

Entwurfstechnische Möglichkeiten zur Vermeidung entwässerungsschwacher Zonen auf Richtungsfahrbahnen

FA 2.295

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsanlagen (Prof. Dr.-Ing. C. Lippold) /

Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Ressel)

Bearbeiter: Ressel, W./ Lippold, C./ Lehmann, T./ Vettters, A./ Klötzl, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Dezember 2011

- negative Querneigung,
- Schrägverwindung oder
- Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Ob eine dieser Maßnahmen erforderlich wird, soll im Einzelfall auf der Grundlage einer detaillierten wassertechnischen Berechnung zum Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke, Geschwindigkeit und Aquaplaninggefahr nachgewiesen werden. Die jeweils geeignete Maßnahme ist in Abhängigkeit von den konkreten planerischen Randbedingungen vorzuschlagen. Allerdings geben die RAA (FGSV, 2008) kein geschlossenes Berechnungsverfahren vor.

1 Aufgabenstellung

Mit der Neustrukturierung des Kernregelwerks für die geometrische Gestaltung von Straßen werden seit 2008 für Autobahnen eigenständige Entwurfsrichtlinien – die RAA – herausgegeben. Damit sollte der erforderlich hohe Entwurfsstandard für Autobahnen gewahrt werden und eine Abgrenzung zu den anderen, einbahnigen und zweibahnigen Außerortsstraßen erfolgen.

Für Autobahnen liegt in den kommenden Jahren der Schwerpunkt auf dem (meist grundhaften) Um- und Ausbau. Damit verbunden ist in der Regel eine Verbreiterung des Querschnitts durch einen beiderseits angeordneten Standstreifen oder die Erhöhung der Fahrstreifenanzahl auf sechs und in einigen Fällen auf acht Fahrstreifen.

In den vergangenen Jahren haben sich insbesondere bei den einschränkenden Randbedingungen des Um- und Ausbaus die Verwindungsbereiche vor allem bei breiten Richtungsfahrbahnen oftmals als problematisch herausgestellt. Das auffällige Unfallgeschehen und auch die Rechtsprechung in Gerichtsverfahren, in denen die Vermeidung von Nässeunfällen thematisiert wurde, führten für solche Abschnitte häufig zu einer umfassenden Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei Nässe. Verschiedene Gutachten bestätigen das häufig nicht ausreichende Entwässerungsvermögen breiter Richtungsfahrbahnen insbesondere bei geringen Längsneigungen und bei sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten. Die Arbeiten zeigten, dass bei sechs- oder achtstreifigen Regelquerschnitten die Wasserfilmdicken unter Umständen über dem kritischen Maß von 2 mm liegen können. Das genaue Maß hängt von den jeweiligen entwurfstechnischen Randbedingungen und den Regenereignissen ab.

Aus diesem Grund schlagen auch die neuen RAA (FGSV, 2008) verschiedene Möglichkeiten zur Gewährleistung einer ausreichenden Fahrbahnenentwässerung vor. Dazu zählen (gekürzt):

- Erhöhung der Längsneigung,
- Einbau offenporiger Deckschichten,
- konstruktive Maßnahmen (z. B. Querkastenrinnen),

Auch liegen noch nicht für alle vorgeschlagenen Maßnahmen umfassende Erfahrungen vor. Das trifft z. B. für die Schrägverwindung zu, die in den vergangenen Jahren wegen des bautechnischen Aufwands selten angewandt wurde. Erst in jüngster Zeit kann die Straßenbaupraxis auf positive Erfahrungen mit dem Einbau und dem Betrieb von Schrägverwindungen verweisen. Dies hat zur Beibehaltung der Schrägverwindung in den RAA (FGSV, 2008) geführt, ohne dass dies wissenschaftlich begleitet und abgesichert worden war. Auch wird die Schrägverwindung nur als Alternative unter den einschränkenden Randbedingungen des Um- und Ausbaus, nicht jedoch für den Neubau empfohlen.

