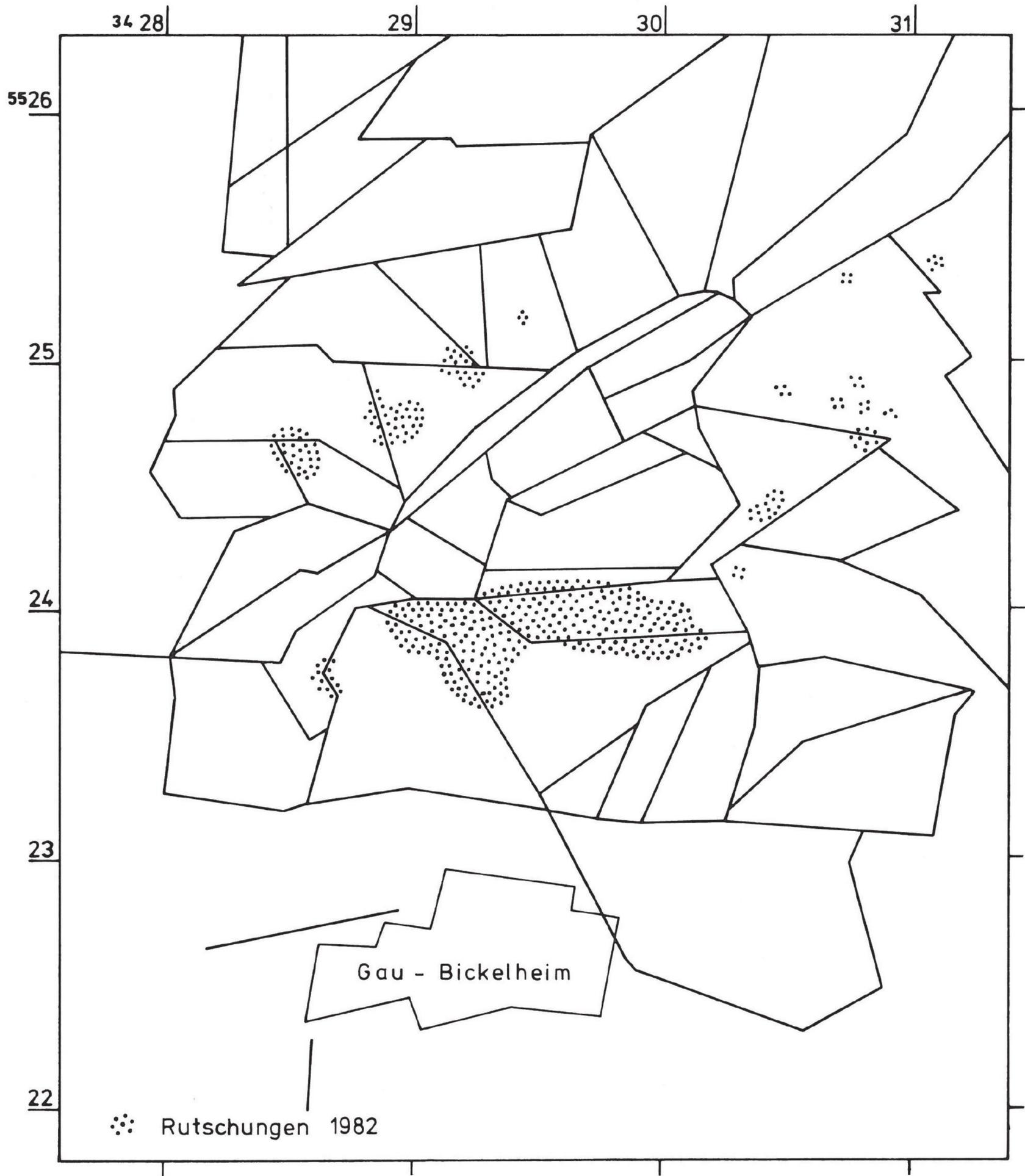


Abb. 8: Schollensynthese und Rutschungen 1982.

Das W-E streichende Satellitenbildlinear scheint eine übergeordnete wichtige Schwächezone des Gebirges darzustellen, welche ebenfalls infolge Durchfeuchtung und der Vorgabe einer Abrißkante, Voraussetzungen für die fossilen Primärrutschungen am Südhang schuf. Die Luftbild- und Satellitenbild-Linearanalyse sowie die Schollensynthese können also dazu beitragen, spezielle Hangbereiche zu identifizieren, wo die Standsicherheit im Verhältnis zu anderen Bereichen wesentlich reduziert ist.

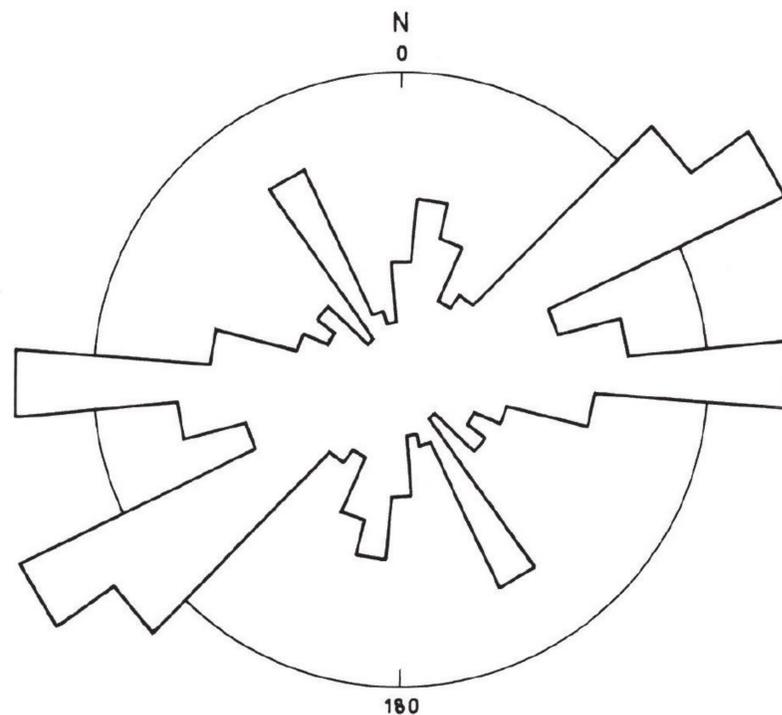


Abb. 9: Richtungsrose der Schollengrenzen am Wißberg ($R = 10\%$, $N = 137$).

