

**Veröffentlichungen aus dem
INSTITUT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN**

STEFFEN R. HERRMANN

**SIMULATIONSMODELL ZUM
WASSERABFLUSS- UND AQUAPLANING-VERHALTEN
AUF FAHRBAHNOBERFLÄCHEN**

**Universität Stuttgart
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel**

Februar 2008

Herausgeber : Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel

Einbandgestaltung : U. Mertz

Copyright : Das Copyright liegt bei den Verfassern.

Eigenverlag
und Vertrieb : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 7
D- 70569 Stuttgart

Hinweis / Note:

Diese Veröffentlichung ist auch als "Elektronische Dissertation" online unter <http://elib.uni-stuttgart.de> verfügbar und kann dort komplett in Farbe im PDF-Format heruntergeladen werden.

This paper is also published online as "Electronic Dissertation" at <http://elib.uni-stuttgart.de> and can be downloaded there as a full colored PDF file.

D 93

ISSN 0932 - 402X

ISBN 978 - 3 - 9808218 - 8 - 9

Stuttgart, im Februar 2008

Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Steffen R. Herrmann

aus Waiblingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Oktober 2007

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

2007

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Institut für Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart.

An erster Stelle möchte ich mich sehr herzlich für die Betreuung und Unterstützung der Arbeit bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel bedanken, unter dessen Leitung und Betreuung auch das dieser Arbeit vorangegangene F+E-Vorhaben durchgeführt wurde.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Helmig (Lehrstuhl für Hydrodynamik und Hydrosystemmodellierung, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart) für die Übernahme des Korreferats, sein Interesse an dieser Arbeit und für die gute Zusammenarbeit und Hilfe während allen Phasen des Projekts. Bereits zu Beginn des Projekts „Aquaplaning und Wasserfilmdicken“ konnten er und seine Mitarbeiter mit ihren wertvollen Ratschlägen zum guten Start und Gelingen des Projekts beitragen.

Daneben möchte ich mich bei allen Kollegen am Institut bedanken, die mir sowohl in fachlicher Diskussion als auch im privaten Gespräch gute Ratschläge lieferten.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. S. Alber, der als Hilfskraft, Diplomand und späterer Kollege tatkräftig, engagiert und äußerst zuverlässig bei der Durchführung und Datenaufbereitung der umfangreichen Wasserabfluss-Versuchsreihen beteiligt war. Ebenso Herrn Dipl.-Inform. R. Bächtle, der mir in der Anfangszeit des Projekts „Aquaplaning und Wasserfilmdicken“ bei Fragen zur Programmierung und beim Debugging hilfsbereit und kompetent zur Seite stand.

Herr Dr.-Ing. A. Färber (Leiter der Versuchsanstalt für Wasserbau, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart) hat für die Berechnungs- und Fließ-Versuche den Teststand konstruiert und die Supervision übernommen. Ihm gilt mein Dank für die reibungslose und unkomplizierte Abwicklung der Versuche und für die unverzichtbaren und stets bereitwilligen Ratschläge bei hydrodynamischen Fragen.

Für die besondere Geduld und Zeit, die ich während der Erstellung dieser Arbeit meiner Familie abverlangen musste, schulde ich meiner Frau Kerstin und meinen Kindern Noah Laurin und Kiara Lea großen Dank.

Ihnen möchte ich daher diese Arbeit widmen.



Stuttgart, März 2007

Steffen R. Herrmann

ERKLÄRUNG

Abgesehen von den ausdrücklich bezeichneten Hilfsmitteln bzw. Ratschlägen von jeweils namentlich aufgeführten Personen wurde die vorliegende Dissertation von mir selbständig verfasst.



Stuttgart, März 2007

Steffen R. Herrmann

ZUSAMMENFASSUNG

Die Verkehrssicherheit wird zu einem großen Teil durch die Beschaffenheit der Fahrbahn in Bezug auf Geometrie und Rauheit mitbestimmt. Vor allem beim Auftreten von Nässe erhöht sich das Unfallrisiko deutlich durch eine schlechtere Griffigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn. Fahrbahnunebenheiten, die durch Verkehr (Spurrinnen), Witterung (Frostschäden) oder durch Abweichungen bei der Fertigung entstehen können, beeinträchtigen den Abfluss des Regenwassers darüber hinaus. Wenn sich die Wasseroberfläche nahezu vollständig oberhalb der Rauspitzen der Fahrbahn befindet, kann es zum Aquaplaning, dem Aufschwimmen der Reifen auf einem geschlossenen Wasserfilm, kommen.

Besonders gefährlich ist das Befahren von sogenannten Verwindungsbereichen. Dies sind Streckenabschnitte, in denen sich der Straßenverlauf von einer Krümmungsrichtung (z.B. Rechtskurve) in die entgegengesetzte Richtung (z.B. Linkskurve) ändert. Gleichzeitig wechselt hiermit auch die Fahrbahnquerneigung, die aus fahrdynamischen Gründen im Regelfall stets zur Kurveninnenseite gerichtet sein sollte. Auf Grund dieses erforderlichen Querneigungswechsels verlängern sich die Fließwege des Wassers gegenüber der ansonsten anzutreffenden Situation und führen so zu deutlich höheren Wasserfilmdicken als in den übrigen Bereichen.

Der Länge des Querneigungsübergangs befindet sich zudem im Zielkonflikt zwischen Aquaplaning-Sicherheit und Fahrdynamik. Ein langgezogener Übergang ist fahrdynamisch vorteilhafter und gewährleistet hierdurch ein sicheres Befahren. Die Abflusswege sind jedoch länger und damit ist die Aquaplaning-Gefahr höher als bei einem kurzen Übergang.

Verstärkt wird die Situation in Verwindungsbereichen noch durch breite, drei- oder mehrstreifige Fahrbahnen, durch die die versiegelte Fläche und damit die Fließwege des Oberflächenwassers weiter erhöht werden. Geringe Längsneigungen oder gar ein Wannentiefpunkt in der Nähe eines Querneigungswechsels führen dazu, dass der Wasserabfluss langsamer stattfindet. Auch hierdurch werden die Wasserfilmdicken weiter vergrößert.

Nicht nur die beschriebenen Effekte aus Geometrie oder Topologie einer Fahrbahnoberfläche wirken sich auf den Wasserabfluss und das Aquaplaning-Verhalten aus, sondern auch die Fahrbahntextur. Sie beeinflusst - gleichwie die Neigung der Oberfläche - die Geschwindigkeit des abfließenden Wasserstroms, sie bestimmt die Größe der Drainagevolumina beim Wasserabfluss und sie steht als kurzfristiger Speicherraum zur Verfügung für das beim Überrollen durch Reifen aus der Reifenaufstandsfläche verdrängte Wasser. Alle beschriebenen Effekte wirken jeweils in unterschiedlicher Art und Weise und überlagern sich.

Für die Neuplanung und zur Kontrolle bestehender entwässerungskritischer Straßenabschnitte wurde das Rechenprogramm PLANUS zur Simulation und Modellierung des Wasserabflusses und des Aquaplaning-Verhaltens auf Fahrbahnoberflächen entwickelt. Das Programm rechnet mit diskretisierten Oberflächendaten. Sämtliche Informationen zur untersuchten Fahrbahn, wie Höhen, Textureigenschaften, Randbedingungen etc. liegen demnach als Punktwerte für ein Raumgitter vor, welches der im Modell simulierten Fahrbahnoberfläche entspricht. Damit sind die Berechnungen nicht nur auf parametrisierte,

d.h. aus Entwurfsparametern gerechneten Daten, wie z.B. aus Deckenbüchern, beschränkt, sondern können auch an raum- oder achsbezogenen Rasterdaten durchgeführt werden, die zuvor mittels geeigneter Messsysteme vor Ort aufgenommen wurden.

Um diese Rasterdaten einer Berechnung zugänglich zu machen, wurde das vom Verfasser im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Aquaplaning und Wasserfilmdicken – Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen; Berechnung der Wasserfilmdicke“ (FE 05.126/2001/AGB) entwickelte Simulationsmodell und Computerprogramm PLANUS im Funktionsumfang deutlich erweitert.

Die Anpassungsmaßnahmen ergaben sich aus der Vorgabe, dass sowohl Raum-Punkt-Modelle als auch achsbezogene Fahrbahnmodelle mit den in der Straßenplanung üblichen Datenaustauschformaten, den sogenannten Datenarten DA001, DA055, DA066, in das Programm eingelesen werden können und die Simulationsmodelle zum Wasserabfluss und Aquaplaning-Verhalten auf diese Daten anwendbar sein sollen.

Hierzu wurden Import- und Konvertierungsfiler für die genannten Datenformate im Programm implementiert. Für nicht-achsbezogene Daten wurde eine Achs-Einrechnungsroutine entwickelt. Die einzelnen Programmroutinen und Modelle wurden darüberhinaus an die Erfordernisse irregulärer Topologie angepasst.

Für weiterführende Untersuchungen wurde ein Texturmodell entwickelt. Das Texturmodell erlaubt es, die Auswirkungen verschiedener Fahrbahnbeläge in einem Bereich kombiniert zu betrachten. Dies ist von Bedeutung, da oftmals auch auf kleineren Streckenabschnitten mehrere verschiedene Fahrbahnbeläge zum Einsatz kommen. Mit dem Texturmodell ist es möglich, auch die Auswirkungen von Verbesserungen des Fahrbahnbelags, z.B. durch Aufrauen der Oberfläche oder durch Rillenfräsen (Grooving), zu simulieren.

Eine neue Funktion des Modells ist ein Algorithmus zur Berechnung von Querprofilen aus beliebigen Fahrbahn-Raumgittermodellen. Hieraus können zu bestehenden und messtechnisch aufgenommenen Fahrbahnoberflächen im Nachhinein die im Entwurf verwendeten Trassierungsparameter wie Längs- und Querneigungen ermittelt und so die Position von Verwindungsbereichen bzw. Querneigungswechseln lokalisiert werden.

Eine wichtige Funktion des Programms besteht darin, aus vorgegebenen Entwurfsparametern ein entsprechendes Fahrbahn-Raummodell generieren zu können, auf dessen Oberfläche dann die Modellsimulation stattfindet. Hierbei können beliebige Trassierungssituationen nachgebildet werden, insbesondere jedoch die für die Fragestellung besonders wichtigen Verwindungsbereiche mit Querneigungswechseln, genauso wie Kuppen- bzw. Wannenausrundungen oder auch Kombinationen aus unterschiedlichen Elementen.

Eine Sonderform der Verwindung ist die Schrägverwindung, die in der Praxis selten ausgeführt wird, da sie schwierig herzustellen ist und fahrdynamische Nachteile hat. Ein Vorteil sind jedoch ihre entwässerungstechnischen Eigenschaften. Der Raummodell-Generator und das Simulationsmodell von PLANUS wurde daher um die Berücksichtigung von Schrägverwindungen erweitert.

Die Funktionen des erweiterten Simulationsmodells und des Computerprogramms PLANUS wurden an einem vor Ort mit Laservermessung im 15-cm-Raster aufgenommenen, 1 km

langen Autobahn-Streckenabschnitt aufgezeigt. Hierbei handelt es sich um den Abschnitt „km 171+000 bis 170+000“ auf der BAB A 8 (Stuttgart – München), der einen Verwindungsbereich, geringe Längsneigungen und eine Wannenausrundung enthält. In dem genannten Abschnitt sind zudem 6 Teilabschnitte mit verschiedenartigen Fahrbahnbelägen vorzufinden.

Anhand der Rasterdaten wurde mit PLANUS eine vollständige Untersuchung von Oberflächenabfluss und Aquaplaning-Verhalten vorgenommen und mögliche Lösungen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit aufgezeigt.

Die untersuchten Lösungsvorschläge waren im Einzelnen:

1. Vorgabe einer maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit, mit der der Abschnitt noch sicher befahrbar ist.
2. Einbau von Entwässerungsrinnen in die Fahrbahn.
3. Einfräsen von Rillen in den Fahrbahnbelag (Grooving).
4. Änderung der Entwurfparameter, Anpassen des Querneigungsbands an heutige Entwurfsstandards (geteilte Verwindung).

Sämtliche Modellrechnungen wurden mit den 4 Regenhäufigkeiten $n = 0,2$; $n = 1$; $n = 5$ und $n = 10$, teilweise auch mit $n = 0,05$ und $n = 20$ durchgeführt. Basierend auf den verwendeten Betrachtungs- und Bewertungsansätzen zeigte sich beispielsweise, dass für die Regenhäufigkeit $n = 1$ je nach angewandter Maßnahme ein Sicherheitsgewinn von 10-20 km/h bei der noch als sicher einzustufenden Fahrgeschwindigkeit zu erzielen ist.

Zur Bewertung der untersuchten Maßnahmen wurden diverse Indikatoren entwickelt, über die die Effektivität einer Maßnahme aus Vorher- und Nachher-Vergleichen quantitativ angegeben werden kann. Die verwendeten Indikatoren basieren auf den gewichteten Summendifferenzen der abgeminderten Punktwerte (Abminderungsleistungen) aller Punkte eines frei definierbaren, bei der Bewertung zu berücksichtigenden Bereichs.

Die Lösungsvarianten der Gruppe „Änderung der Entwurfparameter“ stellten sich als die effektivste Maßnahmengruppe heraus. Unter ihnen wiederum konnte die *Schrägverwindung* die höchste Effektivität erzielen. Mit ihr kann eine günstigere Situation bezüglich Aquaplaning erreicht werden, als sie auf „normaler Strecke“ mit konstanter Schrägneigung vorhanden ist. Die fahrdynamischen Nachteile dieses Verwindungstyps mindern den Sicherheitsgewinn allerdings wieder ab. Die *negative*, d.h. die zur Kurvenaußenseite gerichtete *Querneigung* erwies sich ebenfalls als äußerst wirksam. Auch hier müssen wiederum fahrdynamische Nachteile in Kauf genommen werden.

Neben diesen beiden, fahrdynamisch kritischen Lösungen wurden auch *geteilte Verwindungen* untersucht. Die mit einem zentrischen Verwindungsbereich von 50 m Länge, als Standardfall nach der Entwurfsrichtlinie RAS-L (FGSV, 1995) modellierte Verwindung schnitt dabei schlechter ab als eine Variante mit einem auf 25 m gekürzten zentrischen Verwindungsbereich. Letzere hat jedoch ebenfalls negative fahrdynamische Eigenschaften. Beide Varianten blieben in der Bewertung hinter den zuvor genannten Lösungen zurück.

Eine Verschiebung der Gradientenlage im Querschnitt hatte quasi keine Auswirkungen auf den Aquaplaning-Effekt. Eine Veränderung der Längsneigung um + 1,8% bzw. um - 1,8% gegenüber der ursprünglichen Längsneigung von + 2,8% hatte ebenfalls nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Abminderungseffektivität.

Eine zwar großflächige Wirkung, aber in der Ausprägung deutlich niedriger als bei den entwurfstechnischen Maßnahmen kann mit *Grooving*, dem Fräsen von Rillen in den Fahrbahnbelag, erreicht werden. Da der untersuchte Streckenabschnitt bereits mit Grooving versehen war, wurden zuerst die Auswirkungen dieser Maßnahme, im Vergleich zu einem hypothetischen Fall ohne Grooving in diesem Bereich, untersucht. In einem weiteren Schritt wurden optimierte Grooving-Muster vorgeschlagen und analysiert. Für die beiden untersuchten Muster wurde die effektive Länge zur Anwendung der Grooving-Maßnahme optimiert, d.h. es wurde der genaue Abschnitt ermittelt, auf dem Grooving erforderlich ist, um die unkritischen Wasserfilmdicken des umgebenden Fahrbahnbereichs zu erreichen,

Es zeigte sich anhand der für die Schlussbewertungen zu Grunde gelegten Regenhäufigkeit $n = 1$, dass die Grooving-Maßnahmen geringere Effektivitätsbewertungen erzielen können als die zuvor genannten entwurfstechnischen Maßnahmen. Bei weniger starken Regenereignissen ($n = 5$ bzw. $n = 10$) sind für das Grooving bei der Effektivitätsbewertung deutlichere Verbesserungen bei den minimalen Aquaplaning-Geschwindigkeiten um ca. 10 bis 25 km/h zu festzustellen. Daraus lässt sich schließen, dass das Potenzial von Grooving durch die schneller ausgeschöpften Aufnahmekapazitäten der Rillen bei starken Regenereignissen, die 1-mal pro Jahr oder seltener eintreten, weniger hoch ist. Gleichzeitig ist aber eine deutliche Wirksamkeit bei schwächeren, 5- bis 10-mal pro Jahr eintretenden Ereignissen vorhanden. Da aber auch solche Regenfälle bereits kritisch in Bezug auf Aquaplaning sind, stellt Grooving eine gut geeignete ad hoc- bzw. Komplementärmaßnahme dar.

Weiterhin wurden Entwässerungsrinnen quer zur Fahrbahnlängsachse (Querrinnen) und Schrägrinnen mit verschiedenen Ausrichtungswinkeln untersucht. Diese kastenartigen, monolithischen Rinnen wirken meist in einem sehr kleinräumigen Umfeld. Auf Grund ihrer Fähigkeit, das zufließende Wasser fast ausnahmslos aufnehmen zu können, sind die Abminderungsgewinne im direkten Umfeld der Rinne sehr hoch. Damit sind Entwässerungsrinnen in der Fahrbahn geeignet, um vor allem im Sanierungsfall in einem nicht weit ausgedehnten kritischen Bereich, wie z.B. in den entwässerungskritischen Stellen der Verwindungsbereiche, eine deutliche Verbesserung der Situation zu erreichen. Trotz der direkten Drainage des Wasserabfluss von der Fahrbahnoberfläche konnten die Entwässerungsrinnen nicht den Grad der Abminderungsleistungen erreichen, die mit Änderungen am Querneigungsband einhergehen, Da letzter stets großflächiger ausgerichtet sind. Um eine ähnlich großflächige Wirkung mit Rinnen zu erzielen, müssten in sehr dichten Abständen (ca. 10-15 m) über einen relativ langen Streckenabschnitt von 150 - 200 m Rinnen gesetzt werden, was einen immens hohen Aufwand bedeuten würde. Da aber Entwässerungsrinnen punktuell sehr effektive Wirkungen erreichen, ist diese Maßnahme als sehr vorteilhaft einzustufen, vorausgesetzt der Einbau der Rinnen erfolgt an der richtigen Position. Diese Position maximaler Wirkung einer oder mehrerer Rinnen kann mit Hilfe des entwickelten Programms, insbesondere mit der Routine zur automatischen Optimierung der Rinneneinbauposition, gefunden werden.

Die Testläufe zur Rinnenoptimierung mit verschiedenen Konfigurationen zeigten, dass der Nutzen bzw. die Effektivität der ersten Rinne am höchsten ist. Der Effektivitätszuwachs nimmt danach mit jeder zusätzlichen Rinne ab. Die deutlich besten Leistungen - auf die Rinnenlänge bezogen - ergaben sich bei den Querrinnen, weshalb nur diese Rinnenausrichtung für den Einbau empfohlen werden kann und auch in der vorliegenden Arbeit detaillierter untersucht wurde. Bei Schrägrinnen dürften noch, weit über die höhere Rinnenlänge hinaus, fertigungstechnische Schwierigkeiten oder fahrdynamische Probleme mit der Überfahrbarkeit durch Zweiräder zu erwarten sein.

Für den untersuchten Verwindungsbereich wurden die Positionen für maximal sechs gleichzeitige Rinnen optimiert. Zusätzlich wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Längsneigungen untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Positionierung keinem eindeutigen Schema entspricht, aus welchem direkte Empfehlungen für die Planung ableitbar und verallgemeinerbar wären. Vielmehr schienen die Positionen der Rinnen zufällig verteilt zu sein. Dennoch wurden bestimmte Gesetzmäßigkeiten bei der automatischen Positionierung der Rinnen gefunden. Diese waren:

- a) die erste Rinne wird relativ dicht am Querneigungswechsel gesetzt, jedoch geringfügig in Richtung der Gradientensteigung versetzt,
- b) die folgenden, weiteren Rinnen werden stets alternierend um den Querneigungswechsel herum positioniert,
- c) die Summe der Abstände vom Querneigungswechsel nimmt mit zunehmender Rinnenanzahl zu.

Anhand der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, welche diversen Auswertungs- und Analyse-möglichkeiten das vom Autor entwickelte Computerprogramm PLANUS bei der Optimierung von Straßen in Bezug auf den Aquaplaning-Effekt zur Verfügung stellt. Gleichwohl ist die straßenseitige Optimierung nur einer der möglichen Ansatzpunkte zur Verbesserung der Fahrsicherheit bei Nässe. In der Schlussbetrachtung wird skizziert, welche deutlichen Sicherheitspotenziale darüber hinaus durch andere Maßnahmen, z.B. durch höhere Reifenprofiliefen aktiviert werden könnten.

ABSTRACT

Generally, the driving safety is mainly influenced by the conditions of the road (concerning roadway geometry and pavement texture). Predominantly in cases of occurring wetness, the risk of hazard is remarkably increased due to a lack of wet traction between tire and pavement.

Pavement unevenness, which may be caused by traffic (rutting), weather factors (frost heaves) or already during construction, is responsible to obstruct the rainwater runoff considerably.

If the pavement asperities are completely below the water surface, a separation of the vehicle's tires from the pavement surface may occur (hydroplaning).

Passing over on transition curves is particularly critical because the slope of the flow path becomes critically low due to the necessary cross slope change.

The drainage problems of transition curves are further increased, e.g. by wide, multi-laned (3 or more) roadways, by interference with low grades or with a vertical sag curve bottom low point in proximity to the cross slope change, by long cross slope transitions, or by pavement unevennesses as mentioned above.

Finally, the velocity of the surface sheet flow is determined by the pavement texture, as well as the drainage space during runoff and the efficiency of the pavement as a temporary storage space for the water being displaced by the tire.

Intended to be used by highway engineers for the geometric design process of new roads just as for the assessment of existing roads, a software application, coined PLANUS, was developed by the author. It will calculate the water runoff and hydroplaning performances on pavements by the use of discretized surface data (altitude, texture properties, boundary conditions etc.) Hence, calculations are not only confined to parameterized data (calculated from design parameters), but also measured data of road topologies may be calculated (either volumetric referenced, e.g. DA001 data type, or road axis referenced, e.g. DA055/DA066 data types).

In order to allow these calculations, the previously developed model and computer program (research and development project "Hydroplaning and Water Film Thicknesses – Hydroplaning and Driving Safety in Roadway Curve Transitions on Wide Pavements; Calculation of the Water Film Thickness. (FE 05.126/2001/AGB) (RESSEL/HERRMANN, 2006A), by order of the BAST, acting on behalf of the BMVBW¹", had to be extended.

The adaptive measures resulted from the given task to make volume or axis referenced topology data importable and the water surface flow and hydroplaning models applicable.

¹ BAST = German Federal Highway Administration,
BMVBW = German Federal Ministry of Transport, Building and Housing

For that purpose import- and conversion-filters had to be implemented. An axis-fit-in-routine was developed for non-axis-referenced data. Several program routines had to be adapted. A texture model was implemented in order to allow detailed texture- and grooving-analyses. Not only to get a more extensive impression of the surface topology, but mainly to back-calculate design parameters by discretized volumetric data, a cross section-generating algorithm was developed.

The parameterizing-editor has been extended for the use of sloping transition (“moving ridge”) - curves.

The new features have been exemplarily applied and analyzed with the surface topology data of a 1 km road section, including a transition curve (autobahn A8, Stuttgart – Munich, operation-km 171+000 to 170+000). The topology was recorded by a laser measurement device, MOSES, in 15 cm grid space. A complete study of the surface water flow and hydroplaning-performances of that stretch of road has been conducted. A set of proposed solutions for the improvement of the driving safety was acquired and evaluated.