Darüber hinaus hat es sich bei der Dimensionierung der Entwurfselemente in den RAA (FGSV, 2008) als nötig erwiesen, neue Erkenntnisse hinsichtlich der Straßengriffigkeit zu berücksichtigen. Außerdem wurden die fahrdynamischen Dimensionierungsgrundlagen, vor allem der Ausnutzungsgrad n für alle Radien (positive/negative Querneigung auf der freien Strecke und bei Rampen) untereinander neu abgestimmt und festgelegt. In der Folge weichen die neuen Mindestradien bei negativer Querneigung erheblich von denen der Vorgängerrichtlinien RAS-L (FGSV, 1995) ab. Die in den RAA erfolgte Reduzierung um 1 500 m auf Werte bis zu $R_{\min} = 4\,000$ m beruht auf begründeten Sicherheitsannahmen. Eine wissenschaftliche Absicherung und die Prüfung möglicher oder erforderlicher Veränderungspotenziale sind noch erforderlich.

Aus entwurfstechnischer Sicht sind die Schrägverwindung und die negative Querneigung aber gut geeignete Möglichkeiten, um entwässerungsschwache Zonen zu vermeiden.

Ziel der Untersuchung war es daher, diese beiden entwurfstechnischen Möglichkeiten zu untersuchen sowie die Empfehlungen in den RAA wissenschaftlich abzusichern und fortzuschreiben oder den gegebenenfalls notwendigen Veränderungsbedarf aufzuzeigen.

Das Forschungsvorhaben ordnet sich damit in eine Reihe von Themen ein, die der Fortschreibung der RAA dienen, mit dem Ziel, eventuelle Einsparungspotenziale bei der Dimensionierung der Entwurfselemente für einen wirtschaftlicheren Entwurf zu ermitteln und gleichzeitig das Maß der Verkehrssicherheit besonders für die kritische Situation der schnellen Fahrt bei Nässe zu wahren bzw. zu erhöhen.

Konkret ergaben sich folgende Fragen:

- Welche entwässerungstechnischen Vorteile ergeben sich durch die Schrägverwindung und die negative Querneigung?
- Wie verhalten sich Kraftfahrer beim Durchfahren einer Schrägverwindung bzw. negativen Querneigung?
- Sind Schrägverwindungen unfallauffälliger als herkömmliche Verwindungsbereiche?
- Sind die Kräfte am Fahrzeug beim Durchfahren einer Schrägverwindung aus fahrdynamischer Sicht vertretbar?
- Inwieweit können mögliche Nachteile in der Fahrdynamik bei der Überfahrt des Grats durch mögliche Vorteile bei der Entwässerung aufgewogen werden?
- Welche bautechnischen und betrieblichen Aspekte sind beim Bau, der Erhaltung und beim Betrieb von Schrägverwindungen zu beachten?
- Sind Kurven mit negativer Querneigung unfallauffälliger als Kurven mit positiver Querneigung?

2 Untersuchung

Die Untersuchung umfasst damit zwei in sich geschlossene, eigenständige Schwerpunkte: die Bewertung der Schrägverwindung und die Überprüfung der negativen Querneigung. Dafür wurden jeweils methodisch unterschiedliche Wege beschritten.

Zur Bewertung der Schrägverwindung gehörten folgende Ansätze:

- Simulation des Entwässerungsverhaltens der Straßenfläche bei unterschiedlichen Streckengeometrien,
- fahrdynamische Bewertung des "wandernden Grats" in Feldmessungen mit einem Messfahrzeug,
- Bewertung der fahrdynamischen Ergebnisse in modelltheoretischen Berechnungen und Vergleichen,
- Untersuchung des Fahrverhaltens freifahrender Pkw in solchen Verwindungsbereichen,
- Auswertung des Unfallgeschehens und Bewertung der Verkehrssicherheit sowie
- Erhebung der Erfahrungen in der Straßenbaupraxis zum Einbau und zur Erhaltung der Schrägverwindung.

In die Überprüfung der entwurfstechnischen Vorgaben für die negative Querneigung wurden folgende Ansätze einbezogen:

- Simulation des Entwässerungsverhaltens der Straßenfläche bei unterschiedlichen Streckengeometrien,
- fahrdynamische Berechnung der Mindestradien und Abgleich mit Modellen der Kraftfahrzeugtechnik,
- Untersuchung des Fahrverhaltens freifahrender Pkw in Kurven mit negativer Querneigung sowie auf benachbarten Abschnitten und

- Auswertung des Unfallgeschehens und Bewertung der Verkehrssicherheit.