5. Rheinisches Schiefergebirge: Rutschung östlich Trarbach

Das Moseltal im Rheinischen Schiefergebirge besitzt steile Talflanken mit Standsicherheiten nur wenig über $\eta = 1$ (Standsicherheit $\eta =$ Verhältnis der zurückhaltenden Kräfte zu den angreifenden Kräften). Die Gravitation führt immer wieder zu Hangdeformationen, eine höhere Standsicherheit anstrebend. Die Moselschleife um den „Mont Royal“ zeigt östlich Trarbach (Blatt 6008 Bernkastel) ein deutliches Vorspringen der Uferlinie des Prallhanges in den Fluß, was den Stromstrich in Richtung Gegenhang verschiebt und dazu führte, daß der Gleithang bei Traben angeschnitten wurde. Dieses Phänomen weist im Karten- und Luftbild auf einen alten Rutschhang hin (Abb. 11). Auch auf der geologischen Karte 1 : 25 000 (LEPPLA 1901) ist dieser heute mit Wald bestandene Rutschhang erfaßt.

5.1. Problemstellung

Die Trasse der ehemaligen Moseltalbahn und der alten Bundesstraße 53 querten den Hang im Bereich des Moselufers auf etwa 900 m Länge. Um beim Neubau der Bundesstraße 53 (Mitte der 70er Jahre) die geringe Hangstabilität zu erhöhen und trotz des Ausbaues die Hanganschnitte klein halten zu können, wurde die Gradienten gegenüber der alten Trasse mit Hilfe einer moselseitigen Anschüttung angehoben. Diese Anschüttung im Stirnbereich der alten Rutschmassen sollte als zusätzliches Widerlager wirken. Die Planung ging davon aus, daß die tiefsten Gleitflächen nicht in der Mitte des Moselbettes ausbeißten, da in diesem Fall die Anschüttung als treibende Kraft für eine Reaktivierung der alten Rutschung wirken würde. Die Frage nach der Lage der Gleitflächen sollte deshalb mit Hilfe von Kernbohrungen, aber auch anhand einer Luftbilddauswertung beantwortet werden. Daneben war eine Analyse des Trennflächengefüges in den Rutschkörpern und im unverlagerten Gebirge, auch mit Hilfe von Geländeaufschlüssen, zu erstellen. Die Luftbilddauswertung sollte insbesondere dazu beitragen, das Rutschgebiet vor dem Neubau der Bundesstraße 53 genau abzugrenzen und die Kinematik und die Ursachen der Gleitvorgänge so weit als möglich zu erfassen.

5.2. Geologische und morphologische Situation

Der untersuchte NW-Hang wird im wesentlichen von Hunsrückschiefer, Rutschmassen aus Hunsrückschiefermaterial und Gehängelehm und -schutt aufgebaut. Der Hunsrückschiefer besteht aus dunkelgrauen, engständig geschiefertem und geklüfteten, z. T. ange-