In particular, the proposed solutions were 1. determination and establishing of a maximum allowed driving speed, 2. installation of slotted drains, 3. grooving measures, 4. modification of the cross slope properties resp. the design parameters in general.

All model calculations have been based upon rainfall frequencies of $n = 0.2$, $n = 1$, $n = 5$ and $n = 10$ (in some cases at that $n = 0.05$ and $n = 20$). In the case of $n = 1$ it had be shown that it was possible to increase driving safety in terms of a higher hydroplaning speed of some 10 - 20 km/h. (based on varied “critical point”-considerations). Moreover, the effective performance of the different measures has been analyzed and specified by indicators, by valuating the weight differences of sums of the reduced point values (reduction performance) between base case and a specific planning case.

Generally, the suggested solutions of the type “modification of the cross slope properties” appeared to be the most effectives of them all. Among them, the sloping transition curve would achieve the highest performance. By its use, hydroplaning speed may reach better values than in cases with standard geometric alignments (with constant transversal slopes). Then again, the disadvantages in driving dynamics of this transition type must be taken into consideration. Negative cross slopes (against the direction of the horizontal curve) caused very high ratings too. But in the same way, weak points in driving dynamics come along with this type. Disregarding types with high negative side effects, the separated transition curve with a centric transition area of 50 m length (standard type according to the guidelines RAS-L (FGSV 1995) produced the highest performance results. A seperated transition with a shortened centric transition area of 25 m length performed even better. But likewise, negative effects on driving dynamics would have to be considered. A shifting of the gradient position in the cross section had virtually no effects on hydroplaning. Interestingly, as not to be expected, a variation of the gradient slope seemed to have relatively low effects too.

Taking a rainfall frequency of $n = 1$ as a basis, it emerged that grooving measures seem to have no appreciable implications on the performance examinations. However, in contrast to a hypothetic ungrooved alternative, improvements in hydroplaning speeds of some 10 km/h are attainable. In cases of less heavier rainfall events ($n = 5$ or $n = 10$ for instance), grooving

measures caused equally remarkable improvements in performance ratings and hydroplaning speeds of some 10 – 25 km/h.

Slotted drains usually influence a relative confined watershed area. On grounds of their immense efficiency of water absorption, the sums of their performance criterions are obviously high, though. Therefore slotted drains are regardable as appropriate means to improve the surface drainage of pavements in the case of elimination of drainage weak points, in particular on transition curves. Although their overall efficiency is lower as for the “modification of the cross slope properties”-types, their use is to be recommended as their efficiency does not spread but is well-aimed to the intended specific area.

The effectivity resp. the returns of the first drain set caused the highest values. After this, the increment of effectivity weakened down with each additional drain. While drains with rectangular orientations and various transversal orientations to the roadway axis have been analyzed, it was evident that rectangular drains achieved the best performances, related to their particular length. To that, transversal drains are expected to generate a much higher level of costs and manufacture than the mere length of the drain as an indicator would impute.

In the matter of the analyzed transition section, the positions of a maximum number of 6 simultaneously set drains were optimized. In addition, the impacts of different longitudinal slopes were analyzed. However, the automatically chosen drain positions did not seem to follow any logical scheme. At first sight they appeared to be randomly distributed. Nonetheless, some conformities crystallized. They were: a) the first drain was set relatively close to the position of the cross slope changeover, but slightly shifted in the direction of the longitudinal slope; b) the additional drains alternated around the cross slope changeover; c) the sum of the absolute distances from the cross slope changeover increases with each additional drain.

By the report at hand, the potentials in analysis and examination of water film thickness and hydroplaning speed distributions by means of the software application PLANUS have been demonstrated. Nonetheless, the roadside optimization is just one of the possible starting points to improve driving safety. In the summary of this report, it is outlined by which other means as those evaluated in this case, higher tire profile depths for instance, further remarkable safety potentials would be activatable.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung.....	1
1.1	Das Problem Aquaplaning und Verkehrssicherheit.....	1
1.2	Historischer Abriss.....	3
1.3	Ziele und Schwerpunkte der Arbeit.....	4
1.3.1	Verknüpfung von Wasserfilmdickenverteilungen und Aquaplaning.....	5
1.3.2	Entwicklung eines Softwareprogramms mit Optimierungsstrategien bzw. Lösungsassistentz.....	5
1.3.3	Berechnungsmöglichkeit für vorhandene Oberflächendaten.....	6
1.4	Vorgehensweise	6
2	Grundlagen	10
2.1	Verwendetes Simulationsverfahren	10
2.1.1	Grundprinzip.....	10
2.1.2	Umsetzung	11
2.2	Datengrundlage	12
2.2.1	Basis und Format	12
2.2.2	Spezifika des Streckenabschnitts.....	13
3	Simulationsmodell	20
3.1	Wasserfilmdicken-Modell.....	20
3.1.1	Hydrologie.....	20
3.1.2	Wasserfilmdicken	21
3.1.3	Oberflächenabfluss	23
3.1.4	Hydrodynamische Grundlagen.....	24
3.1.5	Eindimensionale Flussmodellierung.....	28
3.2	Aquaplaning-Modell.....	29
3.2.1	Grundlagen	29
3.2.2	3-Zonen-Theorie	30
3.2.3	Staudruckmodelle.....	31
3.2.4	Aquaplaning-Modell nach GENGEBACH und HÖCKER.....	32

3.2.5	Aquaplaning-Modell nach GALLAWAY ET AL.....	33
3.2.6	Modellbildung.....	35
3.2.7	Theoretische Herleitung.....	39
3.3	Modellumsetzung - Software-Applikation „PLANUS“	48
3.3.1	Simulation	49
3.3.2	Parametrisierung	50
3.3.3	Topologie Importfilter	54
3.3.4	Falllinien generieren.....	54
3.3.5	Interpolationsalgorithmus.....	65
3.3.6	Rinnenoptimierung.....	68
3.4	Modell-Erweiterung	73
3.4.1	Import und Transformation der MOSES-(ungerichtete DA001)-Daten.....	75
3.4.2	Import und Diskretisierung von Achsdaten (DA055, DA066)	77
3.4.3	Anpassung der Falllinien-Routine an die irreguläre Topologie.....	79
3.4.4	Geometrische Ermittlung der Falllinien-Verläufe.....	82
3.4.5	Anpassung der Rinneniteration an die irreguläre Topologie	83
3.4.6	Einführung eines Texturmodells	84
3.4.7	Grooving betrachtet als eingeprägte Makrotextur	86
4	Modellierungsergebnisse	88
4.1	Annahmen	88
4.2	Analyse des Abschnitts im Ist-Zustand (Ohne-Fall).....	89
4.3	Lösungsvorschlag 1: Vorgabe einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit.....	92
4.3.1	Unterste Aquaplaning-Geschwindigkeit und Aggregation (quantitativ und räumlich).....	93
4.3.2	Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren / Imponderabilität	94
4.3.3	Zusammenfassung	99
4.4	Lösungsvorschlag 2: Einbau von Entwässerungsrinnen	100
4.4.1	Auswahl eines Bewertungsverfahrens	100
4.4.2	Rinnenoptimierung.....	112

4.5	Lösungsvorschlag 3: Grooving	114
4.5.1	Effektivität des vorhandenen Grooving-Bereichs	114
4.5.2	Optimierung Grooving-Bereich	117
4.5.3	Optimierung Grooving-Pattern	121
4.5.4	Zusammenfassung	122
4.6	Lösungsvorschlag 4: Änderung des Querneigungsbands	123
4.6.1	Ohne-Fall	124
4.6.2	Alternative 1: Geteilte Verwindung	126
4.6.3	Alternative 2: Schrägverwindung	130
4.6.4	Alternative 3: Veränderte Gradientenlage im Querschnitt	131
4.6.5	Alternative 4: Kombination „Veränderte Gradientenlage“ und „geteilte Verwindung (zVWB = 50m)“	133
4.6.6	Alternative 5: Einseitige Querneigung zur Kurvenaußenseite	133
4.6.7	Weitere mögliche trassierungstechnische Maßnahmen	134
4.6.8	Zusammenfassung der Lösungsvarianten „Änderung des Querneigungsbands“	136
4.7	Zusammenfassung und Vergleich aller vier Lösungsvorschläge	139
5	Kritische Würdigung und Ausblick	147
6	Glossar	151
7	Literatur	154
	Verwendete Abkürzungen	158

ABBILDUNGEN

Abbildung 1-1: Verteilung von Streckenanteilen, Gesamtunfällen, Unfälle bei Nässe (Fahrbahnzustand nass/feucht) und Fahrnunfälle (Unfalltyp 1) bei Nässe der Jahre 2001/2002 auf der BAB A9 (km 244+2 bis km 521+1, Fahrtrichtung rechts); n = 2.770 Streckenabschnitt à 100 m Länge	2
Abbildung 1-2: Startbildschirm von PLANUS	7
Abbildung 2-1: 1-dimensionales Modellierungskonzept – Prinzip und Versuchsumsetzung	10
Abbildung 2-2: Beispiel einer Falllinien-Schar in einem Verwindungsbereich	11
Abbildung 2-3: Beispiel für die Datenstruktur einer DA001-Datei.....	13
Abbildung 2-4: Aus Messungen vor Ort ermitteltes Rillenmuster auf der A8 (km 170+360,3 bis km 170+183,3; Längsrillen).....	14
Abbildung 2-5: Planus-Texturmodell / oben: Eingaben für den Verwindungsbereich BAB A8 (km171-km170) / unten: fertig gerechnetes Texturmodell	15
Abbildung 2-6: Gradiente BAB A8 (km 171 – km 170) und „Lageplan“-Darstellung.....	16
Abbildung 2-7: Längsneigungen BAB A8 (km171-km170).....	17
Abbildung 2-8: Beispiel für ein durch PLANUS generiertes Querprofil. Hier: QP 10 bei km 170+910,63, QP 46 (170+550,66), QP 94 (km 170+073,60)(jeweils aus rechtem und linkem Fahrbahnrand gemittelte Positionen). Schnittrichtung modellbedingt entgegen Fahrtrichtung (B-A)	17
Abbildung 2-9: Querneigungen BAB A 8 (km 171+000 bis km 170+000)	19
Abbildung 3-1: Phasen des Oberflächenabflusses; Simulierter Hydrograph (RESSEL, HERRMANN, 2006B).....	21
Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen Nässe und Rauheit von Fahrbahnoberflächen (schematisch) (HÖCKER, 1971).....	22
Abbildung 3-3: Zusammenhang zwischen bezogener und rechnerischer Wasserfilmdicke (Wasserhöhe)	23
Abbildung 3-4: Modellvorstellungen zur Erklärung des Aquaplaning. Oben: Ermittlung der Aquaplaning-Geschwindigkeit aus Reibwert- und Schlupfgradmessungen; Mitte: Wasserkeil-Konzept; Unten: 3-Zonen-Theorie	30
Abbildung 3-5: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke, nach GALLAWAY ET AL. AGRAWAL ET AL. und REED ET AL.	34
Abbildung 3-6: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke Einfluss der Reifenprofiltiefe, nach GALLAWAY ET AL. AGRAWAL ET AL. und REED ET AL.	35

Abbildung 3-7: Aquaplaning-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke und der Reifenprofiltiefe (Zusammenstellung unterschiedlicher Untersuchungen)	37
Abbildung 3-8: Aquaplaning-Modell nach GENGENBACH und HÖCKER im Vergleich mit agglomerierten Testauswertungen.....	38
Abbildung 3-9: Aquaplaning-Modell nach GALLAWAY ET AL. und REED ET AL. im Vergleich mit agglomerierten Testauswertungen.....	39
Abbildung 3-10: Steigungen der Geradenschar im Blockierreibungs-Wasserfilmdicken-Diagramm	40
Abbildung 3-11: Blockierreibwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Wasserfilmdicke	41
Abbildung 3-12: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke für unterschiedliche Blockierreibwerte.....	42
Abbildung 3-13: Modellansatz „Exponenten-Modell“ zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wasserfilmdicke und Aquaplaning-Geschwindigkeit; $a = \text{const}$, $b = \text{var}$	43
Abbildung 3-14: Modellansatz „Exponenten-Modell“ zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wasserfilmdicke und Aquaplaning-Geschwindigkeit; $b = \text{const}$, $a = \text{var}$	44
Abbildung 3-15: Aquaplaning-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Reifenprofiltiefe (Qualitative Gegenüberstellung von Erhebungen mit dem S-Kurven Modell)	45
Abbildung 3-16: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Reifenprofiltiefe (Ansätze nach Gengenbach und Höcker).....	46
Abbildung 3-17: Hilfsfunktionen zur Kalibrierung des S-Kurven-Modells.....	48
Abbildung 3-18: Falllinien-Routensuche; Startpunkt und Gradientensuchbereich	56
Abbildung 3-19: Winkeldifferenzen für unterschiedliche Richtungssuchbereiche	57
Abbildung 3-20: maximal wählbare Schrittweiten für unterschiedliche Richtungssuchbereiche und Rasterdichten.....	58
Abbildung 3-21: Richtungssuche-Algorithmus Kenngrößen für BAB A8 (km 171-170); Summenhäufigkeiten Winkelabweichungen und Schrittweiten	58
Abbildung 3-22: Vergrößertes Bild einer Falllinien-Verteilung	59
Abbildung 3-23: Vektor-Raster-Konvertierung mit dem BRESENHAM-Algorithmus.....	59
Abbildung 3-24: Grundschemata Evaluierung der Abweichungen bei der Falllinien-Richtungssuche	60

Abbildung 3-25: Grundschemata Evaluierung der Abweichungen bei der Falllinien-Richtungssuche	61
Abbildung 3-26: Längsschnitt, Winkelabweichungen und Sohlneigungsverlauf einer Falllinie	62
Abbildung 3-27: Berechnung der Wasserfilmdicke für eine Verwindung mit Querneigungswechsel (HÖCKER, 1971a)	63
Abbildung 3-28: Ermittlung der fiktiven Fließquerschnittsbreite – schematisch.....	64
Abbildung 3-29: Berechnung der fiktiven Fließquerschnittsbreiten zwischen benachbarten Falllinien (I)	64
Abbildung 3-30: Berechnung der fiktiven Fließquerschnittsbreiten zwischen benachbarten Falllinien (II)	65
Abbildung 3-31: Schritt 1 (linke Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 1$, I enthält noch keine Falllinien; Schritt 2 (rechte Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 2$, I enthält noch keine Falllinien	68
Abbildung 3-32: Schritt 3 (linke Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 3$, I enthält eine Falllinie mit einem Repräsentanten; Schritt 4 (rechte Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 4$, I enthält die zweite Falllinie mit zwei Repräsentanten	68
Abbildung 3-33: Querrinnen über die Fahrbahnbreite mit Falllinien und Einzugsgebieten. Oben: Standard-Streckenabschnitt ($q = \text{const.}$, $s = \text{const.}$), unten: Verwindungsbereich mit $s = 0\%$	69
Abbildung 3-34 ACO-Drain Querrinne. Prinzipskizze für den Einbau in Asphalt (ACO PASSAVANT, 2003)	70
Abbildung 3-35: Detail Einlaufquerschnitt ACO-Drain RD 200 D (ACO PASSAVANT, 2003)	70
Abbildung 3-36: Abminderung des 1-dimensionalen Wasserabflusses beim Überqueren einer Entwässerungsrinne (Beispiel: Falllinie 794 im Ohne-Fall und Querrinne bei km 170+257,96)	71
Abbildung 3-37: Überlagerte Formabweichungen unterschiedlicher Ordnung [DIN 4760]	74
Abbildung 3-38: Beispiel für die als (unkoordinierte) Punktwolke vorliegenden Fahrbahntopologie-Daten (räumlich fixiert im GAUSS-KRÜGER-System); 2 „Ausreißer“ (abseits gelegene Punkte) sind im Datensatz enthalten.	75
Abbildung 3-39: Modellierungsbereich mit den 4 Eckpunkten und Randabgrenzung	75
Abbildung 3-40: Illustration des Transformationsalgorithmus $GKS \rightarrow ORS$	76
Abbildung 3-41: Abgrenzung des Innenbereichs (grau schattierte Zellen) im gesamten Modellierungsbereich.....	76
Abbildung 3-42: Grundaufbau achsbezogener Datenarten	78

Abbildung 3-43:	4-Phasen-System zur Umrandung des Fahrbahnbereichs.....	80
Abbildung 3-44:	Lokalisieren von Randzellen.....	81
Abbildung 3-45:	Routensuche entlang Randbereich	82
Abbildung 3-46:	Diskretisierung der Rinnenausrichtung für irreguläre Topografien.....	83
Abbildung 3-47:	Diskretisierung von Entwässerungsrinnen.....	84
Abbildung 3-48:	Profilschnitt bei natürlicher und künstlicher (Grooving) Makrotextur; nicht maßstäblich	86
Abbildung 3-49:	Grooving - Terminologie	86
Abbildung 4-1:	Rückgerechneter Höhenplan, Topologie-, Textur-, Wasserfilmdicken- und Aquaplaning-Geschwindigkeiten-Darstellung (für $t = 1,60$ mm und Regenhäufigkeit $n = 1$); unten: Detailausschnitt für $t = 1,60$ mm; $n = 1$ (ca. B-km 170+350 bis 170+150).....	90
Abbildung 4-2:	Aquaplaning-Geschwindigkeiten- Verteilungen (Detailausschnitte für $t = 1,60$ mm; $n = 1$). Oben: normaler Streckenabschnitt von ca. B-km 170+550 bis 170+350; Mitte: Verwindungsbereich (ca. B-km 170+350 bis 170+150); Unten: normaler Streckenabschnitt von ca. B-km 170+150 bis 170+000	91
Abbildung 4-3:	Auswertung Grenzwertdarstellungen „Ohnefall“	93
Abbildung 4-4:	Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren (Reifen-Rollspuren), Regenhäufigkeit $n=0,2$; Fahrzeug Radstandbreite: 1,65m	96
Abbildung 4-5:	Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren (Reifen-Rollspuren), Regenhäufigkeit $n = 1$; Fahrzeug Radstandbreite: 1,65m	97
Abbildung 4-6:	Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren (Reifen-Rollspuren), Regenhäufigkeit $n = 0,05$; Fahrzeug Radstandbreite: 1,65m	97
Abbildung 4-7:	Imponderabilität für $V_n = 130$ km/h ; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mind.-Aquaplaning-Geschw.....	98
Abbildung 4-8:	Imponderabilität für $V_n = 100$ km/h ; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mind.-Aquaplaning-Geschw.....	99
Abbildung 4-9:	Optimierungslauf mit Querrinnen (90°z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: ΔV_i^2 ; Verlauf der Bewertungsgrößen B (für $\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, $\sum \Delta WFD_i^0$, max. WFD)	101
Abbildung 4-10:	Sukzessive Rinnenanordnung mit Querrinnen (90°z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: ΔV_i^2	102
Abbildung 4-11:	Verlauf Bewertungsgröße „Leistungsfähigkeit“, Bewertungsmerkmal: ΔV_i^2	103
Abbildung 4-12:	Optimierungslauf mit Querrinnen (90°z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: $\sum \Delta V_i^1$; Verlauf der Bewertungsgrößen B (für $\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, $\sum \Delta WFD_i^0$, max. WFD)	104

Abbildung 4-13: Sukzessive Rinnenanordnung mit Querrinnen (90°z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: $\sum \Delta w_i^1$	105
Abbildung 4-14: Verlauf Bewertungsgröße „Leistungsfähigkeit“, Bewertung: $\sum \Delta V_i^1$	105
Abbildung 4-15: Optimierungslauf mit Querrinnen (90°z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: maxWFD; Verlauf der Bewertungsgrößen B (für $\sum \Delta w_i^2$, $\sum \Delta w_i^1$, $\sum \Delta w_i^0$, max. WFD).....	106
Abbildung 4-16: Sukzessive Rinnenanordnung mit Querrinnen (90°z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: mWFD	107
Abbildung 4-17: Verlauf Bewertungsgröße „Leistungsfähigkeit“, Bewertungsmerkmal: mWFD	108
Abbildung 4-18: Relativabstände der Querrinnen; Vergleich der Rinnenpositionen von drei Bewertungsverfahren ($\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, mWFD)	109
Abbildung 4-19: Relativabstände (bearbeitet) der Querrinnen; Vergleich der Rinnenpositionen von drei Bewertungungsverfahren ($\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, mWFD).....	109
Abbildung 4-20: Verteilung der Rinnenpositionen in Abhängigkeit der Längsneigung s ...	110
Abbildung 4-21: Summen der Absolutabstände vom Querneigungswechsel in Abhängigkeit der Längsneigung s und der Durchlauf-ID	111
Abbildung 4-22: Summen der Abstände vom Querneigungswechsel in Abhängigkeit der Längsneigung s und der Durchlauf-ID	112
Abbildung 4-23: Texturmodell, Wasserfilmdicken und Aquaplaning-Geschwindigkeiten (für t = 1,60mm); n=0,2; jeweils für Ohne-Fall (oben) und hypothetischer Ohne-Fall (ohne Grooving) (unten).....	115
Abbildung 4-24: V_{aq} - Radspuren (für t = 1,60mm); n=0,2; jeweils für Ohne-Fall (1), hypothetischer Ohne-Fall (ohne Grooving) (2), Grooving 10/10/30 (3) und Ohne-Fall mit veränderten Grenzen (4)	116
Abbildung 4-25: Höhenplan, Querneigungsband BAB A8 (km 171-170); mit Texturmodellen 1-5	118
Abbildung 4-26: Höhenplan, Querneigungsband BAB A8 (km 171-170); mit Texturmodellen 1-4	119
Abbildung 4-27: Effektivität von Grooving-Maßnahmen; unterste Radspur-Werte der Aquaplaning-Geschwindigkeit für Ohne-Fall (Grooving 7/7/31, hypothetischer Ohne-Fall (kein Grooving), Grooving 10/10/30	122
Abbildung 4-28: modifizierter Fahrbahnquerschnitt RQ35,5* für Untersuchungsabschnitt BAB A8 [Ausgabe PLANUS Parametrisierung-Editor].....	124
Abbildung 4-29: Qualitative Gegenüberstellung der Wasserfilmdickenverteilungen von raumbezogenen und parametrisierten Modellierungsbereich-Oberflächen	125