In der Folge sollten für beide Untersuchungsschwerpunkte Textvorschläge zur Übernahme in die RAA bei deren Fortschreibung bzw. alternativ Handlungsempfehlungen und Randbedingungen für die Straßenbauverwaltung bei der Umsetzung dieser beiden Entwässerungslösungen erarbeitet bzw. aufgezeigt werden.

2.1 Schrägverwindung

In den RAA wird noch davon ausgegangen, dass die Schrägverwindung als fahrdynamisch nachteilig bei hohen Geschwindigkeiten und bautechnisch als dauerhafte Lösung aufwendig herzustellen ist.

Die entwässerungstechnischen Simulationen haben gezeigt, dass die Schrägverwindung gut geeignet ist, um keine aquaplaninggefährdeten Bereiche entstehen zu lassen.

Bei den fahrdynamischen Kennwerten besteht der größte Unterschied zwischen der Schrägverwindung und der Standardverwindung in der Länge des Bereichs, in dem der Querneigungswechsel vollzogen wird (Standardverwindung ca. 65 m, Schrägverwindung 140 - 240 m). Jedoch kommt es nach Überfahren des Grats bei keiner der betrachteten fahrdynamischen Größen zu nennenswert großen Ausschlägen oder Maximalwerten, die für das Fahrzeug kritisch werden könnten.

Die Untersuchung des Fahrverhaltens wurde mittels Geschwindigkeitsmessungen (Verfolgungsfahrten und Querschnittsmessungen) durchgeführt. Es konnten keine Auswirkungen der Schrägverwindungen auf das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer festgestellt werden.

Das Unfallgeschehen zeigte keine Auffälligkeiten. Auch die Unfälle bei Nässe lassen auf eine ausreichende Entwässerung innerhalb der Schrägverwindungen schließen.

Für die Anwendung der Schrägverwindung können zusammenfassend folgende Empfehlungen für die Entwurfspraxis gegeben werden:

- Schrägverwindungen weisen aufgrund ihrer Geometrie keinen Querneigungsnulldurchgang im Sinne einer Standardverwindung auf und vermeiden auf diese Art entwässerungsschwache Zonen.
- Bei der Simulation des Entwässerungsverhaltens schneidet selbst eine Schrägverwindung mit vier Fahrstreifen besser ab als eine Standardverwindung mit zwei Fahrstreifen (RQ 29,5), sie ist damit wirksamer.
- Die Schrägverwindung weist ein gleichbleibend gutes Entwässerungsverhalten selbst bei $s = 0$ % auf.
- Deshalb ist die Schrägverwindung aus geometrischen Gesichtspunkten grundsätzlich vor allem bei kleinen Längsneigungen geeignet. Bei großen Längsneigungen stellt die Standardverwindung eine angemessene sichere Lösung dar.
- Die Entwässerungseigenschaften für eine Schrägverwindung mit $q = 1,5$ % sind schlechter als mit 2,5 %,

- aber immer noch besser als bei einer Standardverwindung.
- Fahrdynamisch ist die Schrägverwindung in den Messwerten (verglichen mit einer Standardverwindung) zwar auffälliger, aber nicht kritisch.
- Die untersuchten Bewegungsänderungen des Fahrzeugs und die auf das Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen beim Überfahren des Grats liegen quantitativ in einem Bereich wie er auch auf der übrigen Strecke (z. B. hervorgerufen durch Fahrbahnebenenheiten) vorzufinden ist. Insofern ist die Schrägverwindung fahrdynamisch insgesamt als unproblematisch zu bewerten.
- Die durch die Schrägverwindung nachweisbaren Kräfte beim Überfahren des Grats werden in der Fahrpraxis dadurch ausgeglichen, dass der Verwindungsbereich in der Wendelinie liegt und der Fahrer dort bereits aufgrund der Krümmungsänderung eine Lenkbewegung ausführt. Er kann somit besser auf die sich bei Gratüberfahrt verändernde Lage sowie Kräfte reagieren.
- Die RAA 2008 sollten die Angaben zur Länge der Schrägverwindungen aufnehmen. Es wird dabei eine Zuordnung zum jeweiligen Regelquerschnitt empfohlen:

Entwurfsklasse	Regelquerschnitt (RAA)	Länge der Schrägverwindung [m]
	RQ 43,5	220
EKA 1	RQ 36	175
	RQ 31	145
EKA 2	RQ 28	105
	RQ 38,5	130
EKA 3	RQ 31,5	105
	RQ 25	80