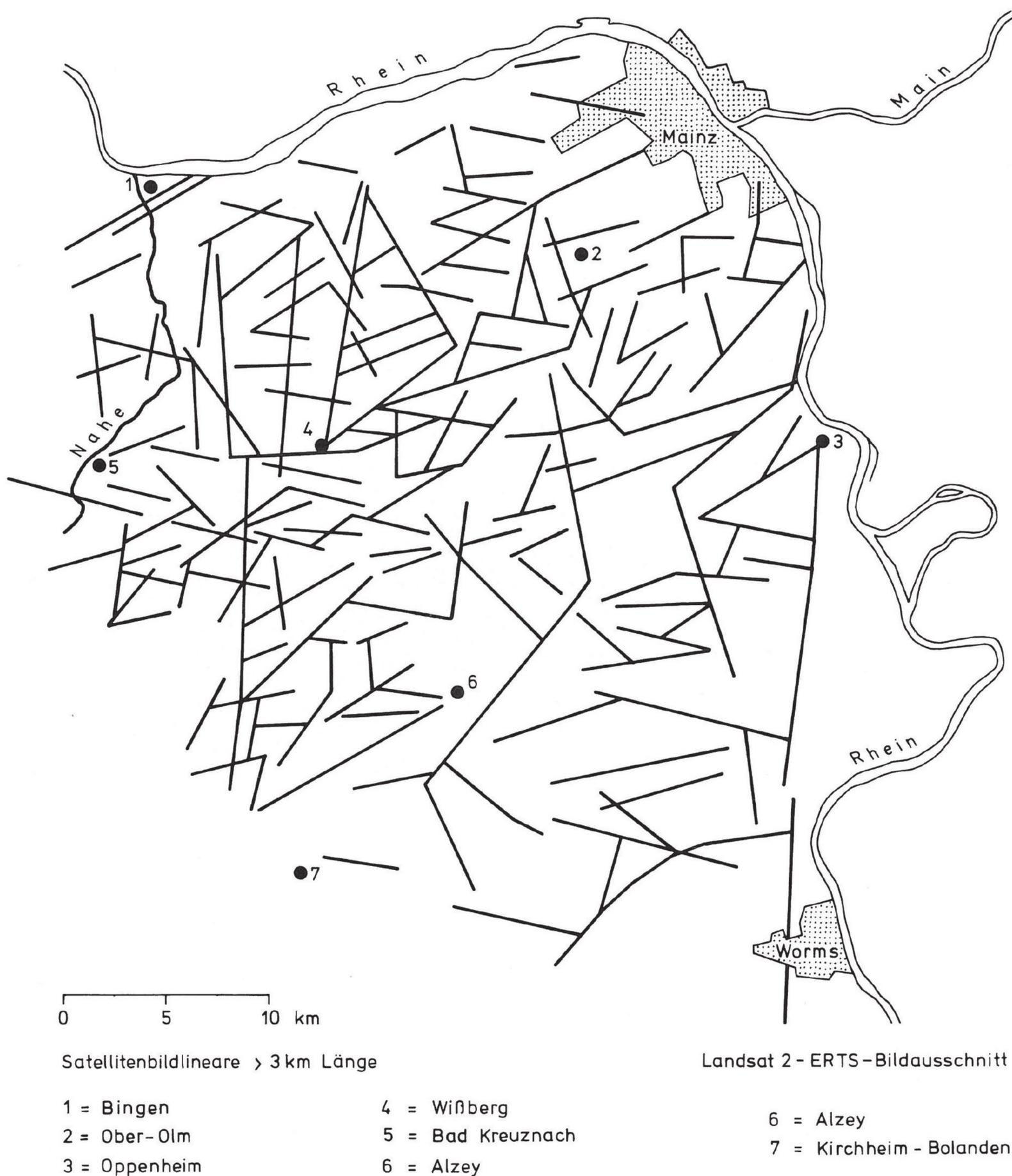


Abb. 10: Satellitenbildlineare im Bereich des Weißberges.

witterten Ton- und Schluffsteinen sowie untergeordnet aus quarzitäen Sandsteinen und Quarziten.

Morphologisch treten für einen Rutschhang typische Verteilungen und Verebnungen sowie konvexe Formen der Hauptrutschkörper auf. Die durchschnittliche Neigung des Hanges beträgt etwa 40°. Das Volumen der alten Rutschung, die nach LEPPLA (1901, S. 20) bereits zur Zeit der unteren Terrassen erfolgt sein dürfte, beträgt über 1 Million Kubikmeter Fels.



Abb. 11: Luftbild des Rutschhanges Trarbach.

5.3. Formenanalyse

Im Luftbild konnte die Abgrenzung des von Massenbewegungen erfaßten Areals vor allem anhand der äußeren Abrißkanten vorgenommen werden (Abb. 12). Die Längsachse der Rutschung hat etwa 800 m Länge, die Breite beträgt etwa 900 m. Das Höhenniveau reicht von etwa 100 m NN am Moselufer bis 365 m NN im Oberhang. Dort sind im wesentlichen zwei Stufen sichtbar, die sich aus Abrißkanten aufbauen. Im Mittelhang sind Abrisse und Rutschmassen sekundärer Gleitbewegungen zu finden. Die seitlichen Begrenzungen der Rutschung stellen im unteren Mittelhang eine flaschenhalsförmige Verengung dar, an der beim Gleiten gravitative Abschiebungen von Felsmassen mit Horizontalversatzkomponente stattgefunden haben. Im Unterhang sind die Stirnen der Primär- und einiger Sekundärrutschungen sichtbar. Schon bei der Primärrutschung scheint es zum gegenseitigen Überfahren von Teilschollen gekommen zu sein. Hier im Moseluferbereich beißen auch die Gleitflächen aus. Ein wichtiges Ergebnis ist, daß sich bei der morphologischen Analyse des Luftbildes keine Anhaltspunkte dafür finden ließen, die dafür sprächen, daß Gleitflächen erst in der Mitte des Moselbettes ausbeißen. Eine große, junge Sekundärrutschung ist im Südwesten des Areals zu beobachten (Abb. 12, punktierter Bereich). Nach neuesten Untersuchungen (KRAUTER & KERZAN & HOFMANN 1985) weist diese Teilrutschung, im Gegensatz zu den übrigen Teilschollen, heute noch Bewegungen in der Größenordnung von cm/Jahr auf.