Abbildung 4-30: Höchste Wasserfilmdicken in einem Standard-Verwindungsbereich in Abhängigkeit von der Mindestquerneigung (links) und von der Mindestanrampungsneigung (rechts)	127
Abbildung 4-31: Querneigungsbänder von Ohne-Fall und Alternative 1.1 (geteilte Verwindung mit $\min \Delta s = 0,10 \cdot a$)	128
Abbildung 4-32: Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Fahrspuren, $t = 1,60$ mm) für $n = 1$, geteilte Verwindung (links: Alternative 1.1; rechts: Ohne-Fall).....	128
Abbildung 4-33: Querneigungsbänder von Ohne-Fall und Alternative 1.2 (geteilte Verwindung mit $\min \Delta s = 0,20 \cdot a$)	129
Abbildung 4-34: Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Fahrspuren, $t = 1,60$ mm) für $n = 1$, geteilte Verwindung (links: Alternative 1.1; rechts: Alternative 1.2) .	130
Abbildung 4-35: Querneigungsbänder von Ohne-Fall und Alternative 2 (Schrägverwindung)	131
Abbildung 4-36: Verteilung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten (fahrstreifenbezogen, $t = 1,60$ mm) für $n = 1$, Schrägverwindung (Alternative 2).....	131
Abbildung 4-37: Höhenplan und Querneigungsband von Ohne-Fall und Alternative 3 (Veränderte Gradientenlage im Querschnitt), DAA = 0,00 (oberes Bild; DAA = 1,00 (unteres Bild)	132
Abbildung 4-38: Differenzen der Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$) für DAA = 0,00 (oberes Bild) bzw. DAA = 1,00 unteres Bild	132
Abbildung 4-39: Differenzen der Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$) für Querneigung zur Kurvenaußenseite. Li. FBR oben (oberes Bild) bzw. re. FBR oben (unteres Bild).	134
Abbildung 4-40: Differenzen der Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$) für Änderung der Längsneigung. Anhebung auf $s = -4,60\%$ (oberes Bild) bzw. Absenkung auf $s = -1,00\%$ (unteres Bild).	135
Abbildung 4-41: Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Fahrspuren, $t = 1,60$ mm) für $n = 1$, für Änderung der Längsneigung. (links: Anhebung auf $s = -4,60\%$; rechts; Absenkung auf $s = -1,00\%$)	136
Abbildung 4-42: Bewertung der Varianten der Maßnahmengruppe 4 „Änderung des Querneigungsbands“ anhand der Bewertungsgröße „fahrstreifenbezogene Mindest-Aquaplaning-Geschwindigkeit“	138
Abbildung 4-43: Bewertung der Varianten der Maßnahmengruppe 4 „Änderung des Querneigungsbands“ anhand der Bewertungsgröße $B = \Delta V_{aq}^1$	138
Abbildung 4-44: Bewertung der Varianten der Maßnahmengruppe 4 „Änderung des Querneigungsbands“ anhand der Bewertungsgröße $B = \Delta w_{fd}^1$	139

Abbildung 4-45: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1$; $\Sigma \Delta w_i^1$	141
Abbildung 4-46: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1$; $\Sigma \Delta V_i^0$	142
Abbildung 4-47: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1$; $\Sigma \Delta V_i^1$	142
Abbildung 4-48: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1$; $\Sigma \Delta V_i^9$	143
Abbildung 4-49: Aquaplaning-Geschwindigkeiten für $n = 1$ im Verwindungsbereich mit 1 Rinne (unten) und außerhalb des Verwindungsbereichs	144
Abbildung 4-50: rechter Fahrstreifen mit Grooving von 170+653 bis 17+360 (Texturmodell (oben) und Verteilung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten, ohne Grooving (mitte) und mit Grooving (unten))	144
Abbildung 4-51 Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1$; $B = \Delta V_{aq}$, $V_{aq,0} = 80$ km/h	145
Abbildung 4-52 Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = \{0,2$; $1; 5; 10\}$; $B = mV_{aq}$	146
Abbildung 5-1: Aquaplaning-Geschwindigkeiten für das Regenereignis $n = 1$ [$r = 125,7$ l / (s*ha)] unter Variation der Reifenprofiltiefen t	149
Abbildung 5-2: Vergleich der Aquaplaning-Geschwindigkeiten für Neureifen und einen Reifen mit vorgeschriebener Mindestprofiltiefe; Variation der Regenhäufigkeit	150
Abbildung 6-1: Modellierungsbereich, Innenbereich, Außenbereich	151
Abbildung 6-2: Winkelterminologie	151
Abbildung 6-3: Terminologie Umgebungsbereich	152
Abbildung 6-4: Terminologie im Zusammenhang mit dem Orthogonal-Rastersystem	153

TABELLEN

Tabelle 1:	Definitionen in der Datenart DA001 (Auszug).....	13
Tabelle 2:	Eingaben für das Textur-Modell.....	15
Tabelle 3:	Parameter für das Kinematische Welle-Modell (RESSEL/HERRMANN, 2006A)	28
Tabelle 4:	Parametrisierung von i Tangentenschnittpunkten.....	51
Tabelle 5:	Bemessungs-Regenereignisse für die Modellrechnungen.....	89
Tabelle 6:	Dimensionierung nach zulässigen Höchstgeschwindigkeiten; größenmäßig und unter Berücksichtigung von Position und Clustern.....	94
Tabelle 7:	Ergebnisse (zulässige Höchstgeschwindigkeiten [km/h]) aus den Betrachtungen zur maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Lösungsvariante 1).....	100
Tabelle 8:	Grenzen des Grooving-Abschnittes im Verwindungsbereich für Pattern 7/7/31 und für versch. Regenereignisse.....	119
Tabelle 9:	Grenzen des Grooving-Abschnittes im Verwindungsbereich für Pattern 10/10/30 und für versch. Regenereignisse.....	120
Tabelle 10:	Grenzen des Grooving-Abschnittes im Verwindungsbereich für Pattern 7/7/31 und für versch. Regenereignisse.....	120
Tabelle 11:	Ergebnisse (zulässige Höchstgeschwindigkeiten [km/h]) aus den cluster-/flächenbezogenen Betrachtungen zur maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit.....	121

1 EINFÜHRUNG

1.1 Das Problem Aquaplaning und Verkehrssicherheit

Seit langem ist bekannt, dass nicht nur eine unangepasste Fahrgeschwindigkeit oder zu niedrige Reifenprofiltiefen, sondern auch bestimmte Trassierungssituationen zu einem Anstieg der Unfallgefahr im Zusammenhang mit regennassen Fahrbahnen führen können (vgl. Kapitel 1.2). Besonders bei zusammenhängenden, geschlossenen Wasserfilmen kann es zu einem kritischen Aufschwimmen der Fahrzeugreifen, dem so genannten Aquaplaning kommen.

Nur durch ein gleichzeitiges Angehen aller relevanter Einflussfaktoren kann sichergestellt werden, dass Unfälle die direkt mit dem Phänomen des Aquaplaning in Verbindung gebracht werden, in Zukunft zahlenmäßig zurückgehen. Als Teil dieses Bemühens befasst sich die vorliegende Arbeit mit demjenigen der genannten Faktoren, der sich im Einflussbereich des Straßenentwurfes und Straßenbetriebs befindet: mit der Ausgestaltung bzw. Optimierung der Fahrbahn in Topologie und Textur, sowie der Anwendung von Elementen zur Verbesserung der Entwässerung.

„Aquaplaning-Unfälle“ werden in der Unfallforschung an den beiden Merkmalen Unfalltyp „Fahrunfall“ und Straßenzustand „nass/feucht“ identifiziert. Die so genannten Fahrunfälle sind dadurch gekennzeichnet, dass der Unfall ausgelöst wurde durch den Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug – und zwar:

- a. wegen nicht angepasster Geschwindigkeit oder
- b. wegen falscher Einschätzung des Straßenverlaufs, Straßenzustands o.ä.,

ohne, dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beigetragen haben (FGSV, 1998). Obwohl mithin von jedem Verkehrsteilnehmer verlangt werden darf, dass er die Punkte a. und b. stets beachtet, ist doch eine Situation vorstellbar, bei der sich – trotz angemessener Geschwindigkeit und einer für den Moment richtigen Einschätzung des Straßenzustands – die Randbedingungen derart rasch ändern, dass die Zeit zur Reaktion und Nachjustierung durch den Fahrer fehlt.

Eine abrupte Änderung des Fahrbahnzustands und damit ein Abfallen der noch als sicher geltenden Fahrgeschwindigkeit kann beispielsweise durch die Trassierungssituation der so genannten Fahrbahnverwindung ausgelöst werden. Hierbei verändert sich die Krümmungsrichtung (Kurve) der Straße von der einen zur entgegengesetzten Seite (z.B. von einer Rechts- zu einer Linkskurve). Gleichzeitig wechselt die Fahrbahnquerneigung mit, da diese im Allgemeinen aus fahrdynamischen Gründen stets zur Kurveninnenseite gerichtet ist. Im Verlauf dieser Verwindungsbereiche kommt es zu sehr langen Abflusswegen des abfließenden Oberflächenwassers (ca. 3 mal so hoch wie auf normalen Streckenabschnitten). Entlang dieser Fließwege nimmt durch den stetigen Wasserzustrom infolge von Beregnung die Wasserfilmdicke und damit die Aquaplaning-Gefahr zu. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich, weshalb Unfallhäufungsstellen speziell von Fahrunfällen bei Nässe oft in Verwindungsbereichen zu finden sind.

Es gibt diverse Untersuchungen über diesen Zusammenhang (vgl. z.B. TRAPP, 2002; KREBS/LAMM/BLUMHOFER ET AL., 1982; HERRING, 1980; KNOLL/NAZET, 1969). In einer neueren Untersuchung konnte der Zusammenhang zwischen Verwindungsstrecken und „Aquaplaning-Unfällen“ anhand von Gesamtunfalldaten der Jahre 2001 und 2002 im Autobahnnetz von Bayern (ca. 650 km Streckenlänge dreistreifige Richtungsfahrbahnen) belegt werden (RESSEL/HERRMANN, 2006A).

Als Beispiel für die überraschende Aussagekraft sei Abbildung 1-1 aufgezeigt. Hier ist dargestellt, wie auf 15% der Streckenabschnitte mit Verwindungsstrecken, die dunkelblau (bzw. schwarz) dargestellt sind (Abbildung 1-1 links oben), 17% der Gesamtunfälle auftreten (Abb. rechts oben), 23% aller Nass-Unfälle (Abbildung 1-1 links unten), sowie 28% aller Fahrurfälle bei Nässe (Abbildung 1-1 rechts unten).

Ein Schluss, der dazu käme, dass sich die Unfallgefahr in Verwindungsbereichen demnach bei Nässe fast verdoppele (28% zu 15%) ist noch zu konservativ, denn es gilt zudem die Zeitanteile von nasser und trockener Fahrbahn zu berücksichtigen.

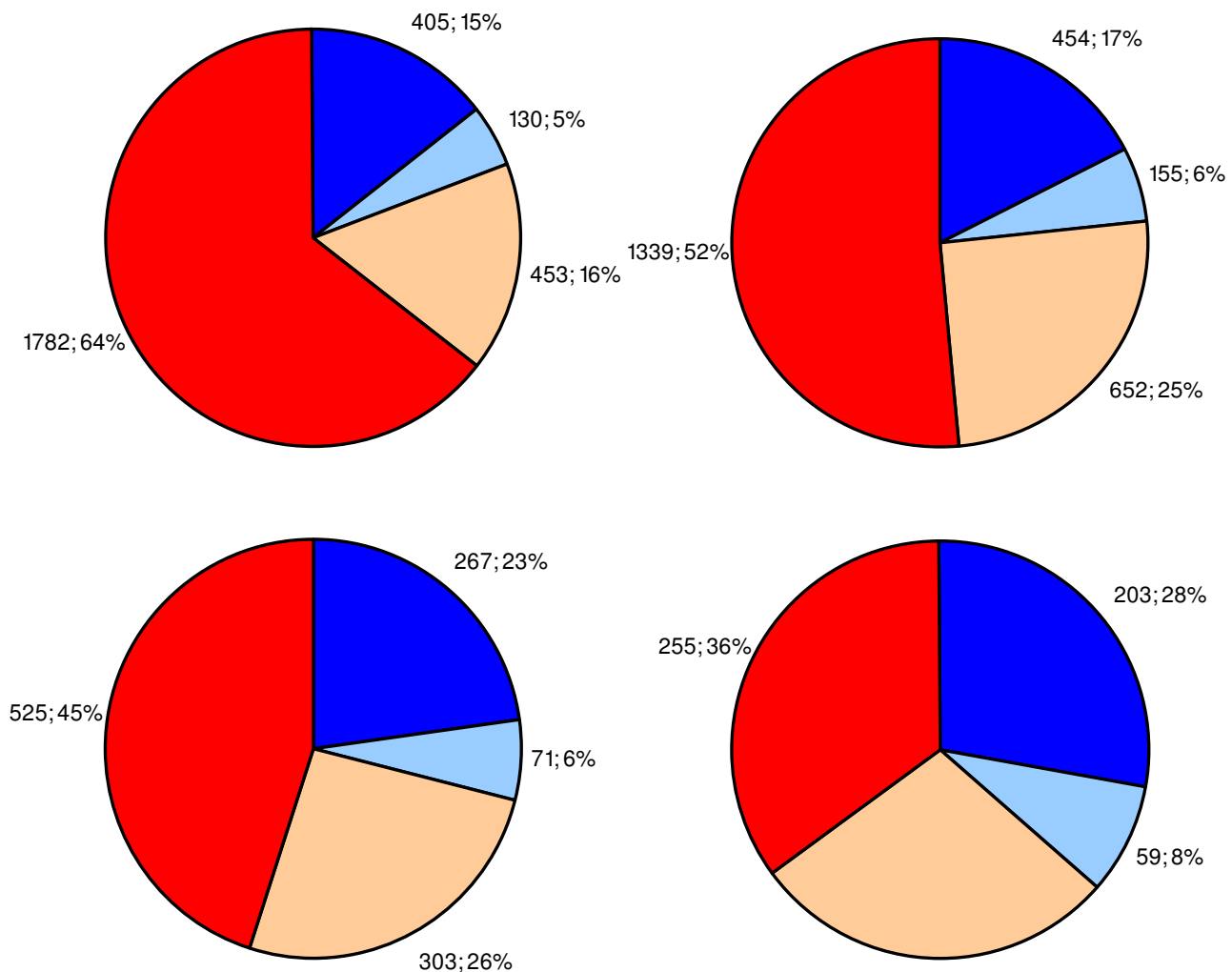


Abbildung 1-1: Verteilung von Streckenanteilen, Gesamtunfällen, Unfälle bei Nässe (Fahrbahnzustand nass/feucht) und Fahrurfälle (Unfalltyp 1) bei Nässe der Jahre 2001/2002 auf der BAB A9 (km 244+2 bis km 521+1, Fahrtrichtung rechts); n = 2.770 Streckenabschnitt à 100 m Länge

In der zitierten Untersuchung wurde eine zu 25% nasse und zu 75% trockene Fahrbahn angenommen. Auch diese Annahme ist sehr auf der sicheren Seite, vor dem Hintergrund von Niederschlagsanteilen, die sich in Deutschland um 5 - 10 % bewegen (HEINZ, 1981).

Die errechnete Unfallhäufigkeit auf Verwindungsstrecken ist damit annähernd sechsmal so hoch wie bei sonstigen Abschnitten². Dies zeigt den immensen Einfluss des Trassierungstyps „Verwindungsbereich“.

1.2 Historischer Abriss³

Seit den 1930er Jahren ist das Phänomen des Aquaplaning bekannt, doch besaß es anfangs nicht den Stellenwert eines Sicherheitsproblems, da die Fahrgeschwindigkeiten zu gering waren, um überhaupt in den Aquaplaning-Bereich zu gelangen.

Grundlagenforschung wurde dennoch betrieben; so stellte SAAL 1936 ein Denkmodell auf, mit dem der Vorgang der Überrollung mit einem Reifen auf nasser Fahrbahn mittels der Annäherung zweier Platten beschrieben werden kann. PIEPER untersuchte bereits 1938 experimentell den Regenabfluss von Straßenoberflächen.

Die ersten Aquaplaning-Forschungen fanden ab den 1950er Jahren in den USA im Umfeld der Luft- und Raumfahrt, besonders bei der NASA, statt, da hier erstmals kritisch hohe Geschwindigkeiten (bei Start und Landung von Flugzeugen) mit einer hinreichend großen zu entwässernden Fläche (Start- und Landebahn) einhergingen und sich damit als Sicherheitsfaktor erwiesen.

Es wurden die grundlegenden Gedanken- und Rechenmodelle entwickelt, die noch heute Gültigkeit besitzen, wie das Drei-Zonen-Modell (GOUGH, 1958) (weiterentwickelt durch MOORE) oder das hydrostatische Staudruckmodell (HORNE, 1962), welches Auslöser einer Reihe von ähnlichen Modellen war, die in den 1960er Jahren folgten. Gleichzeitig wurden die ersten umfangreichen Experimente zum Aquaplaning-Verhalten von Flugzeugreifen unternommen (HORNE/DREHER, 1963 und 1966).

Mit der Zunahme der möglichen Fahrgeschwindigkeiten durch schnellere Fahrzeuge und durch Vergrößerung der zu entwässernden Oberflächen im Straßenbau durch zwei- und mehrstreifig ausgebaute Fahrbahnen wurde Aquaplaning auch im Straßenbau immer mehr zum Thema.

In Deutschland beginnt das Forschungsthema „Aquaplaning auf Straßen“ Ende der 1960er Jahre an Bedeutung zu gewinnen. 1967 gibt es erste Experimente zum Einfluss des Reifenprofils auf die Griffigkeit bei Nässe (GENGENBACH, 1967). 1968 wird in Deutschland erstmalig offiziell der Begriff „*Aquaplaning*“ definiert durch das „Merkblatt über

² $(28\% / 15\%) \cdot (75\% / 25\%) = 5,6 \approx 6$

³ Eine detailliertere Übersicht und Zusammenfassung der zitierten Veröffentlichungen kann RESSEL/HERRMANN (2006A) entnommen werden.

Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe“ (FG, 1968). Das Merkblatt gibt auch erste Richtwerte für die Griffigkeit von Straßen an.

1969 wird in Berlin ein „Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe“ (WEHNER/SCHULZE, 1969) mit renommierter Teilnehmerschaft abgehalten.

Ebenfalls 1969 stellten KNOLL/NAZET fest, dass sich Unfallschwerpunkte bei Nässe im Wesentlichen in der Nähe von Verwindungsstellen, insbesondere aber auch dort, wo gleichzeitig Wannen, oder Bereiche mit geringer Längsneigung vorhanden sind, befinden.

Nachdem die besondere Trassierungssituation des Verwindungsbereichs als einer der Hauptgründe aufgedeckt war, dauerte es nicht lange, bis die ersten Untersuchungen hierzu erschienen:

Parallel untersuchten HÖCKER (1971) in Aachen und KALENDER (1971) in Berlin künstlich beregnete Fahrbahnoberflächen und gleichzeitig die besondere Situation des Wasserabflusses in Verwindungsbereichen. Diese beiden Arbeiten sind in ihrer Thematik und Aufgabenstellung sehr ähnlich zu der vorliegenden Arbeit. Die Ergebnisse von HÖCKER waren zudem direkte Grundlage für ein Rechenprogramm zur Ermittlung der Wasserfilmdicken, welches von KORDT entwickelt wurde und bis vor kurzem in der Straßenverwaltung (z.B. Nordrhein-Westfalen) eingesetzt wurde (HOFER, 1989). Dieses Rechenprogramm soll durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Programm PLANUS abgelöst werden.

Untersuchungen von beregneten (Straßen-)Oberflächen wurden weiterhin durchgeführt (KARANTOUNIAS, 1972; HOLDERBAUM, 1978; ZIOR, 1987). Um die Realität möglichst genau zu erfassen, wurden Wasserfilmdickenmessungen auch unter natürlichen Niederschlägen durchgeführt (PETRACZEK, 1975). 1978 wurde von KLEIN/LEHNERT/HOLDERBAUM ein kompletter Verwindungsbereich im Maßstab 1:5 (1,5 x 9,0 m) nachgebaut und künstlich beregnet. Ein Fahrstreifenmodell im Originalmaßstab mit Spurrinnen wurde von NESTMANN/KROMER/BERNHART (1996) künstlich beregnet.

Auch der Einfluss der Geometrie von Verwindungsbereichen auf das Wasserabflussverhalten spielte weiterhin eine Rolle in der Forschung (OSTERLOH, 1973; LEHNERT, 1974; PETROVIC, 1976).

Auf Seite der Fahrzeug- und Reifentechnik wurden ebenfalls vielzählige Untersuchungen im Bereich Aquaplaning durchgeführt. Wegen ihrem Bezug zu Verwindungsbereichen ist hierbei besonders die Arbeit von RIEDEL (1985) hervorzuheben.

1.3 Ziele und Schwerpunkte der Arbeit

In Kapitel 1.1 ist der Einfluss von Verwindungsbereichen auf die Aquaplaning-Gefahr und das Unfallgeschehen verdeutlicht worden; in Kapitel 1.2 wurde der chronologische Verlauf der Forschung auf den drei Gebieten Aquaplaning, Wasserabfluss auf (beregneten) Fahrbahnoberflächen und Abflussverhältnisse in Verwindungsstrecken nachvollzogen.

Vor dem Hintergrund des aufgezeigten, momentanen Standes der Forschung sind es im Wesentlichen drei Aufgabenbereiche, an denen die vorliegende Arbeit ansetzt und eine Weiterentwicklung des Wissensstandes anstrebt. Diese werden nachfolgend aufgezeigt.

1.3.1 Verknüpfung von Wasserfilmdickenverteilungen und Aquaplaning

In zwei Forschungsfeldern, sowohl zum Wasserabflussverhalten auf Fahrbahnoberflächen, als auch zur Griffigkeit bzw. zum Reibwert von Pkw-Reifen, existiert eine breite Basis an Veröffentlichungen. Eine Verknüpfung der meist von getrennten Disziplinen – Wasserwesen, Straßenwesen und Kraftfahrzeugwesen – bearbeiteten Studien zu einem Gesamtzusammenhang erfolgte dagegen oft nur am Rande.

Als eine erste Aufgabe dieser Arbeit wird daher der Versuch unternommen, die Zusammenhänge zwischen Wasserfilmdicken und Aquaplaning-Verhalten intensiver zu erforschen.

1.3.2 Entwicklung eines Softwareprogramms mit Optimierungsstrategien bzw. Lösungsassistentz

Von großer Bedeutung ist die Nutzbarkeit, Zugänglichkeit und Verwertung von Erkenntnissen aus der Forschung. Je besser die theoretischen Grundlagen von der Praxis umgesetzt werden können, um so größer ist der aus den Ergebnissen entstehende Nutzen.

So gesehen ergibt sich eine weitere Aufgabe dieser Arbeit darin, diesem Anspruch gerecht zu werden. Dies erfolgt in Form eines Softwaretools, in welchem die Erkenntnisse gebündelt und dem Anwender zugänglich gemacht sind. Dieses Tool sollte optimalerweise eine möglichst anwenderfreundliche und umfassende Arbeit ermöglichen.

Allein die Untersuchbarkeit von Zusammenhängen bzw. das Wissen darüber führt noch nicht zu einer Verbesserung einer Situation, z.B. in Form einer Beseitigung einer Unfallhäufungsstelle. Darum ist auch die Evaluierung von verschiedenartigen Lösungsansätzen elementar.

Mit diesem Ziel als Grundlage soll das Computerprogramm mit Lösungsuntersuchungs- und Optimierungsstrategien ausgestattet werden. In der vorliegenden Arbeit sind diese vorgestellt:

- Berechnung der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für eine noch ausreichend sichere Befahrbarkeit bei starken Niederschlägen,
- Optimierung der Positionen und Ausrichtungen von Entwässerungsrinnen in der Fahrbahn,
- Variation des eingesetzten Fahrbahnbelags,
- Beurteilung von Maßnahmen zur Verbesserung bereits vorhandener Fahrbahnbeläge, z.B. Rillenfräsen (Grooving).
- Optimierung des Querneigungsbands (z.B. auch Anwendung einer Schrägverwindung).

1.3.3 Berechnungsmöglichkeit für vorhandene Oberflächendaten

Häufig kann es erforderlich werden, einen Streckenabschnitt im Bestand nachzurechnen, um geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit einzuleiten.

Während bei Straßenneuplanungen die Gestalt der Fahrbahnoberfläche anhand der zugrunde gelegten Trassierungsdaten modelliert wird und damit eine Optimierung des Entwurfs unter Aquaplaning-Gesichtspunkten erfolgen kann, ergeben sich bei der Überprüfung vorhandener Streckenabschnitte gänzlich andere Voraussetzungen.