- Bei der Schrägverwindung handelt es sich um eine sehr sichere Variante zur Gestaltung von Verwindungsbereichen.
- Die Unfallkennzahlen zeigen, dass die Schrägverwindung deutlich sicherer als eine Standardverwindung ist.
- Beim Einbau der Schrägverwindung wurden gute Erfahrungen gemacht. Die Bauindustrie ist bautechnisch in der Lage, die Schrägverwindungen in guter Qualität herzustellen. Erhaltungstechnisch ist kein erhöhter Aufwand bekannt.
- Die Kosten für die Herstellung einer Schrägverwindung belaufen sich im Vergleich zur Standardverwindung auf etwa das Doppelte (Erfahrungen beim nachträglichen Umbau von entwässerungskritischen Abschnitten).

- Die Erfahrungen der Straßenbauverwaltung haben gezeigt, dass der Einbau derzeit lediglich in bituminöser Bauweise vorgenommen wird. Schrägverwindungen in Zementbeton sind nicht bekannt.
- Bei Anwendung der Schrägverwindung ist der erhöhte Längenbedarf gegenüber der Standardverwindung zu beachten. Es müssen ausreichend lange Übergangsbögen vorhanden sein. Auf Autobahnen ist das jedoch in der Regel der Fall.
- Der Hinweis unter Ziffer 5.6.3.3 der RAA, dass Schrägverwindungen bei hohen Geschwindigkeiten fahrdynamisch nachteilig und bautechnisch als dauerhafte Lösung aufwendig herzustellen sind, kann künftig entfallen. Schrägverwindungen sollten auch für Neubaumaßnahmen empfohlen werden. (Der Ausschuss für Strecken in Zementbetonbauweise ist noch im zuständigen Gremium AA 2.1 der FGSV zu beraten.)
- Die Geometrie der Schrägverwindung sollte in den RAA dargestellt werden (s. Bild 1 und Bild 2).

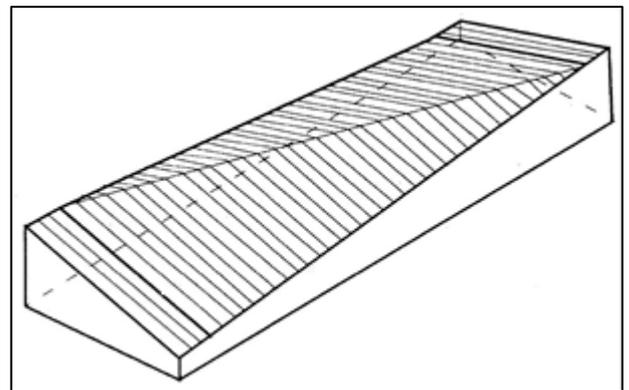


Bild 1: Ansicht einer Schrägverwindungsstrecke – stark überhöht (FGSV 1995)

2.2 Negative Querneigung

Die vorliegende Untersuchung wurde – wie bereits erwähnt – als Forschungsbedarf während der Neufassung der RAA abgeleitet. Für den Entwurf der RAA war es bereits zu Untersuchungsbeginn erforderlich, als Diskussionsgrundlage für die Gremien der FGSV und für die Straßenbauverwaltungen eine Vorbemessung der Entwurfs Elemente vorzunehmen.

Für die RAA – und parallel für die vorliegende Untersuchung – ergab sich zunächst daraus, das bisherige fahrdynamische Modell in modifizierter Form weiter anzuwenden und damit die Grenzwerte für die Straßenflächengestaltung – und hier vor allem für die Mindeststradien bei negativer Querneigung – festzulegen.

Das Prozedere ist bereits umfassend bei Lippold/Ressel et al. (2011) beschrieben.

Folgende Punkte wurden für die Neufassung der Kurvenradien mit negativer Querneigung berücksichtigt:

- Einbeziehung der Schwellenwerte für die Griffigkeit in tangentialer Richtung nach MB Griff,

- Neufestlegung der Ausnutzungsgrade, differenziert nach Rampen und Radien mit positiver/negativer Querneigung,
- Dimensionierung mit Richtgeschwindigkeit $V_R = 130$ km/h,
- Entfall einer alternativen maximal zulässigen Querneigung von $\max q = 2,0\%$ für Radien mit negativer Querneigung bei Zementbetondecken (gegenüber den RAS-L, 1995).