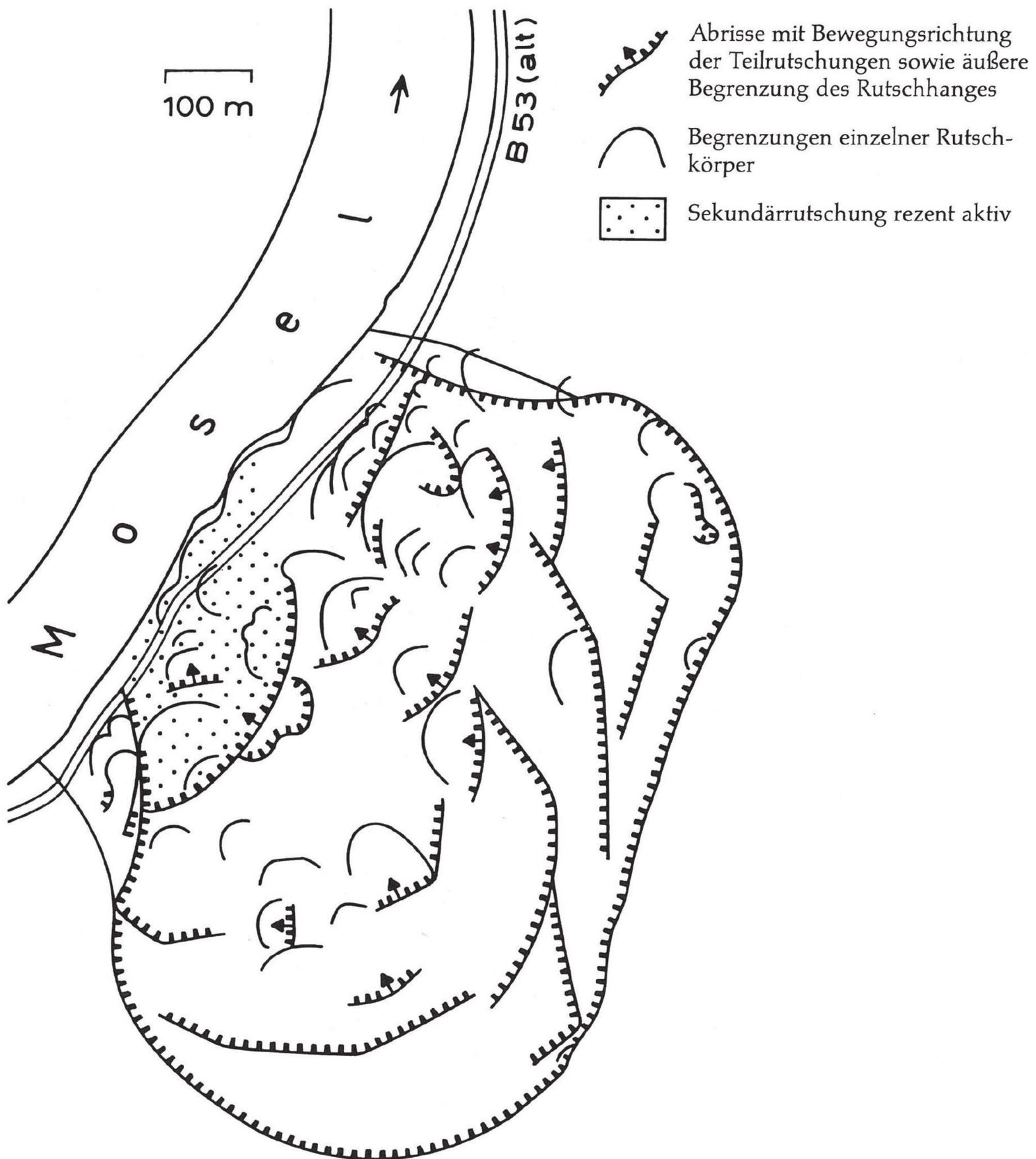


Abb. 12: Formenanalyse.

5.4. Linearanalyse

Die Linearkarte des Rutschhanges zeigt Abb. 13. Der Vergleich der im Gelände aufgenommenen Trennflächen außerhalb des Rutschgebietes mit den Photolinearen innerhalb und außerhalb des Gebietes (Abb. 14, 15) ist recht interessant. Aufschlüsse ergaben, daß die „terrestrischen“ Trennflächen im unverlagerten Gebirge Richtungsmaxima der Streichrichtungen bei 50° und $120-160^\circ$ besitzen. Die Photolineare im Rutschgebiet weisen wesentlich differenziertere, auffächernde Richtungsmaxima bei $20-30^\circ$, 50° , 70° , $90-100^\circ$, 120° sowie $150-160^\circ$ auf. Im nicht von den Massenbewegungen erfaßten Gelände treten Richtungs-

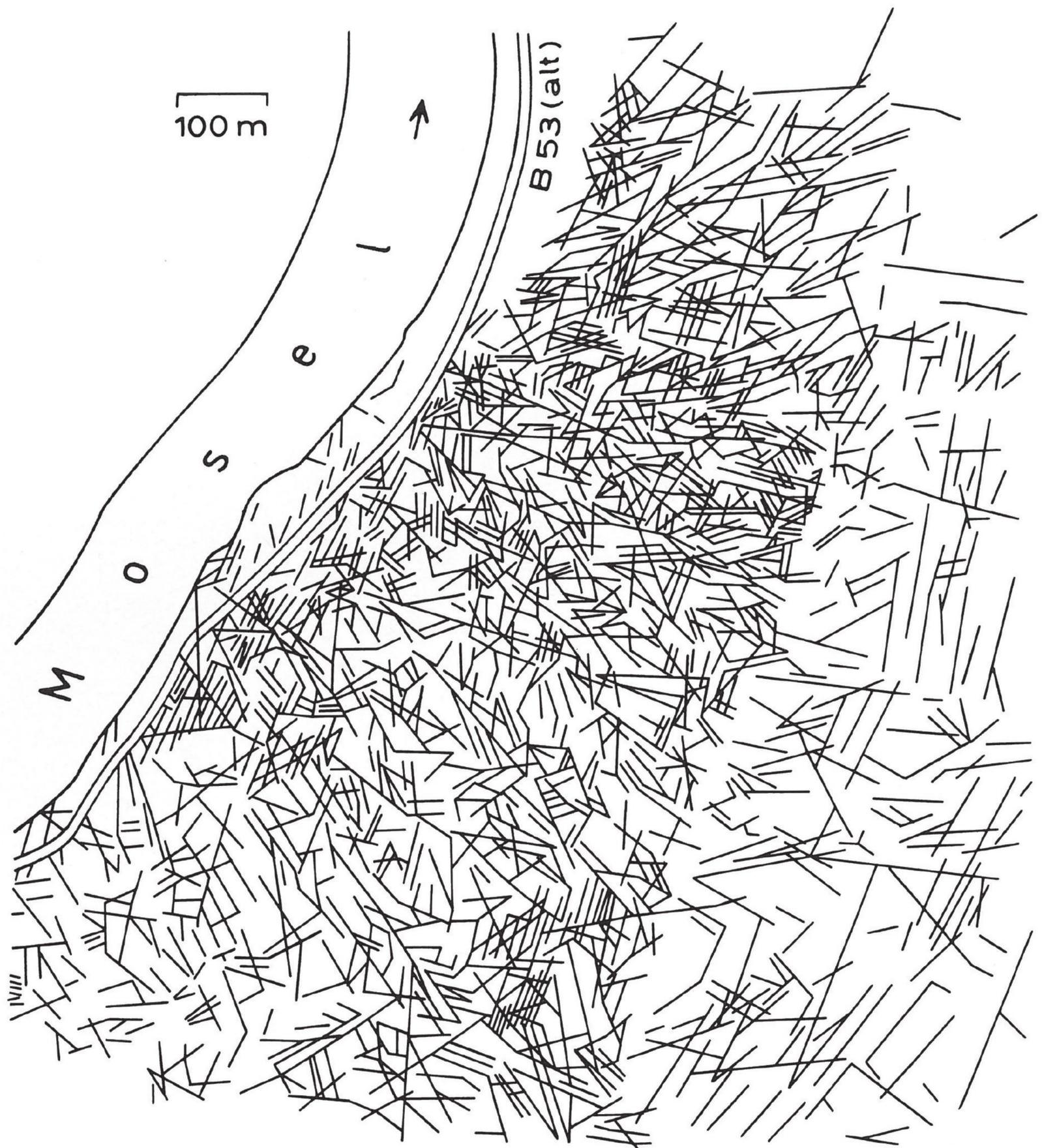


Abb. 13: Linearkarte.

maxima der Photolineare bei 50° , 80° , 100° , 120° und $140-170^\circ$ auf. Die außergewöhnliche Höhe dieser Maxima ist auf die relativ geringe Zahl und meist größere Länge der Lineare zurückzuführen.