So ist die im Bestand vorzufindende Straßenoberfläche aufgrund diverser Einflüsse nicht identisch mit der ideal-geometrischen Form, die sie theoretisch anhand des Deckenbuchs haben müsste. Diese Einflüsse können bedingt sein durch Abweichungen beim Einbau, durch Verkehr (z.B. Spurrinnen) und durch Witterung (z.B. Abplatzungen, Frostschäden).

Die Auswirkungen dieser verschiedenartigen Einflüsse lassen sich nur richtig abbilden, wenn die Fahrbahnoberfläche vor Ort aufgenommen wird und eine modellhafte Überprüfung anhand dieser aufgenommenen Messdaten erfolgt. Eine Nachbildung der Fahrbahn im Modell anhand der Trassierungsparameter gibt zwar tendenzielle Ergebnisse an, ist aber aufgrund der nicht berücksichtigten Einflüsse für eine gesicherte Gesamtaussage weniger geeignet.

Aus der Erfordernis nach einem detaillierten und exakten Abbild der Fahrbahnoberfläche für Modellrechnungen und der gleichzeitigen Möglichkeit, durch die heutigen Möglichkeiten der Lasermessungstechnik ein solches Abbild überhaupt erst erstellen zu können, ergibt sich der letzte Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit.

Dieser Schwerpunkt soll es sein, Möglichkeiten zu entwickeln, um Laser-Messdaten zur Fahrbahnoberflächengestalt in ein Simulationsmodell einzulesen und über Wasserabfluss- bzw. Aquaplaning-Simulationen geeignete Untersuchungen und Empfehlungen erarbeiten zu können.

1.4 Vorgehensweise

Zur Erarbeitung der beschriebenen Ziele und Schwerpunkte dieser Arbeit wurde ein Computerprogramm erstellt, mit dem die beschriebenen Modelle und Funktionen entwickelt, evaluiert und optimiert wurden.

Eine frühere Version des als Ziel der Arbeit definierten Computerprogrammes wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Aquaplaning und Wasserfilmdicken – Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen; Berechnung der Wasserfilmdicke“ (FE 05.126/2001/AGB) entwickelt, welches von der BAST (als Forschungsanstalt des BMVBW) an das Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart in Auftrag gegeben wurde (vgl. RESSEL/HERRMANN, 2006A).

Dieses Programm, PLANUS, wurde über die Spezifikationen dieses Auftrags hinaus weiterentwickelt, um die als Ziele dieser Arbeit formulierten Funktionalitäten zu erfüllen (Kapitel 1.3).

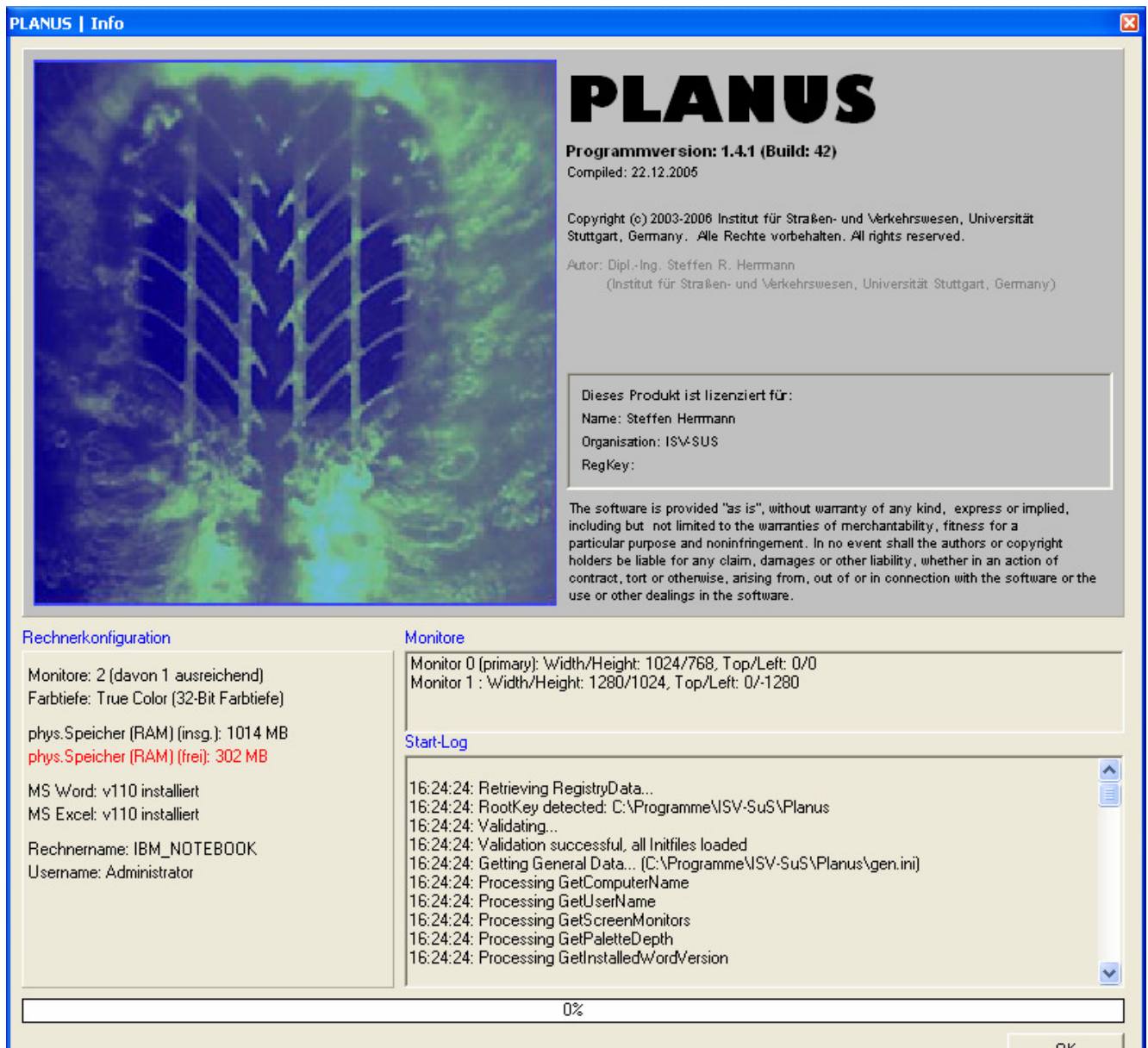


Abbildung 1-2: Startbildschirm von PLANUS

Von der Landesstelle für Straßentechnik des Landes Baden-Württemberg wurde die Untersuchung des Verwindungsbereichs „km 171+000 bis 170+000“ auf der BAB A 8 (Stuttgart – München) in Auftrag gegeben, dessen Fahrbahntopologie durch das Laser-Messsystem MOSES aufgenommen wurde. Die Daten dieses 1 km langen Abschnitts liegen als Punktwolke im Raum mit {X,Y,Z}-Koordinaten für jeden Punkt vor (vgl. Kap. 2.2.1).

Modifikation und Erweiterung der Programmroutinen und Modelle

Ausgehend von einem relativ limitierten Anwendungsbereich auf parametrisierte Verwindungsbereiche waren anhand dieses Beispiels die Programmfunktionen von PLANUS so anzupassen, dass theoretisch jede Oberfläche eingelesen und modelliert werden kann.

Insbesondere wurden die folgenden Funktionen hinzugefügt:

1. Import- und Konverter-Routine für Raum-Punkt-Modelle ohne wechselseitigen Bezug (MOSES-Daten = DA001, keine Punkt- oder Achs-ID) (s. Kap. 3.4.1).

2. Import- und Konverter-Routine für achsbezogene Fahrbahndaten (wie sie z.B. aus gängigen Straßenplanungsprogrammen exportiert werden können; Achsdaten DA055, DA066).
3. Achs-Einrechnungsroutine für nicht-achsbezogene Daten (wie in a.) (s. Kap. 3.4.1).
4. Anpassung der Falllinien-Routine an die irreguläre Topologie (s. Kap. 3.4.3),
5. Anpassung der Randschritt-Routine an die irreguläre Topologie (s. Kap. 3.4.5),
6. Einführung eines universellen Texturmodells (s. Kap. 3.4.6)
7. Berechnung von Fahrbahnquerprofilen aus Rasterdaten (s. Kap. 3.4.5)
8. Parametrisierung von Schrägverwindungen.

Anwendungsbeispiel „BAB A 8 (km 171+000 bis 170+000)“

Mit der durch diese Ergänzungen bewirkten Funktionalität von PLANUS wird es ermöglicht, nicht nur das Beispiel „BAB A 8 (km 171+000 bis 170+000)“ berechnen zu können, sondern ebenso jegliche weiteren Fahrbahntopologien, die im selben Datenformat vorliegen. Exemplarisch wird in dieser Arbeit an diesem Beispiel aufgezeigt, welche Möglichkeiten PLANUS bietet und welchen Modellparameter, Kenngrößen und Bewertungsschemata als günstig einzustufen sind und daher bei zukünftigen Auswertungen verwendet werden sollten (Kapitel 4).

Zu den Möglichkeiten, die zur Verbesserung der Sicherheit an Stellen mit unzureichendem Oberflächenabfluss beitragen könnten, gehört der Einbau von Entwässerungsrinnen. Bei diesen Rinnen handelt es sich um monolithische Rinnen aus Polymerbeton, die direkt auf der Fahrbahn eingebaut werden.

Beim Einbau von Entwässerungsrinnen wird unterschieden hinsichtlich der *Ausrichtung der Rinne zur Fahrbahnachse* zwischen:

- i. Querrinnen (90° zur Achse),
- ii. Längsrinnen (parallel zur Achse zwischen zwei Fahrstreifen oder zwischen Fahr- und Standstreifen),
- iii. Schrägrinnen (beliebige Winkel zur Achse).

Entwässerungsrinnen wurden bereits von einigen Straßenbauverwaltungen installiert, so z.B. in Brandenburg und Nordrhein-Westfalen. Auch in anderen Ländern, z.B. die USA wird den Einbau von Rinnen in die Fahrbahn praktiziert.

Neben der Ausrichtung der Rinnen stellt sich die Frage nach der optimalen Position. Hier muss jedoch das komplexe Abflussverhalten in Verwindungsbereichen mit berücksichtigt werden, welches sich auf Grund der punktuell verschiedenen Neigungsgradienten (nach Richtung und Betrag) wesentlich diffiziler darstellt, als es auf Nicht-Verwindungsstrecken (Strecken mit konstanter Querneigung) der Fall ist.

Eine Routine des Programms kann eine automatische Optimierung von Rinnenlagen und -winkeln auf Grundlage einer frei definierbaren Fahrbahnoberfläche durchführen. in dieser

Routine ist eine beliebige Anzahl und Variation von gleichzeitig zu kombinierenden Entwässerungsrinnen simulierbar.

Am Beispiel des Verwindungsabschnitts ‚km 170+000 bis 171+000‘ auf der BAB A 8 auf der Gemarkung Weilheim im Landkreis Esslingen soll das Rechenprogramm so angepasst werden, dass auch irreguläre Fahrbahntopologien erfasst und modelliert werden können. Die Schwierigkeit besteht also in der Modifikation des Programms an die veränderten Randbedingungen. Insbesondere ist auch eine Anpassung derart notwendig, dass das Datenformat, in dem die MOSES-Messdaten vorliegen, eingelesen und umgesetzt werden können.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Verwendetes Simulationsverfahren

2.1.1 Grundprinzip

Als Konzept für die Modellierung der Wasserfilmdicken wurde ein 1-dimensionales Abflussmodell gewählt. Ihm liegen folgende Randbedingungen zugrunde (vgl. Abbildung 2-1):

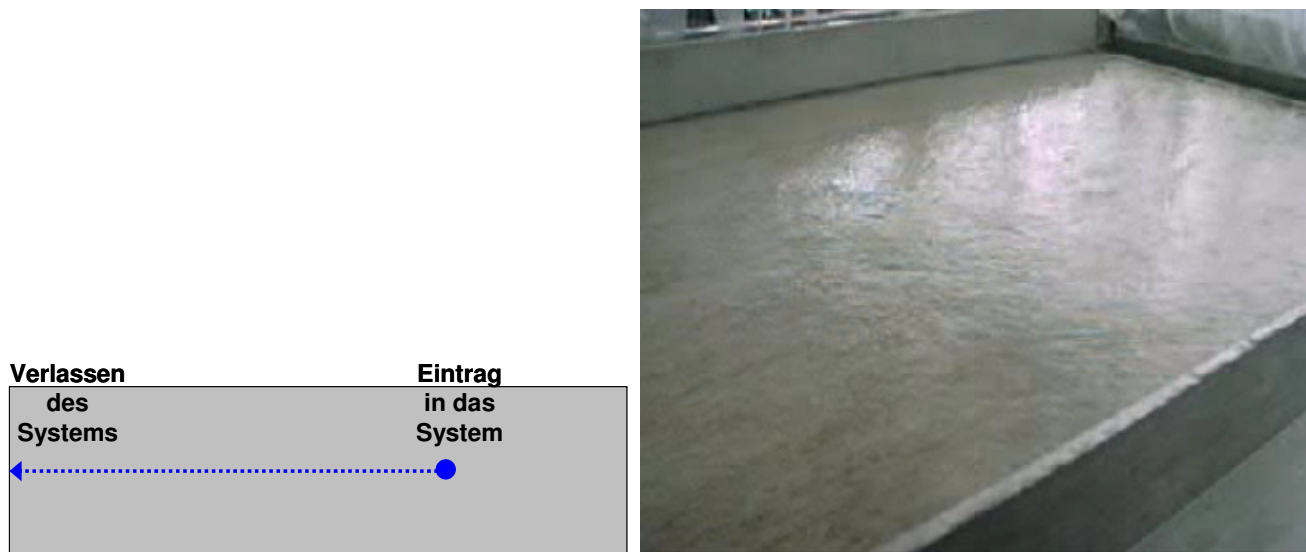


Abbildung 2-1: 1-dimensionales Modellierungskonzept – Prinzip und Versuchsumsetzung

Der Oberflächenabfluss des Wassers wird durch seine einzelnen (inkrementell kleinen) Partikel (Fluidteilchen) beschrieben. Diese werden an einer Stelle in das System eingetragen (z.B. am Fahrbahnrand) und Verlassen das System an anderer Stelle wieder (z.B. ebenfalls am Fahrbahnrand oder über eine Entwässerungsrinne). Diese Modellvorstellung ist in der Hydrodynamik als LAGRANGE'sche Betrachtungsweise bekannt (nach Joseph Louis de LAGRANGE, 1736-1813).

Die örtliche Spur eines Partikels über die Zeit wird als Falllinie (oder Abflusslinie) bezeichnet. Werden mehrere stellvertretende Partikel betrachtet, ergibt sich eine Schar von Falllinien. Ihr Verlauf ergibt sich jeweils aus den Eintragungspunkten ihrer stellvertretenden Partikel in das System.

Daneben gibt es die EULER'sche Betrachtungsweise, bei der nicht ein individuelles Teilchen im Zeitablauf verfolgt wird, sondern das Feld sämtlicher Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet wird. Daraus ergibt sich eine Situation, bei der für jeden Raum-Zeit-Punkt die momentane Geschwindigkeit und Beschleunigung ausgewiesen werden kann (Geschwindigkeits-, Beschleunigungsfeld) (HELMIG, 1996).

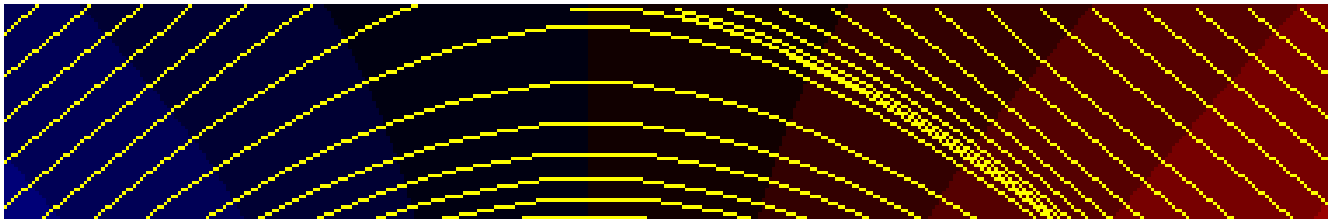


Abbildung 2-2: Beispiel einer Falllinien-Schar in einem Verwindungsbereich

Speziell in Verwindungsbereichen ergibt sich damit ein Bild wie in Abbildung 2-2 dargestellt. Bereits in früheren Untersuchungen zum Wasserabfluss in Verwindungsbereichen wurde ein solches Modell zu Grunde gelegt (so z.B. bei RAUBAL, 2002; KLEIN ET AL., 1978; HÖCKER, 1971; KALENDER, 1971). Die einzelnen Falllinien werden dabei bei der Modellierung des Wasserabflusses einzeln und als voneinander unabhängig angesehen.

2.1.2 Umsetzung

Modellierungsgrundlage ist ein 2-dimensionales Array A_r , dessen Feldkoordinaten bzw. -zeiger X und Y die Flächenkoordinaten des modellierten Bereichs repräsentieren.

$$A_r \in [X \in N, Y \in N] \quad (2-1)$$

Für den Fall programmendogen generierter Topologien stellen die Flächenkoordinaten Achskoordinaten dar, d.h. die Fahrbahnachse (X) und die orthogonal dazu verlaufenden Querachsen (Y).

Alle Berechnungen werden anhand dieses Arrays vollzogen, dessen Zellen mit mehreren Attributen belegt sein können, so z.B. mit der geodätischen Höhe, der Wasserfilmdicke, der Aquaplaning-Geschwindigkeit, sowie mit weiteren Informationen wie z.B. über die Art der vorhandenen Entwässerungseinrichtung.

$$[X, Y] = \left\{ \begin{array}{l} Z \\ wfd \\ v_{aq} \\ \dots \end{array} \right\} \quad (2-2)$$

Das Belegen der Attribute wird konsekutiv von den einzelnen Programmroutinen in der folgenden Reihenfolge durchgeführt:

1. *Geodätische Höhe.* Jeder Punkt wird mit einer Z -Koordinate belegt, die seiner tatsächlichen geodätischen Höhe entspricht. Dies erfolgt entweder programmintern aus Trassierungsdaten (Quer-, Anrampungsneigungen etc.) (vgl. RESSEL/HERRMANN, 2006A und RESSEL/HERRMANN, 2003) oder aus gemessenen Rasterdaten (mit je nach Datenformat entsprechender Aufbereitung).

2. *Entwässerungselemente*. Falls vorhanden, werden Entwässerungselemente, wie Rinnen etc. ebenfalls gerastert. Die Zellen enthalten als Information die ID des Entwässerungselements, mit der über eine Beschreibungsdatei weitere Daten verknüpft sind (so z.B. Rinnentyp oder die laufende Nr.). Das Eingeben von Rinnen kann entweder manuell durch „Setzen“ oder durch einen Iterationsalgorithmus erfolgen.
3. *Falllinien*. Die Falllinien werden ausschließlich auf Basis der Höhendaten sukzessive über ein Vorwärts-Winkelsuchverfahren als Polygonzug aufgebaut. Eine analytische Formulierung der Falllinien-Gleichungen ist daher nicht mehr vorhanden (und nicht erforderlich). RAUBAL (2002) konnte ein Verfahren, das auf dem selben Grundprinzip beruht, erfolgreich auf die Modellierung des Oberflächenabflusses von Kreisverkehrsplätzen anwenden. Die Stützpunkte der Polygonzüge sind so dicht, dass geschwungene Linien deutlich als solche zu erkennen sind. Der Falllinien-Algorithmus basiert vereinfacht auf dem Prinzip, dass das abfließende Wasser stets der Richtung des größten Gefälles folgt. Trägheitskräfte sind ebenso berücksichtigt (vgl. RESSEL/HERRMANN, 2006A).
4. *Wasserfilmdicken*. Die Berechnung der Wasserfilmdicken erfolgt sequentiell in zwei Schritten (vgl. RESSEL/HERRMANN, 2006A):
 - i. Isoliert 1-dimensionale⁴, hydrodynamische Modellierung entlang der einzelnen Falllinien mit einem expliziten Finite-Differenzen-Verfahren (s. HELMIG, 1996). Die Abstände der Falllinien untereinander wird, v.a. um die Einflüsse kon- und divergierender Falllinien auf das Fließverhalten zu berücksichtigen, durch die Einführung einer fiktiven Fließquerschnittsbreite erfasst, die der 1-dimensionalen Modellierung zu Grunde liegt
 - ii. Konsolidierung der einzelnen Teilergebnisse entlang der Falllinien zu einem flächigen, 2-dimensionalen Gesamtergebnis. Anwendung eines mathematisch-analytischen Interpolationsfilters und Formulierung von Regeln, um die Konsistenz des Ergebnisses sicherzustellen (z.B. benachbarte Zellen müssen vergleichbare Werte haben etc.).
5. *Aquaplaning-Geschwindigkeit*. Die Wasserfilmdicken werden Punkt für Punkt in die entsprechenden Aquaplaning-Geschwindigkeiten umgerechnet.

2.2 Datengrundlage

2.2.1 Basis und Format

Die Daten der Fahrbahntopologie wurden im Rahmen der MOSES-Lasermessung erfasst. Für diese Untersuchung wurden sie zu einer Punktwolke aufbereitet, die in einem 20 cm-Raster vorliegt. Im betreffenden Streckenabschnitt beträgt die befestigte

⁴ Isoliert bedeutet in diesem Kontext, dass sich die Berechnungen auf den verschiedenen Falllinien nicht wechselseitig beeinflussen können. Die Rechnung erfolgt für jede Falllinie so, als wenn es nur diese eine gäbe.

Fahrbahnbreite ca. 15,50 m (Regelquerschnitt RQ 35,5), die Länge des erfassten Abschnitts ist 1.000 m. Daraus ergeben sich 387.156 Punkte für den zu modellierenden Abschnitt. Die Punkte liegen in der Datenart DA001 vor.

001	00209017650051	2589884.908	5702461.808	81.560
001	00209017660000	2589880.611	5702470.858	81.630
001	00209017660001	2589877.226	5702469.493	81.510
001	00209017660002	2589873.655	5702468.052	81.420

Abbildung 2-3: Beispiel für die Datenstruktur einer DA001-Datei

Hierbei entspricht jede Zeile einem Punkt. Die folgenden Informationen werden u.a. durch die Datenart DA001 bereitgestellt (s. Tabelle 1):

Position	Bedeutung
01-03	Kennzeichnung der Datenart „001“
04	Koordinatenkennung
05	Punktkennung
06-15	Achsnummer (Querprofil)
16-19	Punktnummer (Position des Punktes innerhalb der Achse)
20-31	Rechtswert
32-43	Hochwert
44	Höhenkennung
45-52	Höhe
...	

Tabelle 1: Definitionen in der Datenart DA001 (Auszug)

In der durch das MOSES-Verfahren zur Verfügung gestellten Datei waren jedoch nur die in der Tabelle hervorgehobenen Werte enthalten.

2.2.2 Spezifika des Streckenabschnitts

Die Fahrbahnbreite wurde mit Hilfe Achseinrechnung-Algorithmus im Planus-Modul „Rasterdaten importieren“ aus den Rasterdaten zu $B = 15,35$ m zurückgerechnet.