Generell sind Kurvenradien mit negativer Querneigung so groß dimensioniert, dass auf ihnen sehr schnell gefahren wird. Die durchschnittlichen V_{85} -Geschwindigkeiten der frei fahrenden Fahrzeuge betragen 185 km/h. Hinsichtlich des Geschwindigkeitsverhaltens war also kein Zusammenhang zwischen der Größe der Entwurfs-elemente und den gefahrenen Geschwindigkeiten nachweisbar. Das gilt für die etwas größeren Mindestwerte nach den RAS-L 1995 genauso wie für die etwas kleineren Mindestwerte nach den neuen RAA 2008.

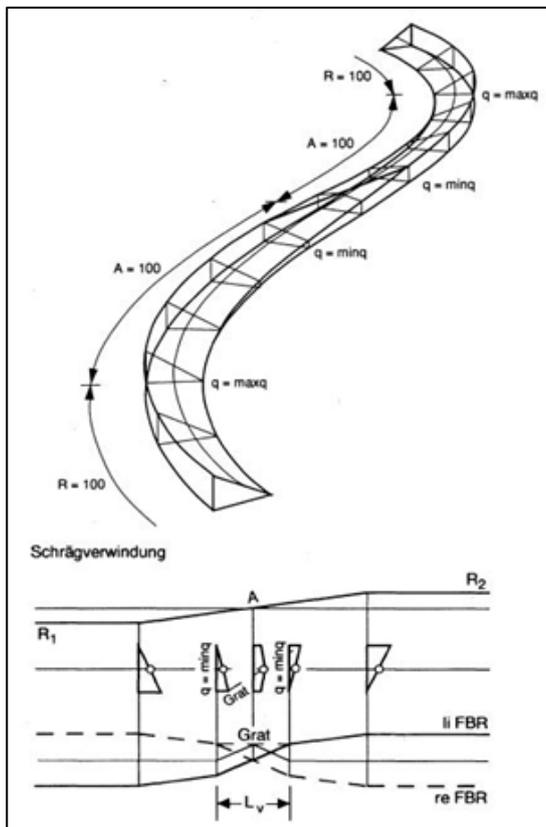


Bild 2: Beispiel eines langen Schrägverwindungsbereichs (FGSV, 1995)

Dagegen hat sich die Verkehrsstärke auf die Fahrgeschwindigkeiten ausgewirkt. Bei hochbelasteten Richtungsfahrbahnen lagen begrenzt frei fahrende Fahrzeuge vor, es wurden daher schnell fahrende Fahrzeuge bzw. Fahrzeugpuls des linken Fahrstreifens aufgenommen. Die mittlere V_{85} des schnell fahrenden Fahrzeugkollektivs sank auf ca. 155 km/h. Für die Ableitung von Mindestradien auf der Grundlage der Fahrdynamik des Einzelfahrzeugs ist dieser Zusammenhang letztlich aber ohne Belang.

Bei der Auswertung des Unfallgeschehens hat sich gezeigt, dass die Verkehrssicherheit von Radien mit negativer Querneigung bei steigender Geschwindigkeit abnimmt. Generell sind solche Radien aber über alle Geschwindigkeitsbereiche genauso sicher wie die entsprechenden Nachbarabschnitte, nämlich die gleich großen Kurven in Gegenrichtung mit positiver Querneigung.

Für die Anwendung der negativen Querneigung können zusammenfassend folgende Empfehlungen für die Entwurfspraxis gegeben werden:

- Kurven mit negativer Querneigung sind geometrisch so gestaltet, dass über den gesamten Kurvenbereich eine Querneigung von $q = -2,5\%$ gewährleistet ist und entwässerungsschwache Zonen vermieden werden.
- In Kurven mit negativer Querneigung ist kein auffällig höheres Unfallaufkommen gegenüber anderen Streckenabschnitten und anderen Entwässerungslösungen (über die Straßenflächengestaltung) feststellbar. Bei dem vorhandenen Unfallgeschehen handelt es sich in der Größenordnung um das Grundunfallgeschehen auf Bundesautobahnen (Grundunfallkostenrate nach den ESN).
- Auf Strecken mit einer Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit waren jedoch weniger Unfälle und eine geringere Unfallschwere zu verzeichnen als auf Strecken ohne V_{zul} mit höher gemessenen Fahrgeschwindigkeiten.
- Wegen des erhöhten Anteils an Unfällen bei Nässe in dem nach den RAA vorgeschlagenen Radienbereich von $4\ 000 \leq R \leq 5\ 500$ m sollte eine Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei Nässe auf 120 km/h erfolgen.
- Bei Trockenheit wurde keine Abhängigkeit des Unfallgeschehens von der Radiengröße der Kurven mit negativer Querneigung festgestellt. Die in den RAA festgelegten Radien mit negativer Querneigung haben sich für diesen Fahrbahnzustand offensichtlich bewährt und bedürfen keiner Veränderung.
- Es wird vorgeschlagen, Tabelle 17 der RAA wie folgt zu modifizieren:

Entwurfsklasse	R [m]	zul. V_{nass} [km/h]
EKA 1	4 000 –	120
	5 500	
	> 5 500	-

- In den Diskussionen zu den Sicherheitsstandards in den RAA sollte bei deren Fortschreibung auch beraten werden, ob weiterhin separate Werte für die EKA 1B angegeben werden sollen.
- Da generell auch der Anteil von Glätteunfällen hoch ist, sollte außerdem zusätzlich auf die Gefahr bei Glätte hingewiesen werden. Das kann durch eine stationäre Beschilderung innerhalb des Gefahrenzeitraums

(Winterhalbjahr) geschehen oder mittels einer Verkehrsbeeinflussungsanlage, sofern diese vorhanden ist. Auch ist die besondere Kennzeichnung der Glättegefahr mittels des Zeichens Z 101 und dem Zusatzschild "Schnee und Eisglätte" nach StVO möglich.

- Im Vergleich zu einer Standardverwindung ist die Verkehrssicherheit bei Anordnung einer negativen Querneigung höher.
- In der Praxis wird eine (Standard-)Verwindung jedoch in der Regel dann erforderlich, wenn sich kein ausreichend großer Radius mit der Möglichkeit einer negativen Querneigung trassieren lässt.
- Wegen des besseren Entwässerungsvermögens der negativen Querneigung bei $q = -2,5\%$ und dem insgesamt unauffälligen Unfallgeschehen wird die zusätzliche Möglichkeit einer Querneigung von $q = -2,0\%$ zur Verbesserung der Verkehrssicherheit nicht als erforderlich angesehen. Die Regelung in den RAA, im Gegensatz zu den RAS-L auf eine Querneigung von $q = -2,0\%$ zu verzichten, kann bestätigt werden.
- Aufeinanderfolgende, gegensinnig gerichtete Kurven mit Standardverwindungen weisen höhere Unfallkenngrößen auf als Elementfolgen mit durchgängig nach außen geneigter Fahrbahn.

3 Fazit und Folgerungen für die Praxis

Mit der vorliegenden Untersuchung konnten zwei entwurfstechnische Lösungen zur Vermeidung abflussschwacher Zonen, nämlich die Schrägverwindung und die negative Querneigung, wissenschaftlich abgesichert und Empfehlungen für deren Umsetzung in die Planungs- und Baupraxis gegeben werden.

Die Ergebnisse resultieren aus fahrdynamischen Berechnungen und Messungen, aus Simulationen sowie aus Fahrverhaltens- und Unfalluntersuchungen.

Wegen der zeitversetzten Arbeit an den RAA und am hier vorliegenden Forschungsvorhaben hat sich die RAA zunächst nur auf pragmatische und aus der Erfahrung begründete Festlegungen bzw. Festsetzungen beschränkt. Diese haben sich im Ergebnis dieser Untersuchung bestätigt und als richtig erwiesen.

Für Schrägverwindungen wurde die bevorzugte Anordnung bei geringen Längsneigungen, auch für Neubau, empfohlen und eine Tabelle mit der Länge des "wandernden Grats" in Abhängigkeit vom Regelquerschnitt erstellt. Bei Kurven mit negativer Querneigung wurden geringfügige Modifikationen vorgeschlagen, z. B. die Warnung bei nassen und glatten Fahrbahnzuständen oder die Kombination mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Diese dienen als Diskussionsgrundlage im zuständigen Arbeitsausschuss 2.1 der FGSV für die mögliche Integration in die RAA bei deren Fortschreibung.