5.5. Schollensynthese

Die Schollengrenzen im Rutschhang (Abb. 16) weisen Richtungsmaxima bei $20-30^\circ$, 60° , $80-110^\circ$ und 150° auf (Abb. 17). Die Schollengrenzen und die Lineare innerhalb des Rutschgebietes besitzen per definitionem eine deutliche Übereinstimmung der Richtungen. Gemein-

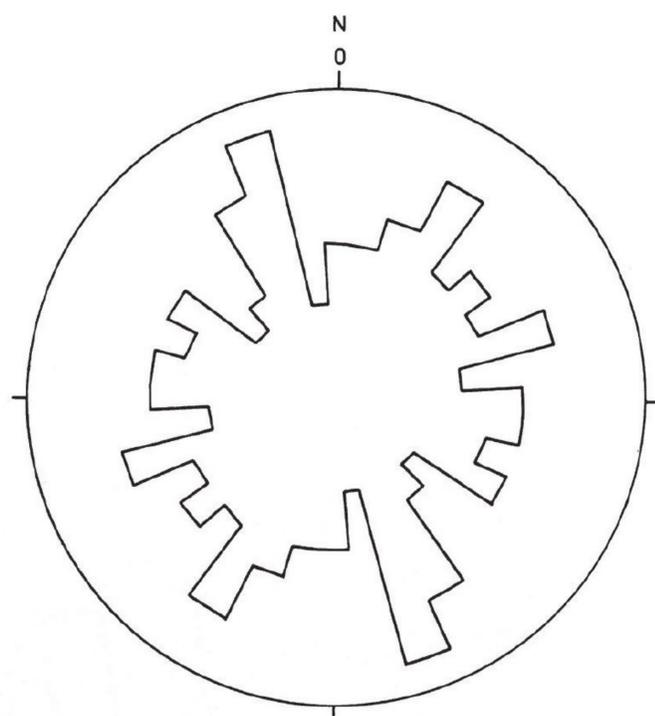


Abb. 14: Richtungsrose der Lineare im Rutschgebiet Trarbach (R = 10%, N = 508).

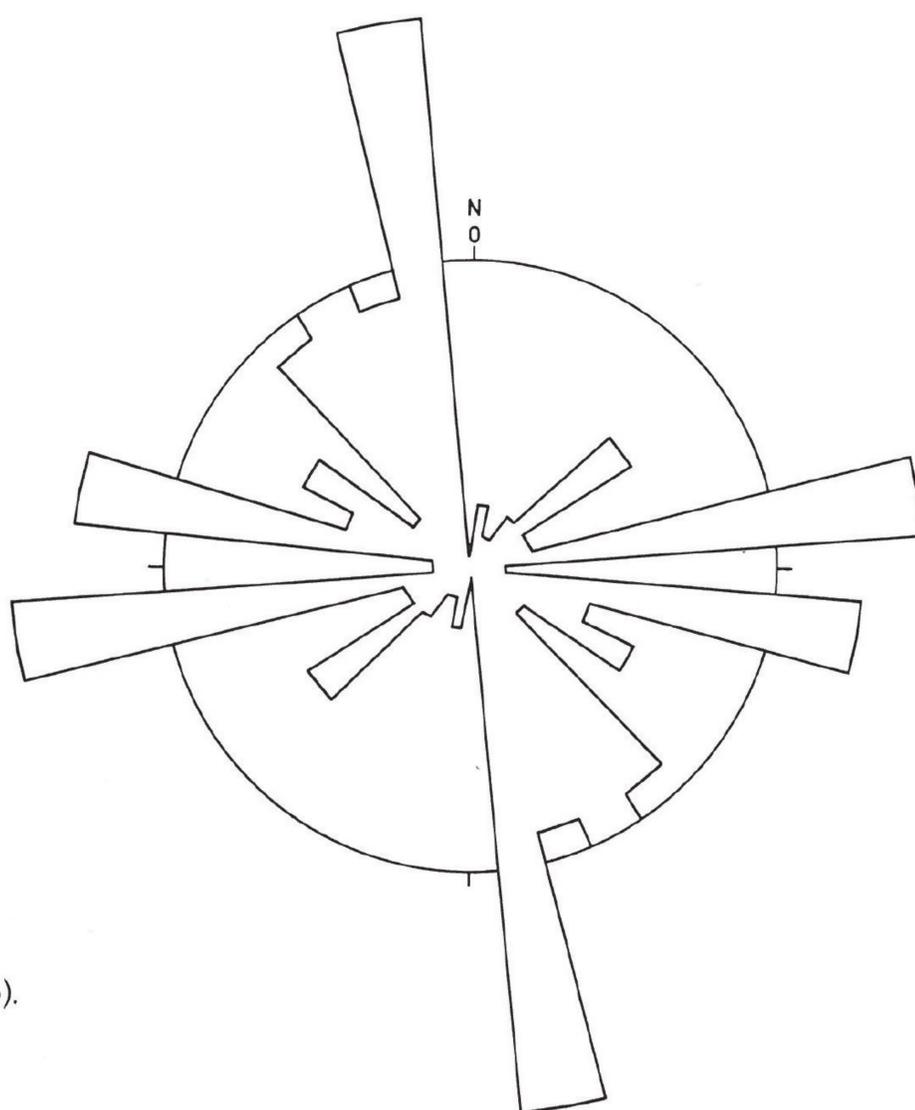


Abb. 15: Richtungsrose der Lineare außerhalb des Rutschgebietes Trarbach (R = 10%, N = 320).

same Maxima sind $20-30^\circ$, $90-100^\circ$ und 150° . Parallel zu diesen Richtungen verlaufen bevorzugte Diskontinuitätsflächen bzw. -zonen des Gebirges im Rutschhang. Die ermittelten Schollen werden als Teilschollen der Rutschung aufgefaßt, welche in der Zeit, Geschwindigkeit und Richtung voneinander unabhängige Bewegungen ausführen können.