Diese Größe deckt sich mit den Beobachtungen vor Ort (3 Fahrstreifen + Standstreifen; vermutlich ein Sonderquerschnitt oder Querschnitt nach älteren Richtlinien entsprechend einem heutigen Regelquerschnitt RQ 35,5 ($B = 14,50$ m)). Die Lage der Drehachse lässt sich ex postum aus den Streudaten nicht mehr bestimmen, daher wird von einer Lage in

Fahrbahnmitte ausgegangen, womit sich der Abstand der Drehachse zum (linken und rechten) Fahrbahnrand zu $a = 7,675$ m ergibt.

Die Fahrbahndecke hat in dem entsprechenden Bereich die folgenden Beläge:

- 1. km 171+000 - km 170+847: Beton
- 2. km 170+847 - km 170+653: Asphalt
- 3. km 170+653 - km 170+016: Beton
- 4. km 170+016 - km 169+998: Asphalt

Diese Abschnitte konnten durch Messungen vor Ort ermittelt werden. Messungen der Fahrbahntextur konnten wegen des Straßenbetriebs nicht vorgenommen werden. Die Inaugenscheinnahme ergab jedoch, dass es sich bei den Asphaltabschnitten um einen Splittmastixasphalt 0/11 handelt und bei den Betonabschnitten um einen mit Jutetuch texturierten Beton. Eine Zugrundelegung der labortechnisch erfassten Rauheiten derselben Beläge erscheint damit gerechtfertigt, auch wenn die Rauheitswerte der Beläge vor Ort durch Verkehrs- und Witterungseinflüsse leicht abweichen mögen.

Der Beton im Abschnitt 3 ist bereits auf 177 m Länge mit Längsrillen (Grooving) versehen.

Durch die Messungen wurde das Rillennmuster 7/7/31 ermittelt (Rillenbreite/Rillentiefe/Rillenabstand). Die angegebenen Werte wurden gemittelt. Vor allem die Rillentiefe variierte deutlich zwischen 5 und 10 mm, was vermutlich auf die unterschiedlichen Abnutzungszustände zurückzuführen sein mag. Die anderen Parameter waren konstant.

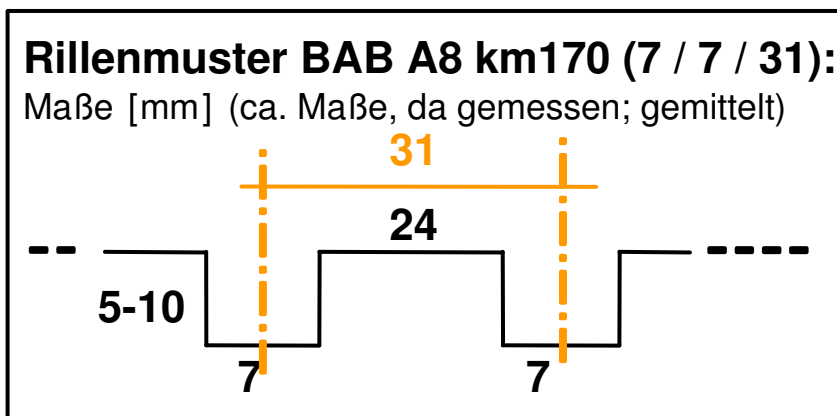


Abbildung 2-4: Aus Messungen vor Ort ermitteltes Rillennmuster auf der A8 (km 170+360,3 bis km 170+183,3; Längsrillen)

Der Grooving-Abschnitt kann ebenfalls berücksichtigt werden. Hierzu wird Grooving vereinfacht als künstlich aufgeprägte Vergrößerung der Makrotextur betrachtet. Dies bietet sich aus zwei Gründen an: zum einen liegen die durch Grooving erzeugten Hohlräume in derselben Größenordnung wie die Makrotextur ($5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$), zum anderen ergibt sich ein globaler, flächenbezogener Kennwert, sodass nicht jede Rille separat betrachtet werden muss. Mit dem bereits in RESSEL/HERRMANN (2006B) verwendeten Verfahren wird die künstliche Rauheit berechnet (vgl. Kapitel 3.4.7).

Damit ergibt sich eine Einteilung des Modellierungsbereichs in 6 Texturabschnitte in Fahrbahnlängsrichtung. In Querrichtung gibt es keine Texturunterschiede (s. Tabelle 2).

Abs.	von [B-km]	bis [B-km]	Fahrbahnbelag	Mittlere Texturtiefe MTD [mm]
1	171+000	170+847	Beton, Jutetuch	0,50
2	170+847	170+653	Splittmastixasphalt 0/11	1,10
3	170+653	170+360	Beton, Jutetuch	0,50
4	170+360	170+183	Beton, Jutetuch, Längsrillen 7/7/31	2,84
5	170+183	170+016	Beton, Jutetuch	0,50
6	170+016	169+998	Splittmastixasphalt 0/11	1,10

Tabelle 2: Eingaben für das Textur-Modell

Die Angaben aus Tabelle 2 wurden im Texturmodell-Modus von Planus umgesetzt (Abbildung 2-5).

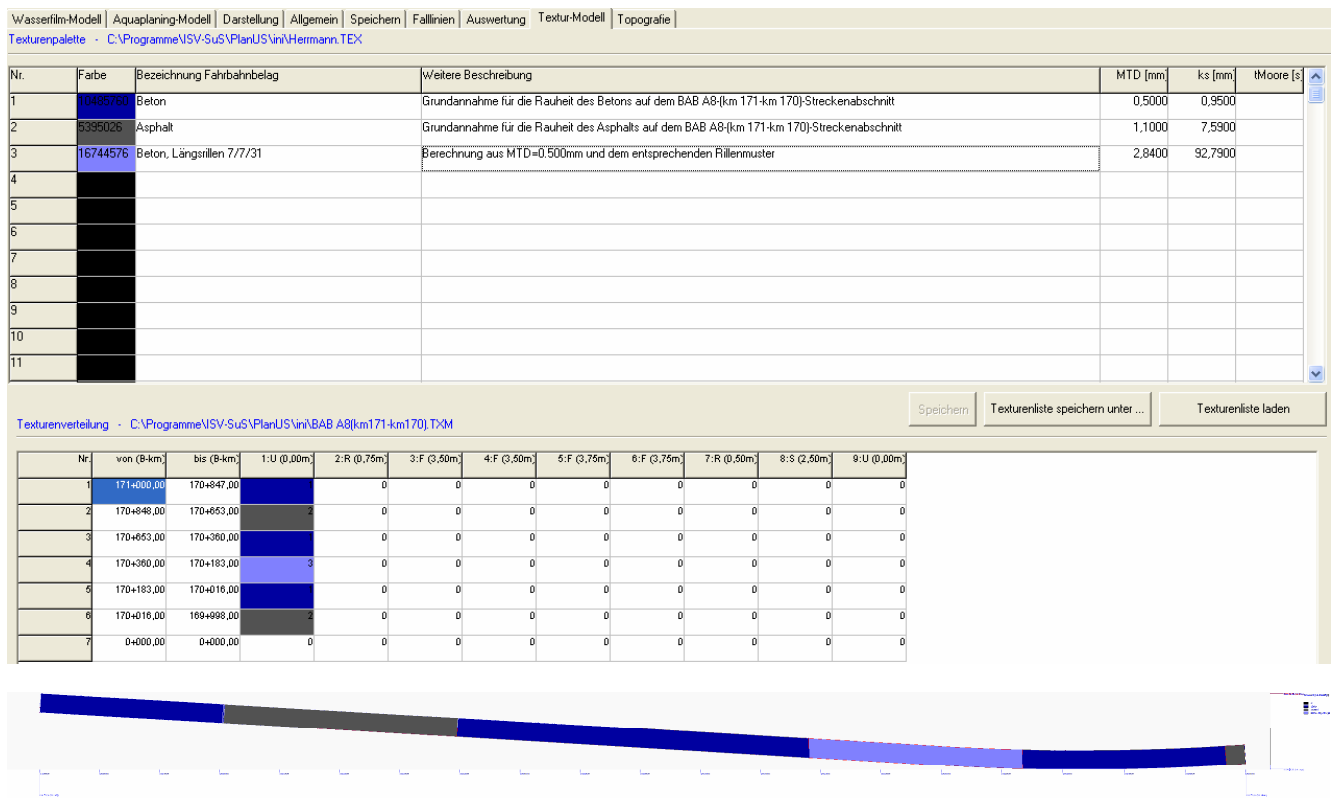


Abbildung 2-5: Planus-Texturmodell / oben: Eingaben für den Verwindungsbereich BAB A8 (km171-km170) / unten: fertig gerechnetes Texturmodell

Aus der Punktwolke der importierten Raummodell-Daten (vgl. App. B.2) konnte eine Abbildung des Lageplans und der Gradienten zurückgerechnet werden (s. Abbildung 2-6). Der Höhenplan zeigt den linken und rechten Fahrbahnrand (FBR). Wie zu erkennen ist, befindet sich ca. bei B-km 170+600 der Tiefpunkt einer Wanne; der Querneigungswechsel wurde bei B-km 170+266,45 lokalisiert. In Absolutwerten befindet sich der modellierte

Abschnitt zwischen den Schranken 355,24 m ü NN (Tiefpunkt der Wanne; rechter FBR) und 368,04 m ü NN (km 170+000; linker FBR).

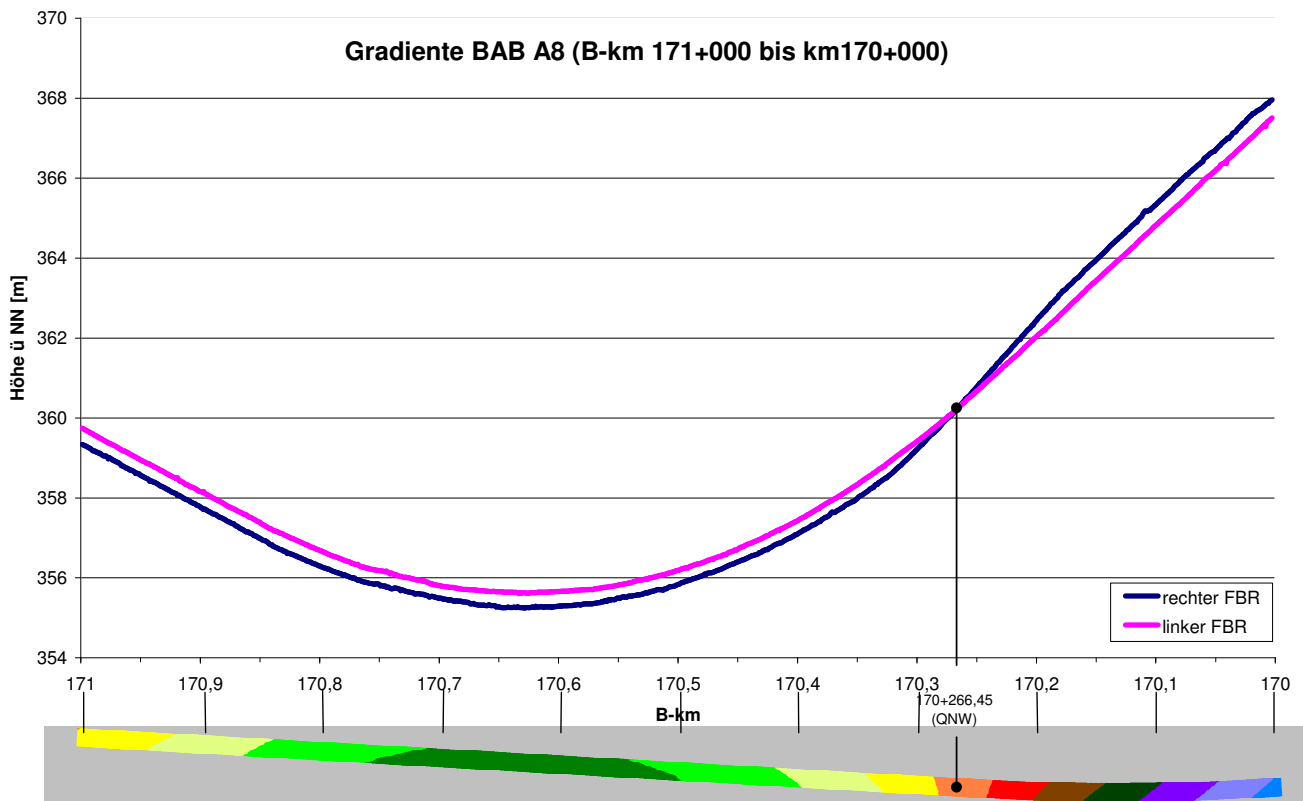


Abbildung 2-6: Gradiente BAB A8 (km 171 – km 170) und „Lageplan“⁵-Darstellung

Im nächsten Schritt wurde aus den Rand-Daten ein Längsneigungs-Profil erstellt (vgl. Abbildung 2-7). Die Längsneigungen wurden jeweils aus benachbarten Querprofilen ermittelt, die im 1 m-Abstand in Fahrbahn-Längsrichtung erzeugt wurden. PLANUS ist dazu in der Lage, Querprofile aus beliebigen Raummodell-Daten zu rechnen, falls zuvor über die Achseinrechnungs-Routine an den Längsrändern (linker und rechter FBR) Kilometrierungen generiert wurden (vgl. Abbildung 2-8).

⁵ Eine Rückrechnung und Darstellung des Lageplans mit Entwurfselementen ist modelltechnisch nicht möglich. Die abgebildete Darstellung bezieht sich auf die „Topologie-Ausgabe“ von Planus mit Höhenbereichen bzw. Höhenschichtlinien (Trennlinien der Höhenbereiche), aber ohne Kenntnis von Trassierungselementen.

Längsneigungen BAB A8 (B-km 171+000 bis km170+000)

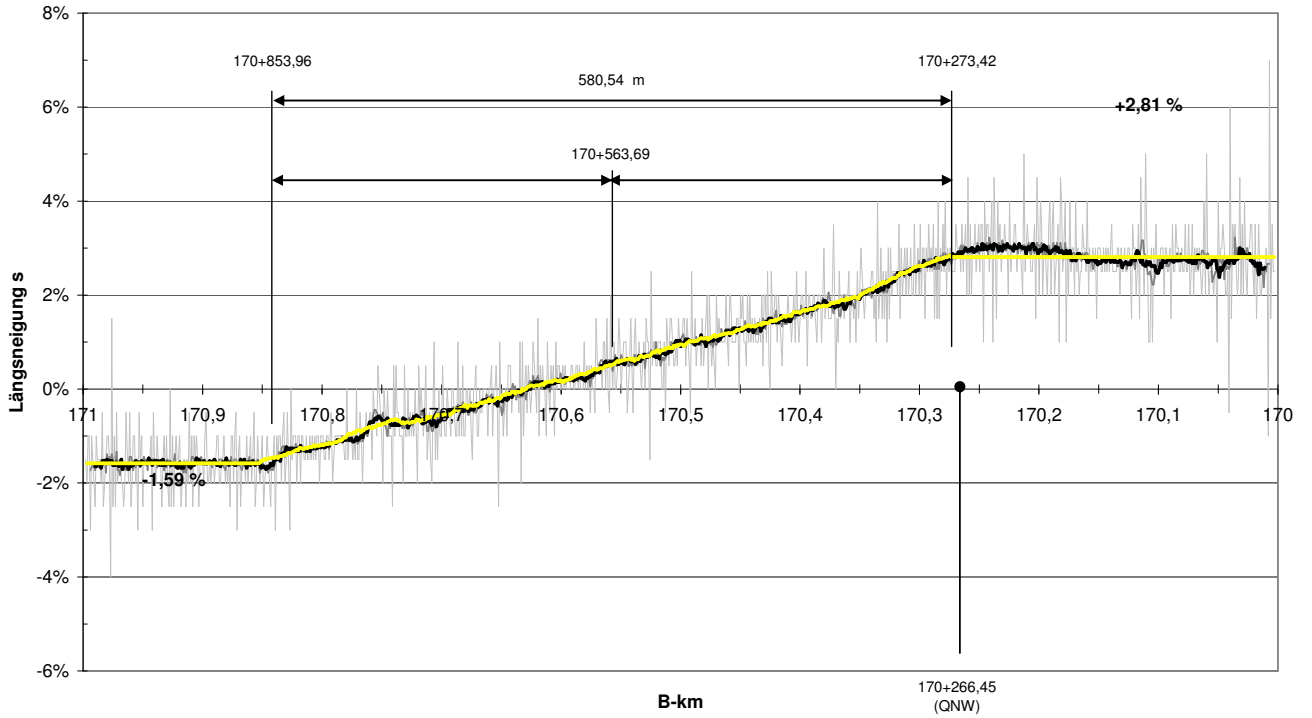


Abbildung 2-7: Längsneigungen BAB A8 (km171-km170)

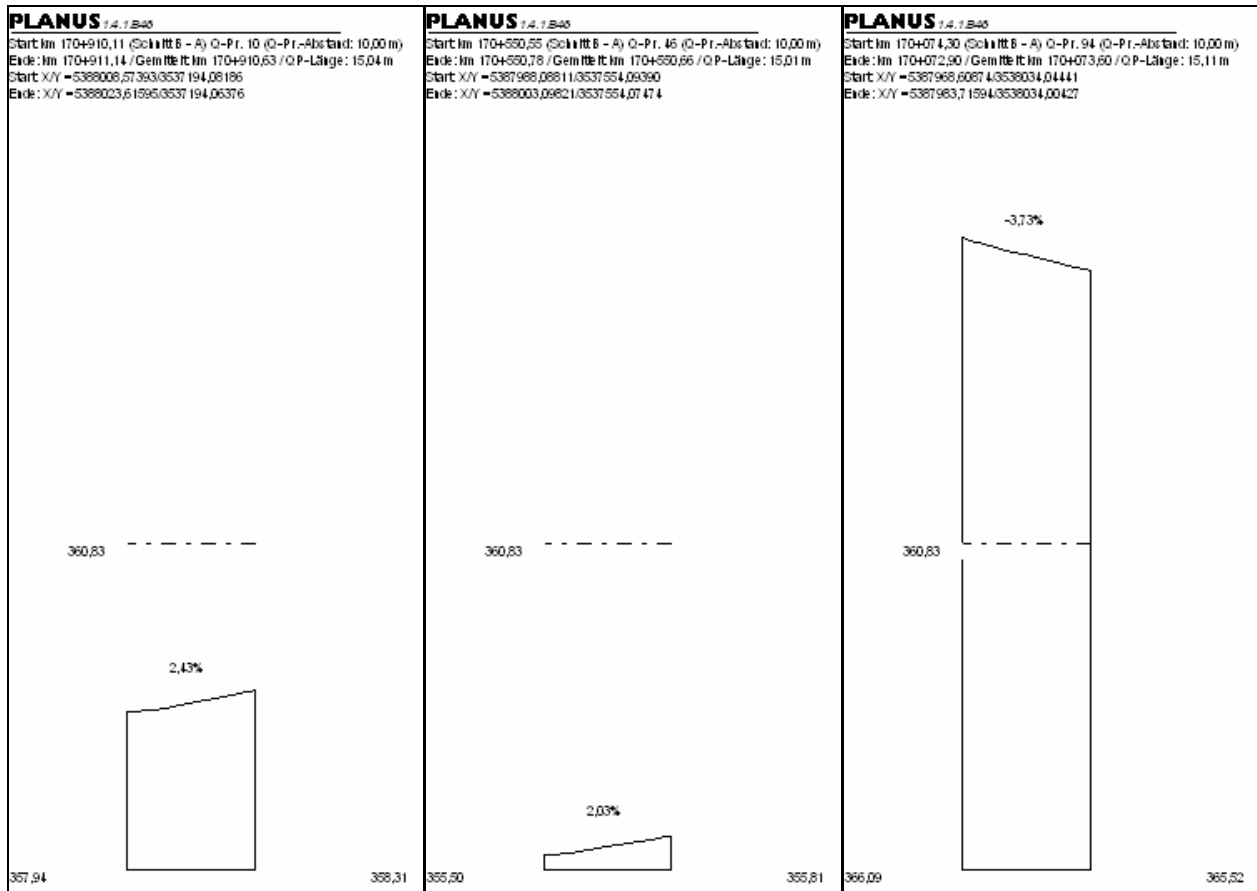


Abbildung 2-8: Beispiel für ein durch PLANUS generiertes Querprofil. Hier: QP 10 bei km 170+910,63, QP 46 (170+550,66), QP 94 (km 170+073,60)(jeweils aus rechtem und linkem Fahrbahnrand gemittelte Positionen). Schnittrichtung modellbedingt entgegen Fahrtrichtung (B-A)

Die 1.000 Punktdaten der Längsneigungen (1 m Abstand auf 1.000 m) streuen bedingt durch die irreguläre Topologie, die hohe Querprofilichte und das Zurückrechnen aus den Rasterdaten um +/- 1%. Daher wurden die Daten geglättet. Nach Mittelung ergibt sich ein Längsneigungsband mit einer konstanten Längsneigung von - 1,59% von km 171+000 bis 170+854 und einer konstanten Längsneigung von + 2,81% von km 170+273 bis km 170+000. Im dazwischen liegenden Bereich werden die beiden Neigungspositionen linear verbunden. Da die Längsneigung als Inkrement der Gradienten gleichzeitig deren 1. Ableitung ist, ergibt die lineare Verbindung der beiden Positionen im Integral eine quadratische Parabel, schlussendlich eine Wanne als Höhenplanausrundung. Die Länge der linearen Verbindung ist:

$$2 \cdot T = 580,54m \quad (2-3)$$

mit:

T = Tangentenlänge der Höhenplanausrundung, m

ergo ist der Wannens-Halbmesser H_W :

$$H_W = \frac{2 \cdot T}{s_2 - s_1} = \frac{580,54}{0,0281 + 0,0159} = 13.194m \quad (2-4)$$

Die aus den Querprofilen berechneten Querneigungswerte weisen eine deutlich geringere Variation auf, da sie aus dem Querneigungsverlauf gemittelt wurden. Aus dem Profil (s. Abbildung 2-9) geht hervor, dass zwei konstante Querneigungen $q_{(-2)} = + 2,36\%$ und $q_{(2)} = - 3,49\%$ zwischen km 170+325,24 und km 170+171,24 nahezu linear miteinander verbunden sind. Ein zentrischer Verwindungsbereich mit einer minimalen Anrampungsneigung von

$$\min \Delta s = 0,10 \cdot a = 0,7675\% \quad (2-5)$$

mit:

$\min \Delta s$ = minimale Anrampungsneigung (im Bereich von $q < q_{\min}$ anzuwenden), %

a = Abstand des Fahrbahnrandes von der Drehachse, m

fehlt demnach⁶. Der Querneigungswechsel (Nulldurchgang) $q_{(0)}$ findet rechnerisch bei km 170+266,45 statt. Durch die ungleichen Querneigungen ist dieser exzentrisch angeordnet mit 58,79 m Abstand zu $q_{(-2)}$ und mit 95,21 m Abstand zu $q_{(2)}$. Insgesamt beträgt die Länge des Verwindungsbereichs $L_V = 154,00$ m.

Ob die Station von Querneigungs- und Krümmungswechsel (Klotoiden-Unendlichkeitsstelle) identisch sind, lässt sich nur qualitativ, anhand der Gegenüberstellung des „Querneigungs-

⁶ Wenn man die Anforderungen der RAS-L (FGSV, 1995) zu Grunde legen würde.

bands“ und des „Lageplans“ in Abbildung 2-6 bestimmen. Durch den Vergleich ist eine gute Übereinstimmung festzustellen.

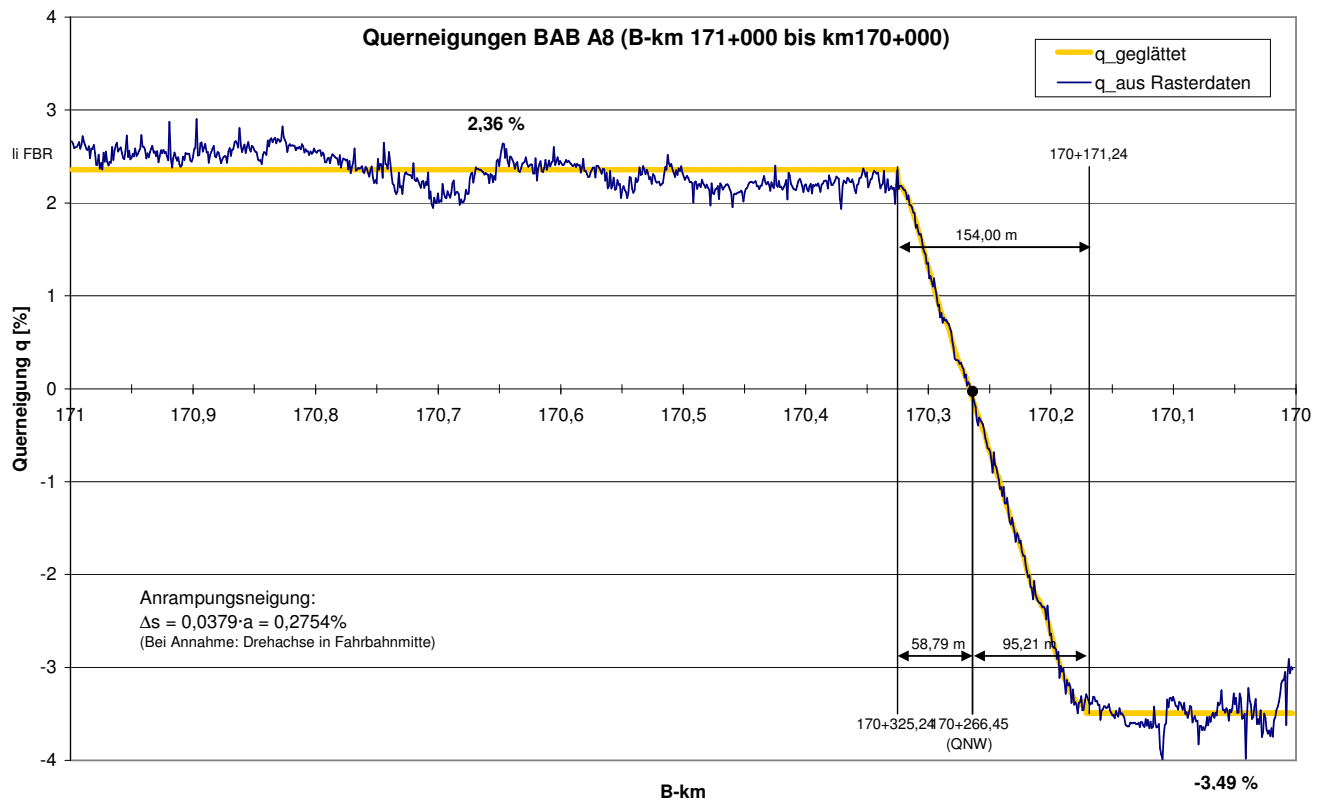


Abbildung 2-9: Querneigungen BAB A 8 (km 171+000 bis km 170+000)

Auf Basis der gemittelten Querneigungsdaten lässt sich die vorhandene Anrampungsneigung bestimmen:

$$\Delta s = \frac{q_{(-2)} - q_{(2)}}{L_V} \cdot a = \frac{2,36 + 3,49}{154,00} \cdot 7,675 = 0,2916\% \quad (2-6)$$

mit:

L_V = „Länge der Verwindungsstrecke“, i.A.: Länge der Strecke zwischen $q_{(-2)}$ und $q_{(2)}$, m

Diese vorhandene Anrampungsneigung ist somit deutlich geringer als die nach den Trassierungsgrundsätzen (FGSV, 1995) erforderliche.

Die Längsneigung im Verwindungsbereich liegt zwischen $s_{q=q(-2)} = +2,33\%$ und $s_{q=q(2)} = +2,81\%$. Für die Überprüfung der Anforderung $s - \Delta s \geq 0,7\%$ (in der Fahrbahnmitte) ist also $s_{q=q(-2)}$ maßgebend. Der Vorgabewert ist mit $2,33 - 0,29 = 2,04\%$ eingehalten, sodass die vorhandene Längsneigung nicht als problematisch einzustufen ist.

3 SIMULATIONSMODELL

3.1 Wasserfilmdicken-Modell

3.1.1 Hydrologie

Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen der Wassermenge in einem Gebiet (bzw. eines Wasserpegels) wird als Hydrograph bezeichnet. Anhand der Kurve können 4 Phasen unterschieden werden (vgl. Abbildung 3-1)⁷:

1. Benetzung und Verlustphase

2. Aufstauphase

Aufstau des Wassers in einem Gebiet nach Einsetzen des Niederschlags.

Zufluss (Beregnung) > Abfluss

Mit zunehmender Fließhöhe beschleunigt sich der Abfluss; der Abfluss nimmt degressiv zu (bei konstantem Zufluss) bis ein Equilibrium erreicht ist:

3. Stationäre Phase

Zufluss = Abfluss

Die Wasserkonzentration hat ihr Maximum erreicht. Gleichzeitig sind die Fließkenngößen zeitlich invariant.

4. Ablaufphase

Zufluss < Abfluss

Die Regenintensität nimmt ab, oder ist – wie bei der Blockregen-Modellierung in Abbildung 3-1 – null.

Die Wasserkonzentration nimmt asymptotisch ab; Grenzwert ist die nicht abfließende Restwassermenge, die verdunstet oder durch Verkehr abtransportiert wird.

⁷ Die Beschreibung des hydrologischen Verlaufs ist auf die Aquaplaning-Fragestellung konzentriert und daher absichtlich stark vereinfacht (sonst s. auch ZIOR, 1987 bzw. IZZARD, 1942).

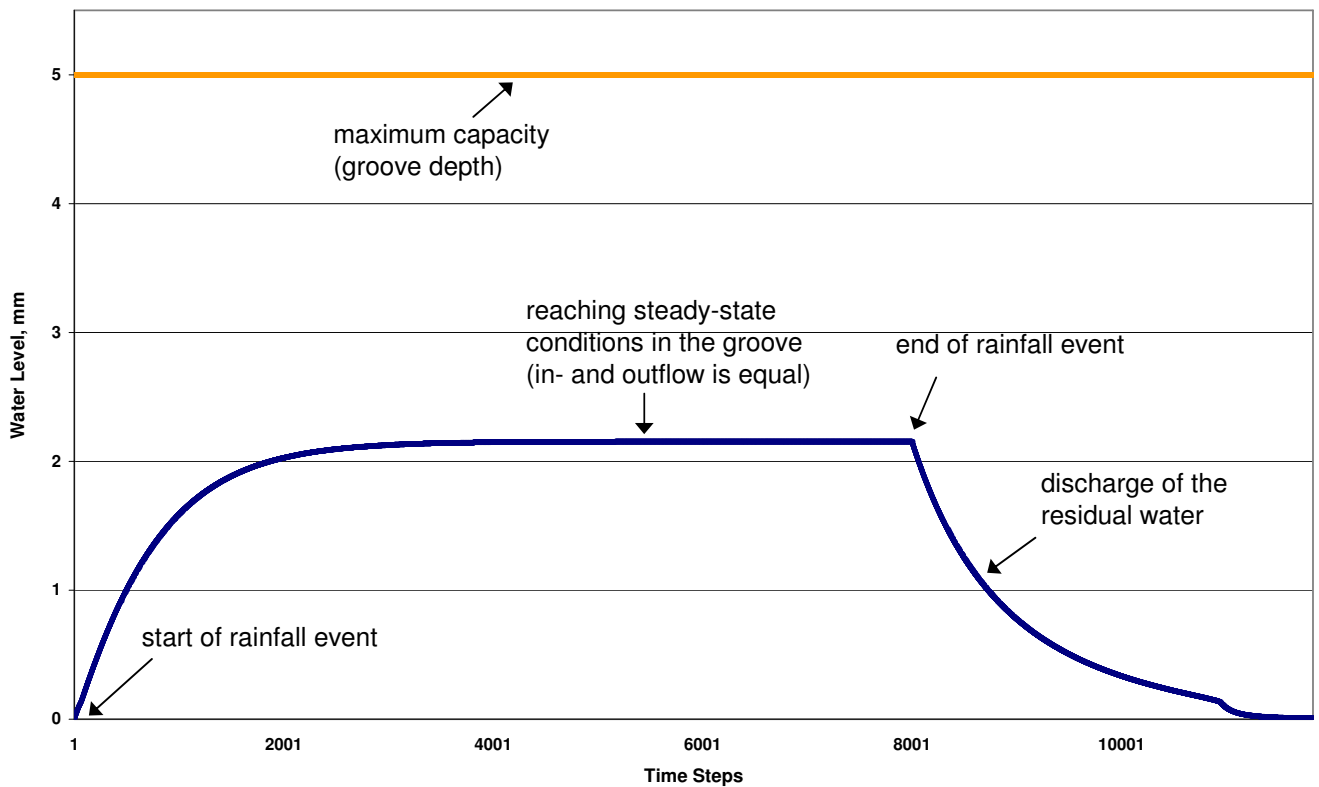


Abbildung 3-1: Phasen des Oberflächenabflusses; Simulierter Hydrograph (RESSEL, HERRMANN, 2006B)

Da für die Aquaplaning-Untersuchungen die Maximalwerte des Oberflächenabflusses ausschlaggebend sind, orientieren sich die Betrachtungen an der stationären Phase 3.

3.1.2 Wasserfilmdicken

Der Begriff „Film“ impliziert ein Medium konstanter Dicke und beliebiger Ausdehnung. Im Falle von Wasserfilmen auf Fahrbahnen trifft dies im Allgemeinen nicht zu, da die Fahrbahnoberfläche nicht ideal-glatt ist, sondern sich aus der zufälligen Verteilung von Rauheitselementen verschiedener Abmessungen zusammensetzt. Abbildung 3-2a zeigt den Zustand bei ideal-glatte Oberfläche. In Abbildung 3-2b ist die Wasserschicht teilweise von Rauheitselementen durchbrochen, teilweise liegt ein Film vor. In Abbildung 3-2c ist kein Film vorhanden.

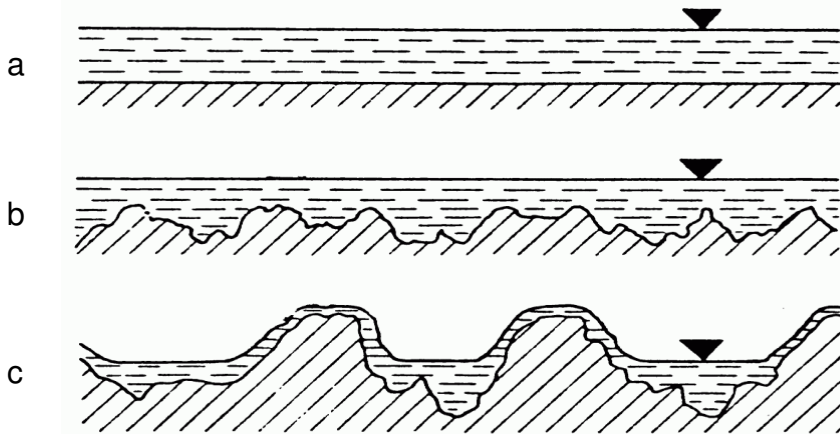


Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen Nässe und Rauheit von Fahrbahnoberflächen (schematisch) (HÖCKER, 1971)

Als Wasserfilmdicke wird demnach die vollständig ungestörte Schichtdicke oberhalb der Rauspitzen bezeichnet; dies entspricht der Definition der *bezogenen Wasserfilmdicke* nach HÖCKER (1971).

Daneben gibt es weitere Definitionen (vgl. RESSEL/HERRMANN, 2006A) wie die mittlere Wasserfilmdicke (HENNES, 1985), die Wasserfilmdicke mit ausgelitertem Bezugsniveau (ZIOR, 1987; HOLDERBAUM, 1978), die maßgebende Wasserfilmdicke (KALENDER, 1971), die repräsentative Wasserfilmdicke (SCHARSCHING, 1988) und die rechnerische Wasserfilmdicke (vgl. z.B. HOLZWARTH, 1996). Sie unterscheiden sich in der Lage und Art der Ermittlung ihres Bezugsniveaus. Nach der genannten Definition des Mediums „Film“ handelt es sich bei vielen auch nicht um Wasserfilme im eigentlichen Sinne.

Wird in Aquaplaning-Tests (z.B. Autozeitschriften, Reifenhersteller) der Begriff Wasserfilmdicke verwendet, dann ist meist die rechnerische Wasserfilmdicke gemeint. Nach ihrer Definition:

$$WFD_r = \frac{V}{A} \quad (3-1)$$

mit:

$$\begin{aligned} V &= \text{Wasservolumen im Gebiet } A, \text{ mm}^3 \\ A &= \text{Größe des Betrachtungsgebiets, mm}^2 \end{aligned}$$

entspricht sie der im Betrachtungsgebiet gemittelten Summe der Einzelwasserhöhen und ist damit streng genommen ebenfalls keine Filmdicke. Wegen der Einfachheit ihrer Ermittlung wird sie dennoch häufig verwendet.

(Dynamisches) Aquaplaning tritt jedoch genau dann ein, wenn jeglicher Reifen-Fahrbahn-Kontakt abgebrochen ist, d.h. Berührfläche Reifen-Rauspitzen ist null – vor diesem Fall spricht man vom viskosen Aquaplaning.

Auf Grund geometrischer Betrachtungen (s. Abbildung 3-3) kann die bezogene Wasserfilmdicke WFD_b aus der rechnerischen Wasserfilmdicke wie folgt abgeleitet werden:

$$WFD_b = \bar{h}_i - R_m = WFD_r - MTD \quad (3-2)$$

mit:

- \bar{h}_i = arithm. Mittelwert der Wasserhöhen, mm
 R_m = Rautiefe (Innerhalb eines Mess-Segments gemittelter Wert aller Textur-Extrema; vgl. DIN 4768), mm
 WFD_r = rechnerische Wasserfilmdicke, mm
 MTD = Mittlere Rautiefe (volumetrisch ermittelt, hier: mit dem Sandflächenverfahren gemäß KAUFMANN, 1971), mm

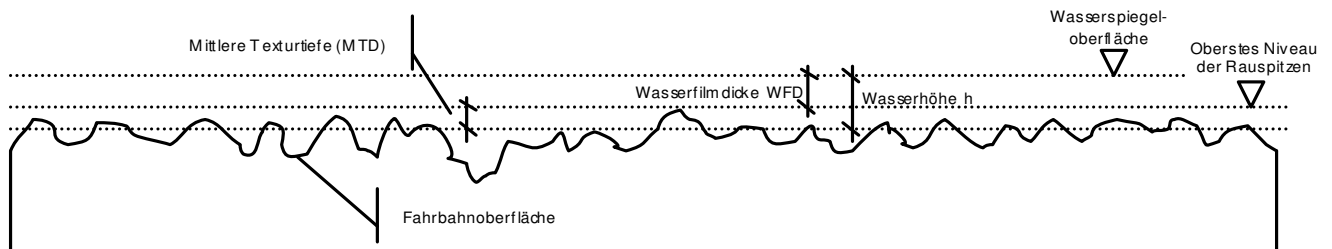


Abbildung 3-3: Zusammenhang zwischen bezogener und rechnerischer Wasserfilmdicke (Wasserhöhe)

Wobei jeweils WFD_r und MTD messtechnische Approximationen an die rein geometrischen Größen h_i bzw. R_m sind.

3.1.3 Oberflächenabfluss

Der Regenwasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen stellt eine Strömung mit freier Oberfläche dar und kann daher als Gerinneströmung interpretiert werden, für die gilt:

- Die Beregnung über die freie Oberfläche erzeugt einen kumulativen Zufluss längs des Abflussweges und einen stetigen Wassertiefenanstieg bis zum unteren Fahrbandrand.
- Durch den Regentropfeneintrag werden Widerstände im Strömungsverhalten hervorgerufen. Obwohl laminare Strömungsverhältnisse vorliegen, verursacht der Impulseintrag durch aufprallende Regentropfen örtlich begrenzte (Schein-)Turbulenzen.
- Bei makroskopischer Betrachtungsweise handelt es sich um eine Gerinneströmung mit quasi unendlich breitem Querschnitt; das Verhältnis von Breite des Abflussgebietes zur Wassertiefe strebt gegen unendlich ($B \gg h$).
- Die Wasserfilmdicken z.T. liegen in der Größenordnung der Rautiefen des Fahrbandbelages (Millimeterbereich).
- Wegen der sehr kleinen Wassertiefen und der geringen Abflussgeschwindigkeiten liegen Reynolds-Zahlen im Bereich von laminaren Strömungen vor.
- Hinsichtlich der Bewegungsform stellt die Wasserfilmströmung eine instationäre, ungleichförmige und diskontinuierliche Gerinneströmung in einem längs des Fließweges unveränderlichen (prismatischen) Gerinne dar.

- Die Sohlflächenneigung und Änderungen in der Sohlflächenneigung sind i.A. sehr gering. Sohlknicke – wie sie am Übergang der Verwindungsstrecke zur Strecke mit konstanter Querneigung auftreten – weisen nur geringe Neigungsdifferenzen auf.

3.1.4 Hydrodynamische Grundlagen

Das Modell für den oberflächigen Wasserabfluss basiert auf den Gleichungen der Massenerhaltung:

$$h \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i \quad (3-3)$$

und der Impulserhaltung:

$$g^{-1} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = I_S - I_E \quad (3-4)$$

mit:

h	=	Wasserhöhe, m
v	=	mittl. Fließgeschwindigkeit, m/s
i	=	Regenintensität, m/m
g	=	Gravitation, 9,81 m/s ²
I _S	=	Sohlgefälle, m/m
I _E	=	Energieliniengefälle, m/m

Die Impulsgleichung muss erweitert werden um die Einflüsse aus der Berechnung I_B. Durch die hinzukommenden Fluidteilchen ergibt sich ein erhöhter Energiebedarf für deren Beschleunigung in Fließrichtung. Der Quellterm findet sich damit im erhöhten Energieliniengefälle wieder.

Unter der Annahme, dass der Berechnungszufluss keine Eigengeschwindigkeit in Fließrichtung besitzt, gilt:

$$I_{B,1} = \frac{v \cdot i}{g \cdot h} \quad (3-5)$$

Weiterhin ergibt sich aus der kinetischen Fallenergie der Regentropfen, bzw. aus dem vektoriellen Anteil der Fallgeschwindigkeit in Fließrichtung:

$$I_{B,2} = \frac{v_r \cdot \cos \theta_x}{h} \quad (3-6)$$

mit:

v _r	=	Auftreffgeschwindigkeit der Regentropfen, m/s
θ _x	=	relativer Auftreffwinkel der Regentropfen (bezogen auf Fließrichtung), -

Das Energieliniengefälle ist somit

$$I_E = I_{B,1} + I_{B,2} \quad (3-7)$$

Kinematische Welle

Unter stationären Bedingungen kann der Abfluss als kinematische Welle betrachtet werden. Folglich gilt:

$$I_S = I_E \quad (3-8)$$

In diesem Fall ist die Fließgeschwindigkeit direkt von der Fließhöhe abhängig:

$$v = a \cdot h^{m-1} \quad (3-9)$$

mit:

- a = Widerstandskoeffizient
 m = Widerstandsexponent
 (a, m sind experimentell zu bestimmen)

und

$$h_{stat} = \left(\frac{l \cdot i}{a} \right)^{1/m} \quad (3-10)$$

mit:

- h_{stat} = Wassertiefe nach Erreichen von Stationarität, m
 l = Fließweglänge, m

Nach Umformen erhält man:

$$h = \left(\frac{a}{v} \right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (3-11)$$

sowie mit der DARCY-WEISBACH-Gleichung ($I_E = I_S$ und $R_{hy} = h$):

$$v = \left(\frac{8 \cdot g \cdot h \cdot I_S}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-12)$$

mit:

- λ = Widerstandsbeiwert, -

den Einfluss der Sohlneigung zu:

$$h = \left(\frac{a \cdot \lambda}{8 \cdot g \cdot h \cdot I_S} \right)^{\frac{1}{2m-2}} \quad (3-13)$$

woraus sich die Fließgleichung ergibt:

$$h = \left(\frac{1}{a} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{a}{8 \cdot g} \right)^{\frac{1}{2m-2}} \cdot \frac{(l \cdot i)^{\frac{1}{m}}}{I_S^{\frac{1}{2m-2}}} \cdot \left(\frac{\lambda}{h} \right)^{\frac{1}{2m-2}} \quad (3-14)$$

Fasst man die konstanten Terme zusammen im Koeffizienten

$$c = \left(\frac{1}{a} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{a}{8 \cdot g} \right)^{\frac{1}{2m-2}} \quad (3-15)$$

und die Rauigkeitskomponente zu

$$R = \left(\frac{\lambda}{h} \right)^{\frac{1}{2m-2}} \quad (3-16)$$

so stellt sich die Fließgleichung wie folgt dar:

$$h = c \cdot \frac{(l \cdot i)^{\frac{1}{m}}}{I_S^{\frac{1}{2m-2}}} \cdot R \quad (3-17)$$

Durch die Berechnungsversuche wurde folgender Zusammenhang ermittelt:

$$h = 0,1942 \cdot \frac{(l \cdot i)^{0,4158}}{I_S^{0,3289}} \cdot k_S^{0,1752} \quad (3-18)$$

mit:

k_S = äquivalente Sandrauigkeit (nach NIKURADSE), mm

Der durch m vorgegebene Zusammenhang zwischen den Exponenten für $(l \cdot i)$ und I_S wird durch die Versuchsergebnisse sehr gut erreicht:

$$\frac{1}{2 \cdot m - 2} = \frac{1}{2 \cdot (0,4158^{-1}) - 2} = 0,3559 \cong 0,3289 \quad (3-19)$$

Instationäre Lösung

Neben der kinematischen Welle kann der 1-dimensionale Abfluss auch instationär gerechnet werden. Im Energieliniengefälle I_E ist dann zudem eine Erhöhung durch die Rauheitseinflüsse I_R berücksichtigen. Hierfür gilt:

$$I_R = \lambda \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (3-20)$$

mit:

- λ = Widerstandsbeiwert, -
 D = hydraulischer Durchmesser, m

Für das hier vorliegende, unendlich breite Rechteckgerinne ($B \gg h$) entspricht die Wassertiefe dem hydraulischen Radius. Damit ergibt sich:

$$D = 4 \cdot R_{hy} = 4 \cdot h \quad (3-21)$$

mit:

- R_{hy} = hydraulischer Radius, m
 (= $4 \cdot D$)
 h = Wasserhöhe, m

Weiterhin ist:

$$\lambda = \frac{C}{Re} \quad (3-22)$$

mit:

- C = Laminarkonstante, -
 Re = REYNOLDS-Zahl, -

Die Definitionsgleichung für die REYNOLDS-Zahl lautet:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \text{ bzw. } Re = \frac{4 \cdot v \cdot h}{\nu} \quad (3-23)$$

mit:

- v = Fließgeschwindigkeit, m/s
 ν = kinematische Viskosität, m^2/s

Somit ergibt sich der Einfluss der Rauheit auf die Energiehöhe zu:

$$I_R = \frac{C \cdot v}{16 \cdot h^2} \cdot \frac{v}{2 \cdot g} \quad (3-24)$$

Die Gleichung enthält neben Konstanten ν und g noch h , $v = F(h)$ und C . In C ist der Rauheitseinfluss eingebunden.