5.6. Gleitmechanismus

Die Hauptbruchstaffel der Primärrutschung und auch die Bruchstaffeln der Sekundärrutschungen, die sich aus Gleit- und Abrißflächen zusammensetzen, sollten sich aus den Schicht- und Schieferflächen, die \pm parallel verlaufen sowie den Längsklüften (bc-Klüften) gebildet haben.

Die Längsklüfte streichen parallel bis spitzwinklig zur Böschung und fallen durchschnittlich mit $50-70^\circ$ talwärts ein. Richtungsmaxima ihres Streichens liegen bei $10-70^\circ$. Die Längsklüfte wirkten als Gleitflächen. Die Schicht- und Schieferflächen fallen mit etwa 45° bergwärts ein. Vor allem die mechanisch wirksamen Schieferflächen bildeten Abrißflächen. Kernbohrungen im Bereich der Stirn der Primärrutschung ergaben Tiefen der Bewegungsflächen um 9 m.

Durch die Sekundärgleitungen ist das Gebirge, im Gegensatz zur Primärrutschung, wo der Gebirgsverband erhalten geblieben ist, nach Beobachtungen während des „ground check“ völlig aus dem Schichtverband geraten und zu Trümmern durchbewegt worden. Bei der Primärgleitung dagegen erfolgte eine Internrotation von etwa 45° der im Gebirgsverband

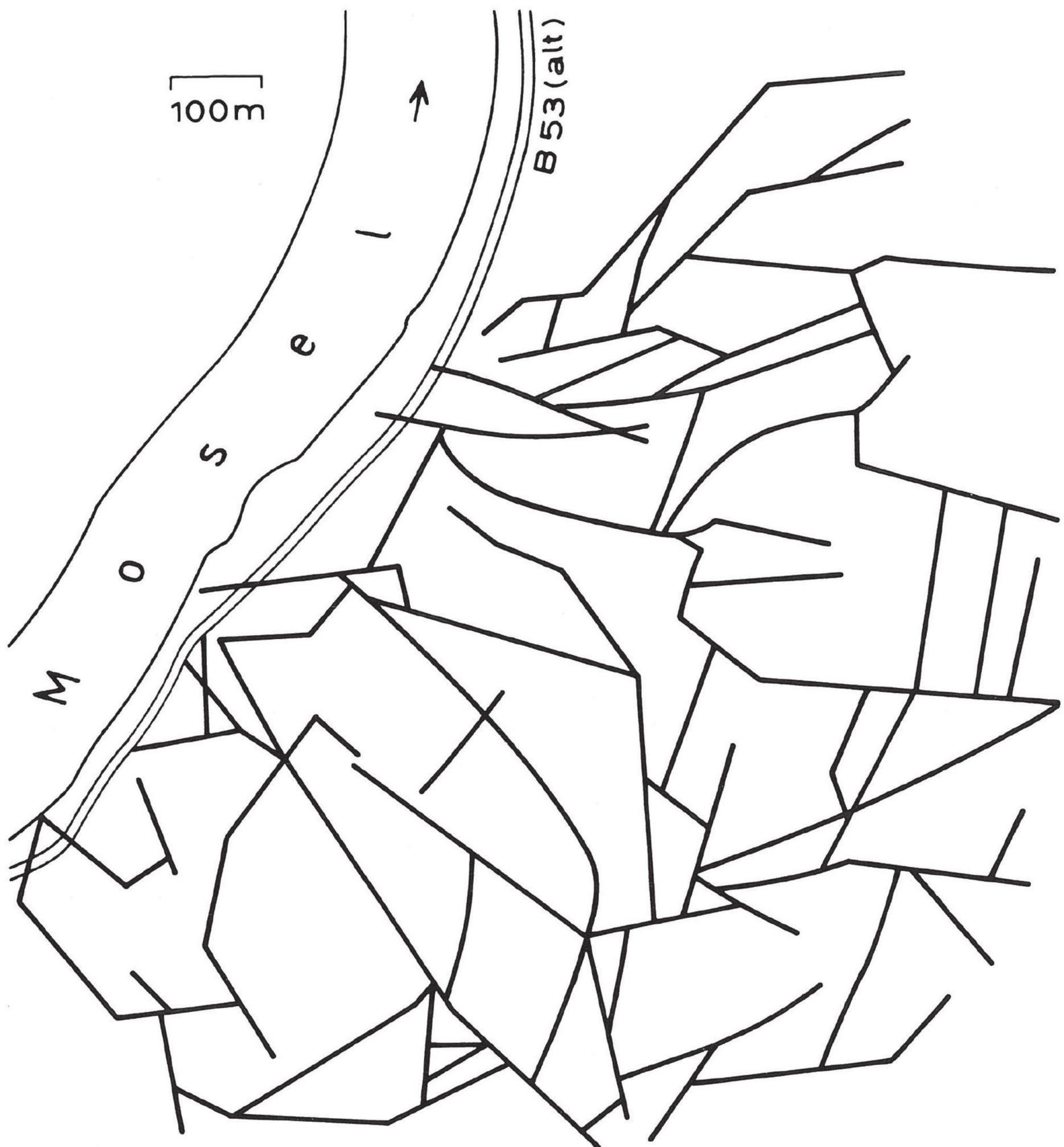


Abb. 16: Schollensynthese.

gebliebenen Kluffkörper, wie Aufschlüsse am Böschungsfuß zeigen, wodurch die Schieferflächen dort steil stehen.