Nach HOLDERBAUM (1978) setzt sich C zusammen aus dem laminaren Grundterm $C_0 = 96$, sowie C_1 für den Einfluss der Rauheit und C_2 für den Einfluss aus der Berechnung, mithin:

$$C = C_0 + C_1 + C_2 \quad (3-25)$$

Die Bestimmung von C_1 und C_2 kann nach den Ansätzen von HOLDERBAUM (1978) durch Regression auf Basis der durchgeführten Beregnungsversuche erfolgen.

3.1.5 Eindimensionale Flussmodellierung

Die Modellierung erfolgt eindimensional separat auf jeder einzelnen Falllinie unter Anwendung entweder der kinematischen Welle-Gleichung oder durch Lösung der ST.-VENANT-Bewegungsgleichungen für instationären, ungleichförmigen Abfluss.

Kinematische Welle

Mit der Grundstruktur für die Fließgleichungen von:

$$h = c \cdot (l \cdot i)^\alpha \cdot I_s^\beta \cdot R^\gamma \quad (3-26)$$

mit:

c = Koeffizient

α, β, γ = Exponenten

R = Rauheitskenngroße

(je nach Gleichungstyp: $R = \{k_S; t_{\text{moore}}; \text{MTD}\}$, multivariat

kann in Abhängigkeit des Fahrbahnbelags oder der Rauheitskenngroße (für Beispiele aufgelistet in Tabelle 3) die entsprechende Fließgleichung angewandt werden.

Fahrbahnbelag	c	α	β	γ
Zementbeton, Jutetuch-Textur	0,07489	0,5412	-0,3963	-
Zementbeton, Kunstrasen-TEX	0,32044	0,4064	-0,2637	-
Gussasphalt 0/8	0,39369	0,3941	-0,3079	-
Splittmastixasphalt 0/11, mit Splittabstreuerung 2/5	0,24114	0,4422	-0,3491	-
Splittmastixasphalt 0/8, mit Splittabstreuerung 1/3	0,25866	0,3783	-0,3652	-
alle Beläge (k_S [mm])	0,19422	0,4158	-0,3289	0,1752
alle Beläge (t_{moore} [s])	0,29371	0,4157	-0,3317	-0,1608
alle Beläge (MTD [mm])	0,26334	0,4158	-0,3314	0,4177

Tabelle 3: Parameter für das Kinematische Welle-Modell (RESSEL/HERRMANN, 2006A)

3.2 Aquaplaning-Modell

3.2.1 Grundlagen

Der Begriff *Aquaplaning* ist eine lateinisch-englische Kombination aus den Worten *Aqua* (*Wasser*) und *to plane* (*gleiten*), auf deutsch also *Wassergleiten*. Während in Europa der Begriff *Aquaplaning* verwendet wird (auch im britischen Englisch), ist im amerikanischen Englisch das Synonym *Hydroplaning*, abgeleitet vom griechischen Wort für Wasser, *Hydro*, gängig.

In Deutschland gibt es seit 1968 eine offizielle Begriffsdefinition im „Merkblatt über Straßen-griffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe“ (FG, 1968):

„Unter *Aquaplaning* – wörtlich *Wassergleiten* – versteht man das Aufschwimmen des auf nasser Fahrbahn mit sehr hoher Geschwindigkeit rollenden Kraftfahrzeugreifens auf einem Wasserkeil infolge des Entstehens eines hydrodynamischen Drucks, der größer ist als die Flächenpressung in der Reifenaufstandsfläche.“

Die Modellvorstellung, die dieser Definition zu Grunde liegt, ist das Staudruckmodell, welches auf der klassischen 3-Zonen-Theorie aufbaut.

Es existiert eine Reihe von Staudruckmodellen, die sich aber nur wenig unterscheiden.

Für den Begriff *Aquaplaning* sind in der Literatur weitere Verfeinerungen zu finden. MOORE (1965) differenziert das *Aquaplaning*-Phänomen von Luftreifen in zwei Erscheinungsformen:

- *dynamisches Aquaplaning* und
- *viskoses Aquaplaning*.

Dynamisches Aquaplaning entsteht, wenn ein hinreichend dicker Wasserfilm vorliegt, welcher den Reifen durch die hydrodynamischen Hubkräften der Wasserfront vor dem Reifen am Absinken hindert, sodass in der verfügbaren Zeit kein Fahrbahnkontakt mehr hergestellt werden kann.

Auch dünne Wasserfilme können zu *Aquaplaning* führen, hierbei ist jedoch die Mikrotextur der Fahrbahn entscheidend, die die zum Durchbrechen des dünnen Wasserfilms erforderliche Schärfe bereitstellt. Das Durchbrechen der Grenzschicht (das Auspressen des in der Kontaktfläche verbleibenden dünnen Wasserfilms) ist ein viskoser Vorgang, bei dem die Einsinkdauer umgekehrt proportional zur verbleibenden Filmstärke ist. Gelingt es auf Grund mangelnder Mikrotextur nicht, die Grenzschicht zu durchbrechen, so spricht man vom *viskosen Aquaplaning*.

Streng genommen dürfte man bei viskosem *Aquaplaning* gar nicht von *Aquaplaning* sprechen, da dieser Begriff das Gleiten auf einer geschlossenen Wasserschicht impliziert, die bei örtlichem Durchbrechen des Films nicht mehr geschlossen ist.

Von HORNE (1968) wurde diese Einteilung um eine dritte *Aquaplaning*-Kategorie ergänzt, dem

- *tire-tread-rubber reversion hydroplaning*,

welches auf der beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt durch Reibung entstehenden Erwärmung beruht. Durch die Erwärmung schmilzt Reifengummi in der Kontaktfläche und wird in seinen ursprünglichen Zustand umgewandelt. Dieses Phänomen ist nur bei sehr hohen Geschwindigkeiten zu beobachten, wie sie z.B. bei Flugzeugen auftreten, für den Straßenverkehr ist es nicht von Belang.

3.2.2 3-Zonen-Theorie

Nach dem 3-Zonen-Modell von GOUGH (1958) werden unter der Reifenaufstandsfläche drei Zonen unterschieden (vgl. Abbildung 3-4).

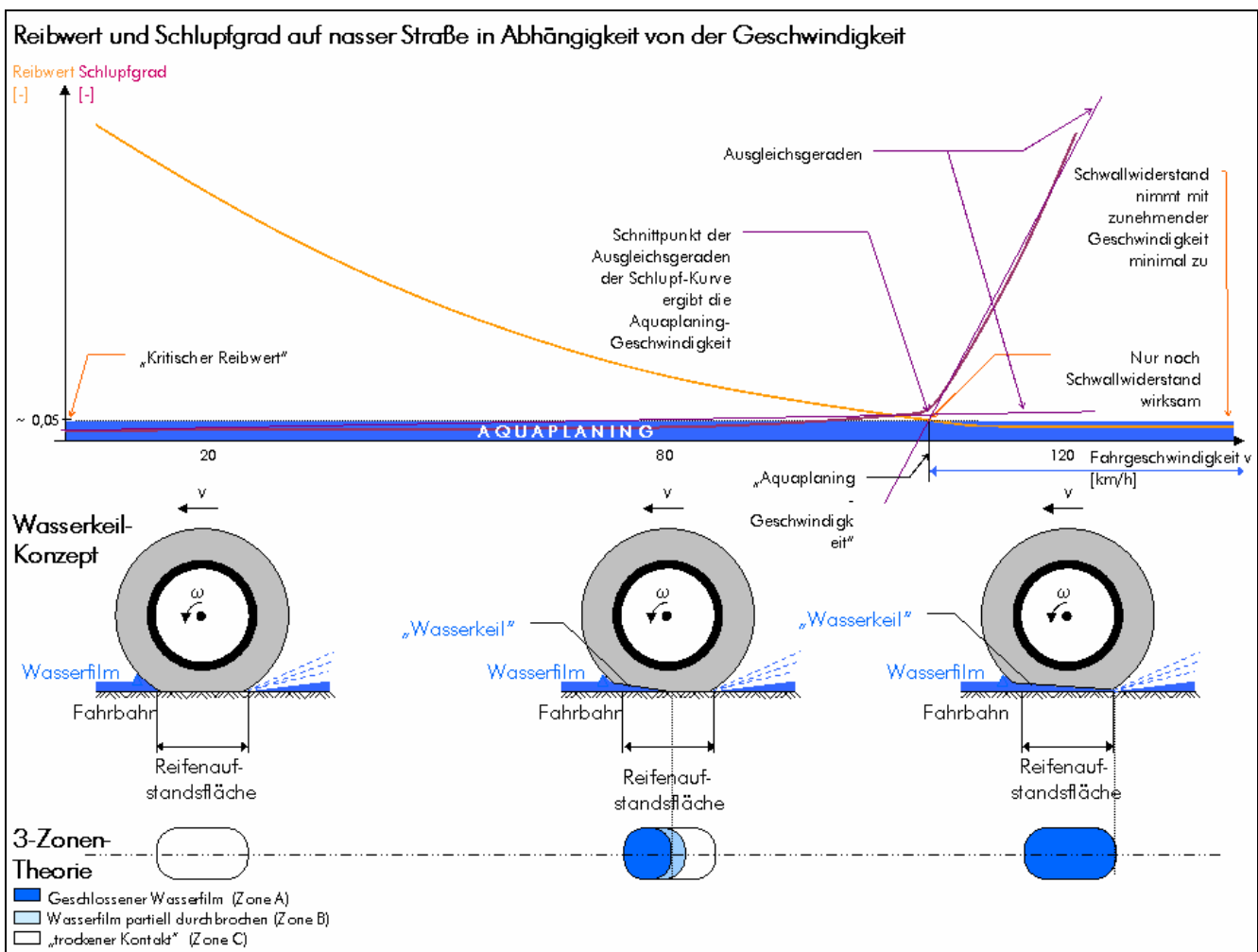


Abbildung 3-4: Modellvorstellungen zur Erklärung des Aquaplaning. Oben: Ermittlung der Aquaplaning-Geschwindigkeit aus Reibwert- und Schlupfgradmessungen; Mitte: Wasserkeil-Konzept; Unten: 3-Zonen-Theorie

In der Annäherungs- bzw. Einlaufzone A liegt ein geschlossener Wasserfilm zwischen Reifen und Fahrbahn vor, über den keine Reibungskraftübertragung Reifen/Fahrbahn mehr stattfinden kann.

In der *Übergangszone B* wird der Film teilweise von Rauheitselementen der Fahrbahnoberfläche durchbrochen, teilweise schmiegen sich die Gummielemente um einzelne Oberflächenelemente herum an. Dies bedeutet, es liegt eine Mischform zwischen Grenzschichtkontakt (entsprechend Reibung auf nasser Fahrbahn) und hydrodynamischen Verhältnissen (Aquaplaning) vor. Bezogen auf ein einzelnes Profilelement kann aber jeweils nur eine der beiden Formen wirksam werden.

Die *Kontaktzone C* entspricht den Kontaktverhältnissen bei angenässter Fahrbahn (quasi-trockener Kontakt), daher herrscht hier Grenzschichtreibung.

Das Auftreten von Aquaplaning ist ein Grenzfall des mit dem 3-Zonen-Modell erklärten Vorganges der Verminderung des Reibwerts infolge Nässe. Er tritt dann ein, wenn sich die Zone A über die gesamte Reifenaufstandsfläche erstreckt.

3.2.3 Staudruckmodelle

Dieses erste Rechenmodell geht auf W.B. HORNE (1963) zurück und basiert auf der Grundvorstellung des 3-Zonen-Modells. Als ein rein hydrostatisches⁸ Modell geht das Staudruckmodell von einem dynamischen Staudruck⁹ in der Zone A aus, dessen resultierende Hublast mit zunehmendem Flächenanteil der Zone A größer wird. Die Grundidee des Modells geht davon aus, dass bei einer Ausdehnung der Zone A über die gesamte Reifenaufstandsfläche Kräftegleichgewicht zwischen Hubkraft und (der aus der Fahrzeugmasse resultierenden) Radlast herrscht und der Reifen aufschwimmt. Über die Auswertung der wirkenden Spindown-Momente lässt sich damit eine quantitative Beziehung zwischen Aquaplaning-Geschwindigkeit und dem mittleren Kontaktdruck herstellen. Der Hubkoeffizient C_H zur Berechnung der Hubkraft ist experimentell zu ermitteln und dient dazu, resultierende Formel zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit mit direkten Messungen des Wasserdrucks zwischen Reifen und nasser Fahrbahn zu eichen. Hierbei ist zu kritisieren, dass dieser Hubkoeffizient nicht definiert wird und seine Herkunft unklar bleibt. Nach BATHELT (1971) kommt die gute Übereinstimmung zwischen direkten Messungen und den Berechnungen mit der Schätzformel des Staudruckmodells nur durch die entsprechende Wahl des Hubkoeffizienten zustande.

MOORE (1965) geht von denselben Grundannahmen aus, er gibt die Hubkraft F_{ii} an zu:

$$F_{ii} = \frac{\rho \cdot B_{ii} \cdot V^2 \cdot R \cdot \lambda}{3g} \quad (3-27)$$

mit:

ρ = Rohdichte des Wassers
 B_{ii} = Reifenbreite

⁸ Das lokale Bezugssystem sei in die Drehachse des Rades versetzt.

⁹ Aus der Relativbewegung des Reifens zur Fahrbahn resultierend und damit geschwindigkeitsabhängig.

V	=	Fahrgeschwindigkeit
R	=	Reifenradius
λ	=	geometrischer Faktor
g	=	Gravitation

Unter Bedingung, dass:

$$\sqrt{\frac{F_{ti}}{B_{ti}}} = \sqrt{\frac{p_m}{L_m}} \quad (3-28)$$

mit:

p_m	=	mittlerer Kontaktdruck
L_m	=	mittlere Reifenlänge

ergibt sich nach Ersetzen aller Konstanten durch κ für alle Staudruckmodelle eine Lösung der Form:

$$V_{aq} = \kappa \cdot \sqrt{p} \quad (3-29)$$

Bei den Staudruckmodellen ist die Aquaplaning-Geschwindigkeit unabhängig von Wasserfilmdicke und Reifenprofiltiefe.

3.2.4 Aquaplaning-Modell nach GENGENBACH und HÖCKER

Dieses Modell basiert auf dem Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke und Aufschwimm-Geschwindigkeit für glatte, profillose Reifen, für die GENGENBACH (1967) den folgenden Zusammenhang angegeben hat:

$$V_{aq} = 5080 \cdot \sqrt{\frac{F_{ti}}{B_{ti} \cdot WFD \cdot C_H}} \quad (3-30)$$

mit:

V_{aq}	=	Aquaplaning-Geschwindigkeit, km/h
F_{ti}	=	Radlast, kN
B_{ti}	=	Breite der Reifenaufstandsfläche, mm
WFD	=	Wasserfilmdicke, mm
C_H	=	Auftriebsbeiwert

Der Auftriebsbeiwert C_H errechnet sich dabei zu:

$$C_H = 46 \cdot \left(\frac{F_{ti}}{F_{ti,zul}} \right)^{-1,342} \quad (3-31)$$

mit:

$$F_{ti} / F_{ti,zul} = \text{Auslastung des Reifens}$$

Von HÖCKER (1971) wurde das Modell um die Möglichkeit der Erfassung profilloser Reifen. Er ging dabei von der geometrischen Modellvorstellung aus, dass sich ein profilierter Reifen, dessen Rillen voll gelaufen sind, bei weiterem Wasserandrang und höheren Geschwindigkeiten wie ein profilloser Reifen verhält. Die Menge an Wasser, die zwischengespeichert werden kann, hängt demnach vom Profilvervolumen des Reifens ab. Bei gegebenem Negativanteil nimmt die aufnehmbare Wassermenge linear mit der Profiltiefe zu. Die vorhandene, bezogene Wasserfilmdicke muss also um diesen Wert abgemindert werden. Gleichzeitig wird die tatsächliche Reifenprofiltiefe um 0,8 mm abgemindert, um die Eindringtiefe des Reifenprofils in die Rauspitzen der Fahrhahnoberfläche zu erfassen (Mittelwert aus verschiedenen Radlasten und Fahrhahobelägen). Damit ergibt sich Gleichung

$$WFD^* = WFD - \Psi \cdot (t - 0,8\text{mm}) \quad (3-32)$$

mit:

WFD^*	=	reduzierte Wasserfilmdicke, mm
Ψ	=	Negativanteil des Reifenprofils, -
t	=	Reifenprofiltiefe, mm

die in obige Gleichung einzusetzen ist.

3.2.5 Aquaplaning-Modell nach GALLAWAY ET AL.

GALLAWAY ET AL. (1979) fanden mittels multipler linearer Regression aus 1.038 Datensätzen ($R^2=0,85$) eine Gleichung für die Aquaplaning-Geschwindigkeit heraus, die für Wasserfilmdicken $> 2,5$ mm anwendbar ist:

$$V_{aq} = 3,59 \cdot S^{0,04} \cdot p^{0,3} \cdot (1,26 \cdot t + 1)^{0,06} \cdot \max \left[\begin{array}{l} \frac{12,639}{WFD^{0,06}} + 3,507 \\ \left[\frac{22,351}{WFD^{0,06}} - 4,97 \right] \cdot MTD^{0,14} \end{array} \right] \quad (3-33)$$

mit:

V_{aq}	=	Aquaplaning-Geschwindigkeit, km/h
WFD	=	Wasserfilmdicke, mm
MTD	=	Mittlere Texturtiefe ¹⁰ , mm
S	=	Schlupfgrad, %

¹⁰ Ermittelt nach der putty impression method (ROSE/GALLAWAY/HANKINS, 1970). Die Werte stimmen näherungsweise mit dem Sandflächenverfahren nach KAUFMANN (1972) überein.

- p = Reifendruck, bar
- t = Reifenprofiltiefe, mm

Von den beiden Schlusstermen ist jeweils der Maximalwert zu verwenden.

Für Wasserfilmdicken < 2,5 mm (0,1 in) wurde in dieser Untersuchung eine auf den Versuchen von AGRAWAL et al. (1977) basierende Regressionsgleichung angegeben, deren Korrelationskoeffizient 0,82 beträgt. Der Exponent in der Gleichung wurde sachlogisch auf den Versuchen von GENGENBACH (1968) gegründet.

$$V_{aq} = 54,26 + 42,84 \cdot WFD^{-0,5} \tag{3-34}$$

Von REED et al. (1984) wurde eine Gleichung mit demselben Korrelationskoeffizienten 0,82 gefunden, die aber einem „reinen“ Exponenten-Modell entspricht:

$$V_{aq} = 96,9 \cdot WFD^{-0,259} \tag{3-35}$$

Der weitere Vorteil dieser Form ist, dass sich an der Übergangsstelle der Gültigkeitsbereiche kein Versatz (Sprung) bildet, sondern dass die Kurven ineinander übergehen (jedoch mit Knick).

Abbildung 3-5 wurde mit den Werten p = 1,8 bar, S = 10% und t = 2 mm gerechnet; in Abbildung 3-6 wurde die Reifenprofiltiefe variiert.

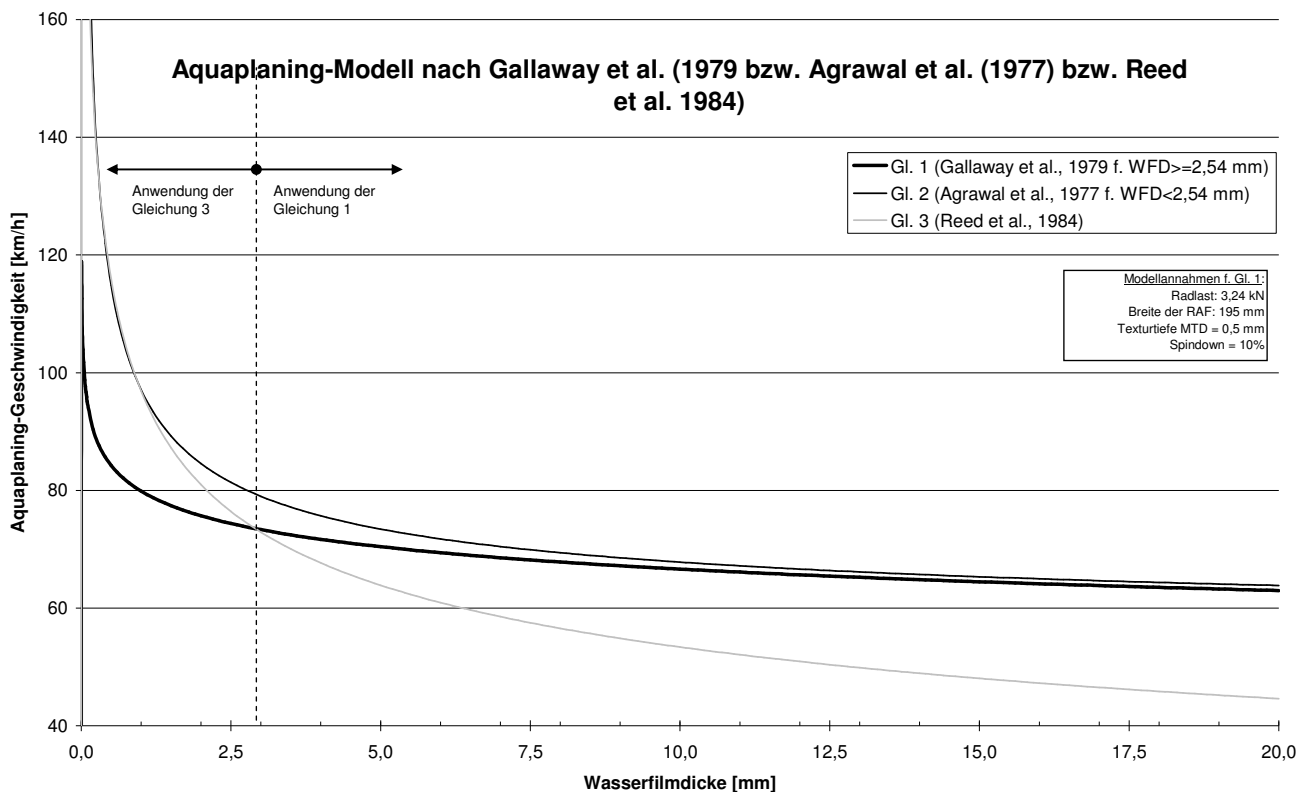


Abbildung 3-5: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke, nach GALLAWAY ET AL. AGRAWAL ET AL. und REED ET AL.

Die Kurven streben mit zunehmender Wasserfilmdicke einen Grenzwert von ca. 60 km/h an; Unterhalb von 2,5 mm Wasserfilmdicke gibt es keinen Einfluss der Reifenprofiltiefe, da die

Gleichung von REED ET AL. angewandt wird, oberhalb von 2,5 mm ist der Einfluss der Reifenprofiltiefe unabhängig von der Wasserfilmdicke.