5.7. Satellitenbildlineare und Ursachen der Gleitbewegungen

Worin liegen, außer in der Möglichkeit der Ausbildung von Bruchstufen, die Ursachen der Primärrutschung in diesem unterschrittenen Prallhang? Wie kann Bergwasser zudringen? Hier bringt uns die Auswertung des Landsat-5-Satellitenbildes weiter (Abb. 18). Im Bereich des Rutschhanges finden sich 4 über 1 km lange Satellitenbildlineare. Zwei Lineare streichen

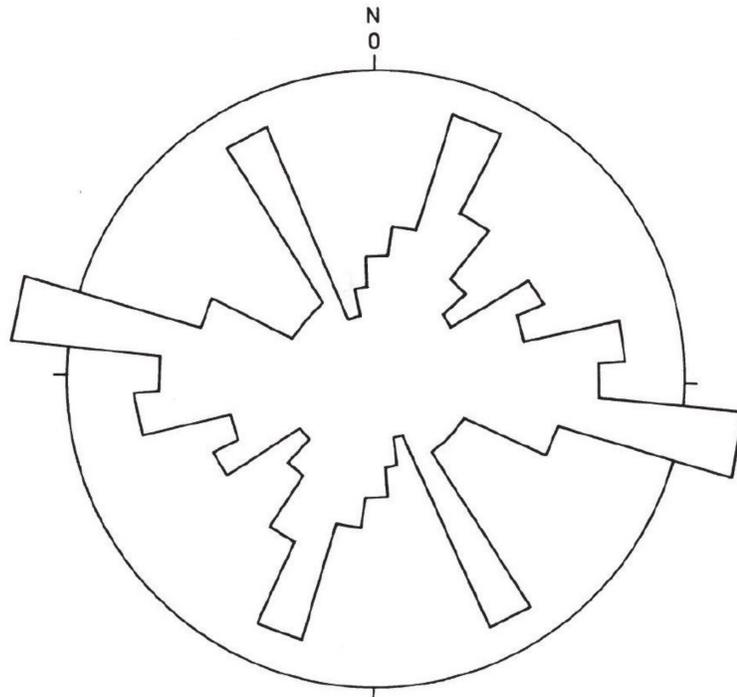


Abb. 17: Richtungsrose der Schollengrenzen in Trarbach ($R = 10\%$, $N = 102$).

etwa 175° , wobei das eine parallel dem Westrand des Rutschgebietes verläuft. Ein Linear streicht mit 130° parallel dem Ostrand der Rutschungen und das vierte Linear ist mit 80° Streichrichtung schräg zum Hangfuß orientiert. Besonders die 175° streichenden Lineare zeichnen hydraulisch wirksame Trennflächen des Gebirges nach. Auf der einen Struktur sitzt in der Verlängerung die Thermalquelle von Bad Wildstein. Der aufgelassene Bergbau bei Kautenbach wurde auf bleivererzte Quarzgänge parallel diesen 175° streichenden Linearen betrieben. Die Quarzgänge fallen steil nach Südwesten ein (LEPPLA 1901, S. 23).

Die Satellitenbildlineare gehen auf Schwächezonen des Gebirges zurück, die Zonen tieferreichender Entfestigung durch Zerstörung von Materialbrücken der Kluffkörper darstellen

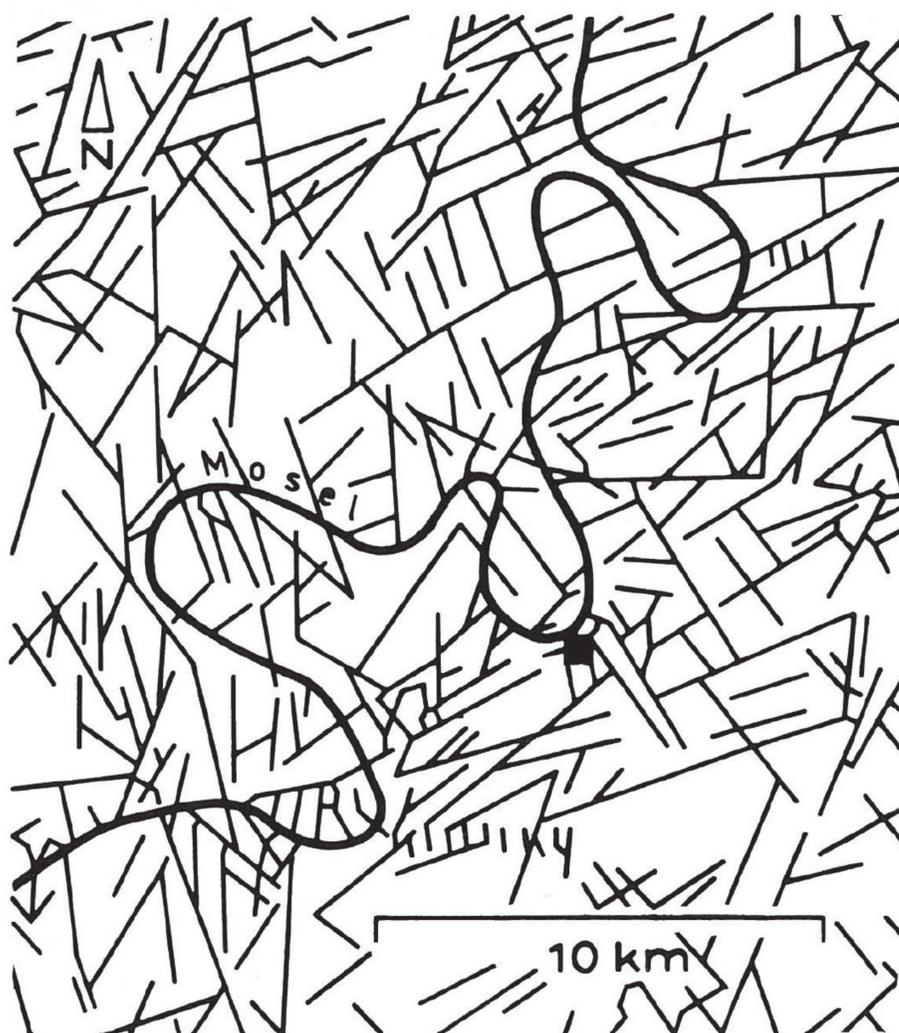


Abb. 18: Satellitenbildlineare im Bereich des Rutschhanges Trarbach (KRAUTER et al. 1985).

sowie eine wesentliche Auflockerung des Gebirges im Hang verursachen, so daß keine seitliche Einspannung mehr vorhanden ist. Zusätzlich – das ist entscheidend – führen diese Zonen gezielt Bergwasser zu. Das Wasser dürfte als auslösendes Moment für die primären Massenbewegungen gewirkt haben, und zwar vor allem durch hydrostatischen Druck auf den Abrißflächen der potentiellen Bruchstafel sowie durch eine Abminderung der Scherfestigkeit auf den Gleitflächen. Daneben könnten Hochwässer der Mosel eine weitere, gleichzeitige auslösende Ursache der Primärrutschung gewesen sein. Durch den gestiegenen Wasserspiegel des Flusses wurde das Widerlager am Hangfuß infolge von Abtragung, aber auch durch Auftriebswirkung des gestiegenen Wasserspiegels reduziert.

Schriften

- ERNST, W. (1968): Herkunft und Verteilung von Bodengasen in einigen deutschen Störungszonen. – Erdöl und Kohle, **21**, S. 605-610 u. 692-697, Hamburg.
- FÜRST, M. (1980): Die photogeologische Linearanalyse und ihre Anwendung bei der indirekten Erkundung von Kluftwasser. – Mainzer geowiss. Mitt., **9**, S. 53-81, 25 Abb., Mainz.
- FÜRST, M. & BANDELOW, F. K. & KRUG, U. (1982): Ein Vergleich zwischen Photolineationen und Gefügeelementen aus dem Raum Lippstadt/Westfalen. – Mainzer geowiss. Mitt., **11**, S. 79-86, 7 Abb., Mainz.
- FÜRST, M. & KRUPP, R. & MÜLLER, R. (1978): Die photogeologische Linearanalyse und ihre Anwendung bei der Uranprospektion in der Oberpfalz. – Erlanger geol. Abh., **106**, 34 S., 9 Taf., Erlangen.
- KLENGEL K. J. & PAŠEK, J. (1974): Zur Terminologie von Hangbewegungen. – Z. angew. Geol., **20**, S. 128-132, 2 Abb., 1 Tab., Berlin.
- KRAUTER E. & HÄFNER, F. (1980): Die Bedeutung der Luftbildlinearanalyse für die Baugrunderkundung. – Vorträge Baugrundtagung in Mainz, S. 201-220, 15 Abb., Essen.
- KRAUTER, E. & KERZAN, K. & HOFMANN, G. (1985): Deformation an Felshängen und ihre Abhängigkeit vom geologischen Aufbau im Bereich des Straßennetzes im Rheinischen Schiefergebirge. – Forsch. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 478 S., zahlreiche Abb. u. Anlagen, Bonn.
- KRAUTER, E. & STEINGÖTTER, K. (1980): Kriech- und Gleitvorgänge natürlicher und künstlicher Böschungen im Tertiär des Mainzer Beckens (Bundesrepublik Deutschland). – Sechste Donau-Europäische Konferenz f. Bodenmechanik und Grundbau, Sekt. **3**, S.153-164, 7 Abb., Varna.
- (1983): Die Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens 1 : 50000. – Geol. Jb., **C 34**, 31 S., 12 Abb., 5 Taf., Hannover.
- KRONBERG, P. (1984): Photogeologie. Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern. 268 S., 238 Abb., Stuttgart (Enke).
- (1985): Fernerkundung der Erde. Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie. 394 S., 246 Abb., Stuttgart (Enke).
- LEPPLA, A. (1901): Erläuterungen geol. Specialkarte Preußen Bl. 6008 Bernkastel. Kgl. preuß. geol. L.-Anstalt u. Bergakad., **79**, 26 S., Berlin.
- NEMČOK, A. & PAŠEK, J. & RYBÁŘ, J. (1972): Classification on Landslides and Other Mass Movements. – Rock Mechanics, **4**, S. 71-78, 4 Abb., New York/N. Y.
- PRINZ, H. (1980): Tunnelbau im Buntsandstein Ost- und Nordhessens. – Ber. 4. nat. Tagung Felsmechanik Aachen, S. 135-157, 6 Abb., Essen.
- REUL, K. (1973): Anwendung der Luftbildgeologie bei der Grundwassererschließung. – Gas- und Wasserfach, **114**, S.53-104, München.
- SONNE, V. (1974): Einführung in die Geologie des Mainzer Beckens. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., **56**, S. 35-41, 1 Tab., Stuttgart.

- STEINGÖTTER, K. (1978): Ingenieurgeologisch-felsmechanische Untersuchungen an Straßenböschungen der Bundesstraßen 50 und 53 im Bereich der Mittelmosel zwischen Bernkastel-Kues und Zell (Rheinisches Schiefergebirge). Dipl.-Arbeit, 143 S., 60 Abb., 2 Kt., Mainz. – [unveröff.]
- (1984): Hangstabilitäten im linksrheinischen Mainzer Becken. Ingenieurgeologische Untersuchungen und kartenmäßige Darstellung. Diss., 208 S., 74 Abb., 10 Tab., 3 Kt., Mainz. – [unveröff.]
- WAGNER, W. (1935): Geologische Karte 1 : 25 000. Bl. 6114 Wörrstadt. Darmstadt.
- WELLING, M. (1984): Nachweis von Luftbild-Lineationen durch Bodengasmessungen und ihr Zusammenhang mit Rutschungen in Rheinhessen (Mainzer Tertiärbecken). Dipl.-Arbeit, 69 S., 32 Abb., 11 Tab., Mainz. – [unveröff.]

Anschrift des Autors: Dr. KLAUS STEINGÖTTER, Im Quellborn 6, D-6501 Klein-Winternheim.

Manuskript eingegangen am 5. 8. 1986