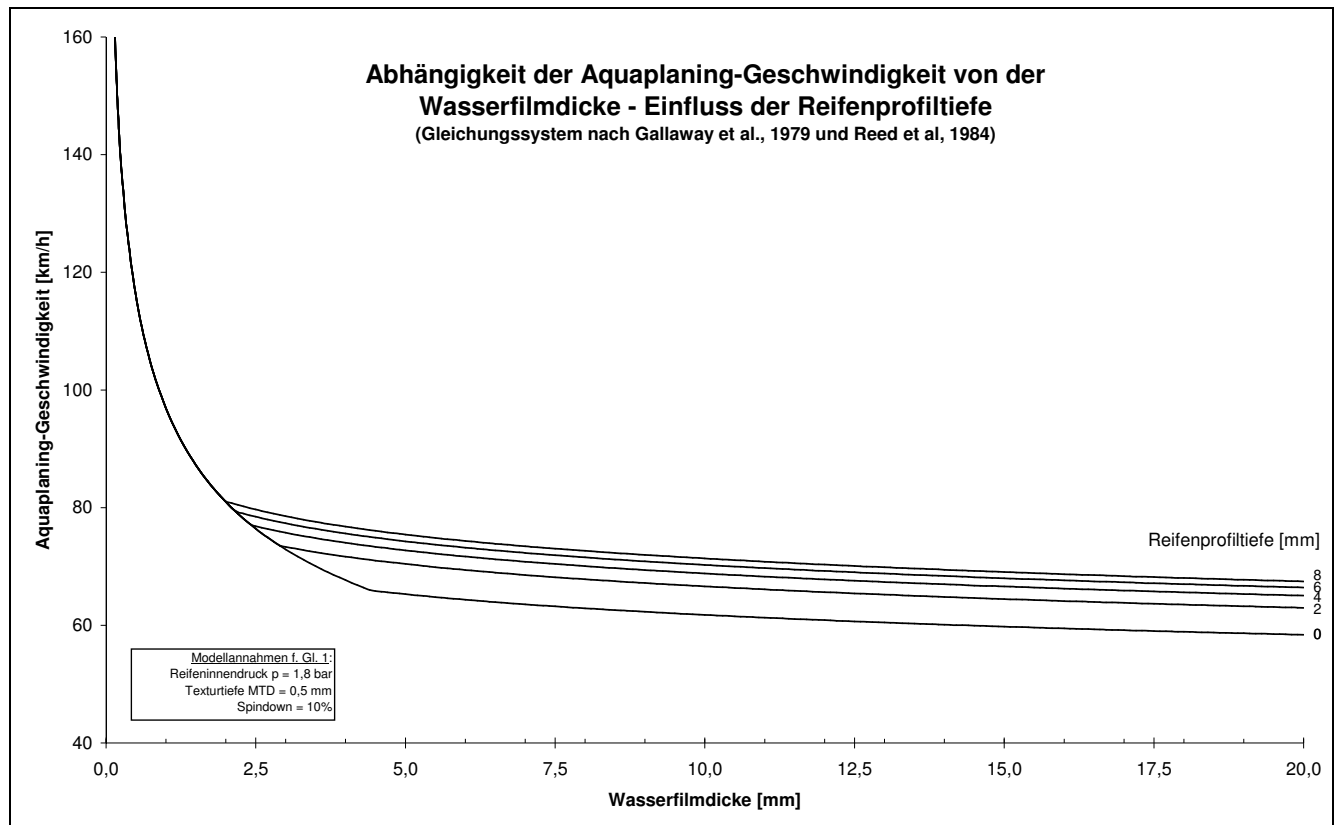


Abbildung 3-6: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke Einfluss der Reifenprofiltiefe, nach GALLAWAY ET AL. AGRAWAL ET AL. und REED ET AL.

3.2.6 Modellbildung

Zur Bildung des Simulationsmodells waren folgende Erkenntnisse von Bedeutung:

- Es existiert nur eine begrenzte Auswahl an Untersuchungen über den direkten Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdickenverteilung und der daraus ableitbaren Aquaplaning-Geschwindigkeit. Forschungen aus dem Kraftfahrzeugwesen konzentrieren sich oftmals auf den Kraftschluss bei Nässe, wobei das Ausmaß der Nässe oft deutlich geringer ist, als es zum Erreichen des Aquaplaning-Effekts sein sollte. Die Untersuchungen reichen höchstens in den Grenzbereich zwischen viskosem und dynamischem Aquaplaning. Die so ermittelten Reibwerte sind daher meist zu hoch, um auf das Vorhandensein von Aquaplaning hinzudeuten und aus den verfügbaren Versuchsergebnissen Modelle ableiten zu können.
- Die Modelle, die es heute gibt, basieren meist auf älteren Voraussetzungen, z.B. heute nicht mehr verwendete Reifenprofile. Da neuere Erkenntnisse fehlen, werden diese Modelle auch heute noch angewandt.
- Die beiden die Wasserfilmdicke als Einflussfaktor beinhaltenden Modelle von GENGENBACH und GALLAWAY ET AL. (Kap. 3.2.4 und 3.2.5) weichen in ihren Ergebnissen grundlegend voneinander ab. Bei GENGENBACH fällt der niedrige Grenzwert für einen

beginnenden Kontaktverlust von Reifen und Fahrbahn von ca. 30 km/h auf, gegenüber ca. 60 km/h bei GALLAWAY ET AL..

- In einer neueren Untersuchung gibt KRATOCHWILL (1996) als praxisrelevante Geschwindigkeit, ab der beim profillosen Reifen das Aquaplaning beginnt, ca. 50 km/h an; bei ca. 100 km/h ist der Reifen vollständig aufgeschwommen. Dies kommt den Ergebnissen von GALLAWAY ET AL. nahe.
- Um den tatsächlichen Verlauf der WFD-Vaq-Kurven mit empirischen Erkenntnissen zu vergleichen, wurden verschiedene Veröffentlichungen zum Reibwertverhalten untersucht. Verwendbar waren jedoch nur die Veröffentlichungen, die
 - a) eine möglichst hohe Variation der Einflussfaktoren Wasserfilmdicke und/oder Reifenprofiltiefe hatten und
 - b) mit für Reibwertmessungen unüblich hohen Wasserfilmdicken operierten (> 2 mm).

Folgende Untersuchungen konnten schließlich in Betracht gezogen werden: KALENDER (1986), FACH (1996), GNADLER (1980), DAMES (1975). Die jeweiligen Testkonfigurationen sind in App. A.1a aufgeführt.

In Abbildung 3-7 (größer und mit Legende in App. A.1 abgebildet) sind die Ergebnisse zusammengefasst. Je nach Angaben der Werte in der jeweiligen Veröffentlichungen konnten durchgezogene Kurven (KALENDER und GNADLER), abgestufte Plateaus (DAMES) oder einzelne Punkte angegeben werden (FACH). In den Ergebnissen nach GNADLER sind keine Aquaplaning-Geschwindigkeiten angegeben, sondern Reibwerte. Die Ergebnisse wurden so umgerechnet, dass Aquaplaning mit einem Reibwiderstand von $\mu = 0,15$ gleichgesetzt wurde.

Wie zu erkennen ist, stimmen die einzelnen Ergebnisse im Gesamtbild - trotz teilweise verschiedener Erhebungsmethodik - in Höhenlage und Verlauf gut überein.

Für *neue Reifen* ($t = 8$ mm) liegen die Kurven nach KALENDER und DAMES sehr eng beieinander. Auch die Punktwerte nach FACH streuen um den Bereich der KALENDER-Kurve.

Für *gebrauchte Reifen* ($t = 4$ mm) stimmen die Kurve nach KALENDER und die Punktwerte nach FACH gut überein. Ebenso die Kurven nach GNADLER für $\mu = 0,15$.

Für *profillose Reifen* ($t = 0$ mm) liegt die Kurve nach DAMES in der Größenordnung der Kurve für gebrauchte Reifen nach KALENDER (für WFD = 5...6 mm sogar dicht an der Kurve nach KALENDER für neue Reifen). Die Punktwerte nach FACH liegen stärker von den Werten nach DAMES entfernt. Dies ist jedoch durch die deutlich abweichenden Erhebungstechniken erklärbar und schränkt die Aussagekraft der ausgewählten Untersuchungen nicht ein.

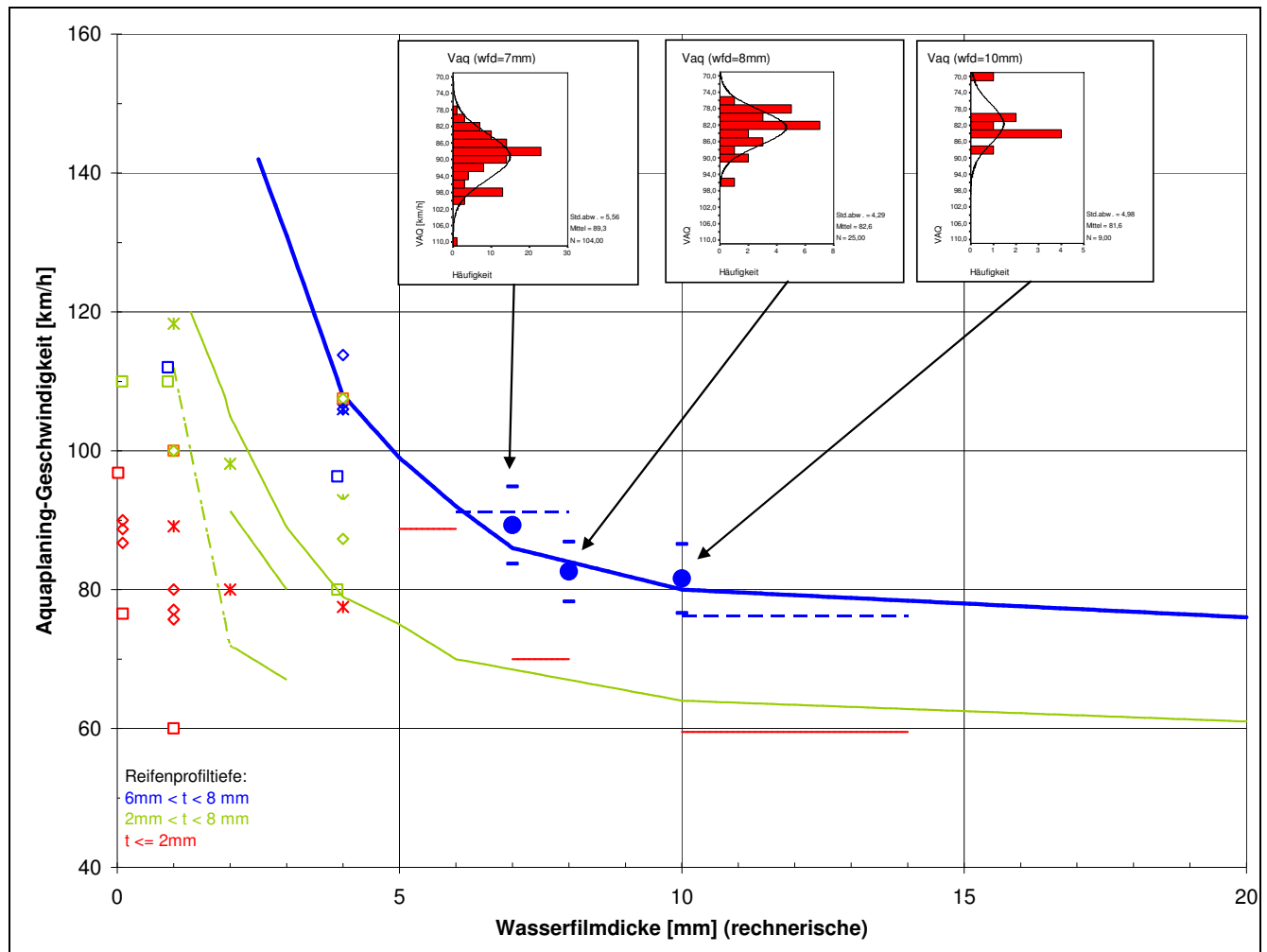


Abbildung 3-7: Aquaplaning-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke und der Reifenprofiltiefe (Zusammenstellung unterschiedlicher Untersuchungen)

Mit Ausnahme der Untersuchung von FACH (1996) sind die meisten gefundenen Tests schon älter, dennoch stellen die Untersuchungen in der Summe eine befriedigende Datenbasis für die getroffenen Aussagen dar. Diese könnte jedoch deutlich breiter ausfallen, wenn nicht die Obergrenze von 1 mm Wasserfilmdicke bei den meisten Tests vorhanden wäre.

Um die bereits älteren Testreihen mit einer neueren Datenbasis abzugleichen und so die Sicherheit der Aussagen zu erhöhen, wurden aus einer großen Auswahl von Reifentests die Aquaplaning-Ergebnisse analysiert.

Der Vorteil dieser Reifentests ist, dass stets Ergebnisse für die neuesten auf dem Markt befindlichen Reifentypen vorliegen. Dagegen wird die Vergleichbarkeit der einzelnen Testreihen dadurch eingegrenzt, dass die Versuchsparameter nicht einheitlich sind. Eine Rolle spielen können z.B. die Fahrer-, Fahrzeug-, Fahrbahneigenschaften sowie die Witterungsbedingungen. Außerdem können sich geringfügige Abweichungen durch unterschiedliche Messverfahren ergeben. Gut vergleichbar sind dagegen die diversen Reifeneigenschaften (mit Ausnahme des Reifeninnendrucks), da Reifentests stets mit Neureifen durchgeführt werden.

Ausgewertet wurden somit 36 Testreihen mit insgesamt 317 verschiedenen Reifentypen, vgl. App. A.1b, sowie 3 Testreihen der Firma Pirelli aus dem Jahr 2000) mit insgesamt 42

getesteten Reifen. Die Parameter Aquaplaning-Geschwindigkeit, Wasserfilmdicke, Reifentyp (Breite, Querschnittsverhältnis, Profiltiefe, Winter-/Sommerreifen), Testfahrzeug und Fahrzeuggewicht wurden erfasst.

Die Ergebnisse der Reifenauswertungen wurden als Häufigkeitsverteilungen für die Klassen 7, 8 und 10 mm Wasserfilmdicke in Abbildung 3-7 (resp. App. A.1) eingefügt. Die Häufigkeitsverteilungen (kleine Diagramme) in jeder der Klassen sind deutlich symmetrisch ausgebildet. Für eine Wasserfilmdicke WFD von 7 mm betrug die mittlere Aquaplaninggeschwindigkeit $V_{aq} = 89,3$ km/h (Standardabweichung 5,56 km/h), für WFD = 8 mm war $V_{aq} = 82,6$ km/h ($\pm 4,29$ km/h) und für WFD = 10 mm war $V_{aq} = 89,3$ km/h ($\pm 4,98$ km/h).

Wie zu erkennen ist, stützen die Reifentests die Kurvenverläufe der anderen Untersuchungen und erhöhen somit zum Einen die Gesamtaussagekraft, sichern aber in besonderem Maße auch die Übertragbarkeit auf heute marktüblichen Reifentypen.

In Abbildung 3-8 ist das Aquaplaning-Modell nach GENGENBACH und HÖCKER (schwarz) über die ausgewerteten Versuchsreihen (grau) gelegt. Die Aussagekraft des Modells befindet sich nach den Autoren im Bereich $0 \text{ mm} < \text{WFD} \leq 2 \text{ mm}$. Im Bereich über 2 mm Wasserfilmdicke sind die Kurven daher schwarz gestrichelt eingetragen. Der Vergleich mit den erhobenen Werten zeigt eine gute Übereinstimmung für den von den Autoren genannten Bereich.

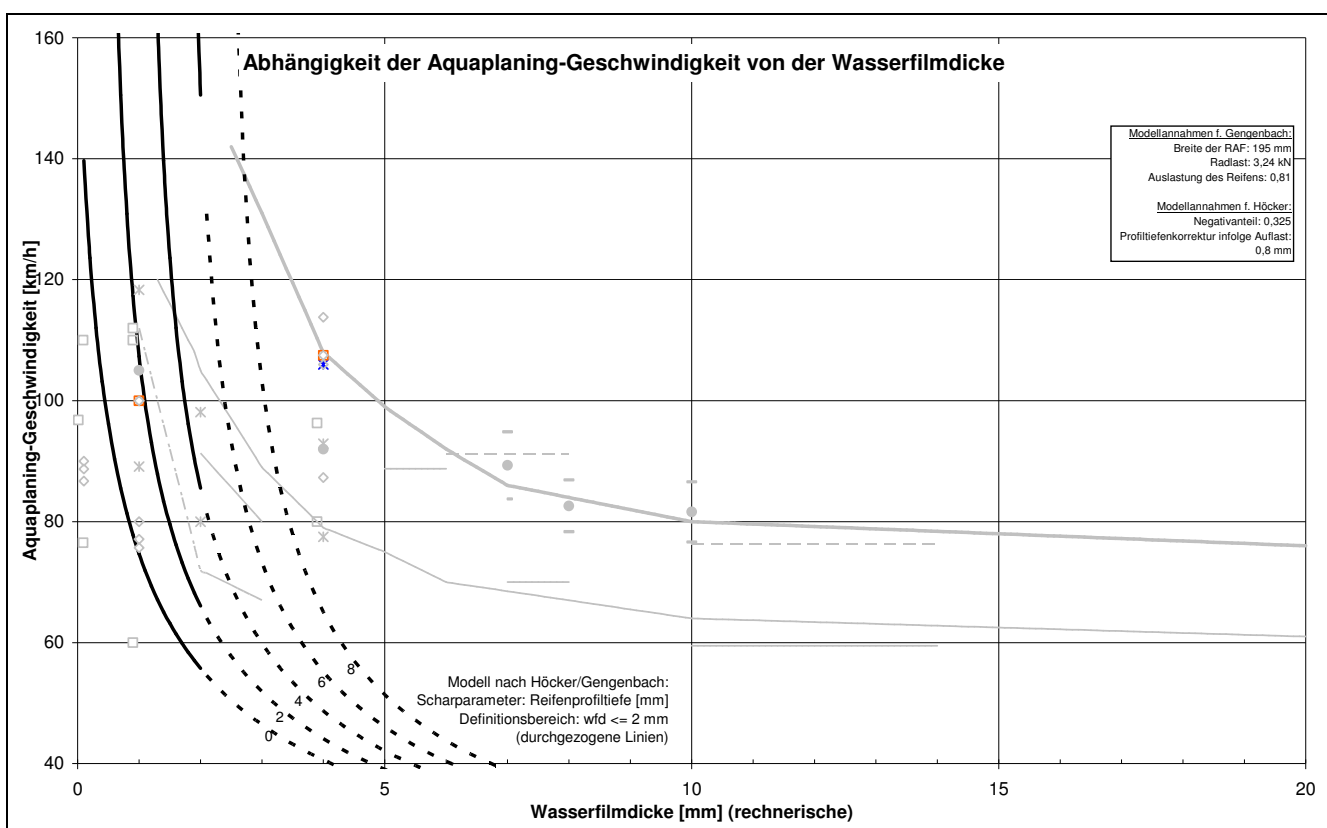


Abbildung 3-8: Aquaplaning-Modell nach GENGENBACH und HÖCKER im Vergleich mit agglomerierten Testauswertungen

In Abbildung 3-9 wurde das Modell nach GALLAWAY ET AL. und REED ET AL. über die Testauswertungen gelegt. Das Modell bildet die erhobenen Werte besonders im unteren Bereich der Reifenprofiltiefe sehr genau ab. Bei höheren Reifenprofiltiefen liegen die Modellkurven deutlich niedriger.

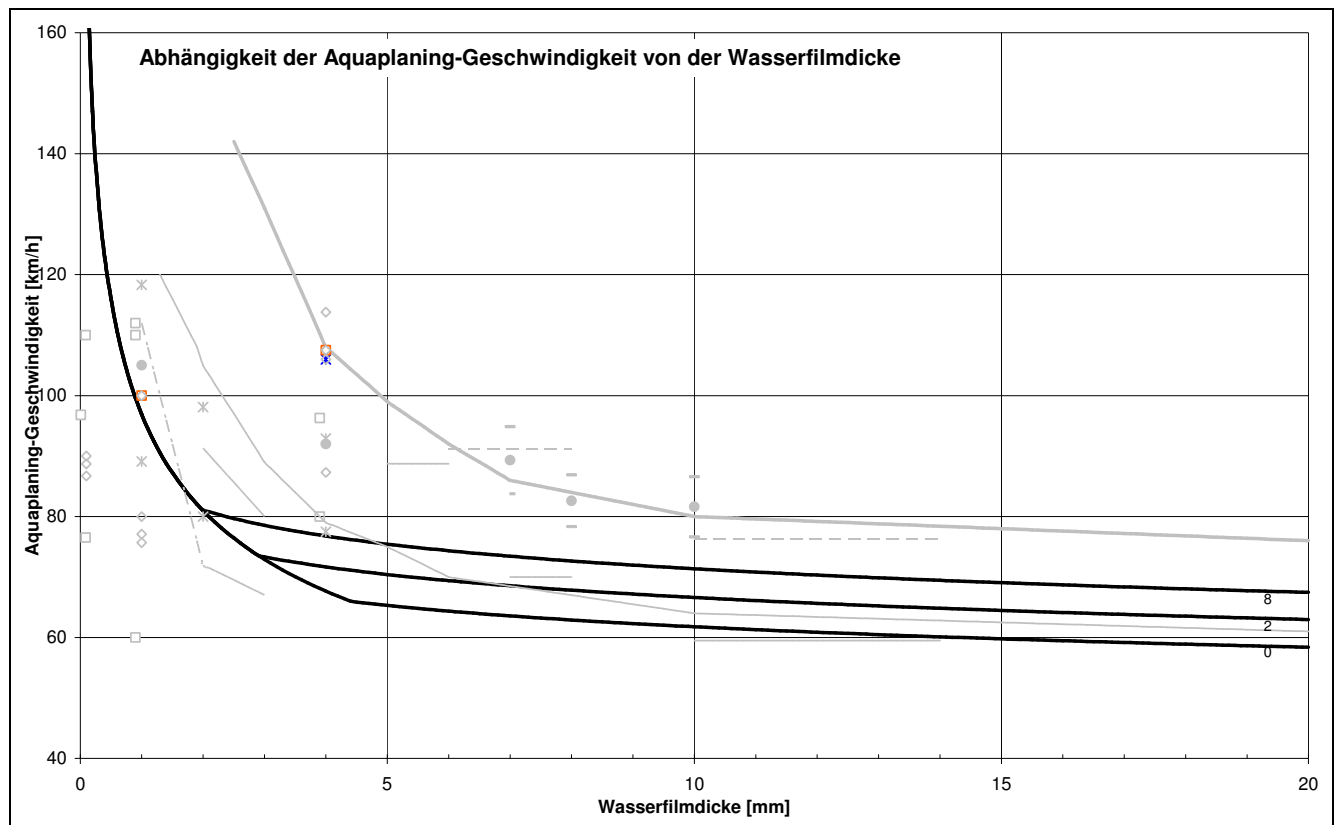


Abbildung 3-9: Aquaplaning-Modell nach GALLAWAY ET AL. und REED ET AL. im Vergleich mit agglomerierten Testauswertungen

Die Modellkurve für einen profillosen Reifen ($t=0\text{mm}$ -Kurve) stellt sich als untere Einhüllende der Vergleichswerte dar. Die Modellkurven für die anderen Reifenprofilthiefen liegen dagegen unter den Vergleichswerten. Auch ist der Charakter der Kurvenverläufe ein anderer, insbesondere im Bereich $\text{WFD} < 4\text{mm}$.

3.2.7 Theoretische Herleitung

Aus der RAS-L (FGSV, 1995) ist die quadratische Funktion für den Blockierreibwert μ_g bekannt:

$$\mu_g = 0,241 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 - 0,721 \cdot \left(\frac{V}{100}\right) + 0,708 \quad (3-36)$$

Als Geschwindigkeit V ist hierbei die sogenannte Geschwindigkeit „ V_{85} “ zu verwenden, die im Straßenentwurf zur fahrdynamischen Bemessung sicherheitsrelevanter Entwurfs-elemente des Lageplans, des Höhenplans und des Querschnitts dient und das tatsächliche vorhandene Geschwindigkeitsverhalten widerspiegelt. Nach der Definition bezeichnet sie die Geschwindigkeit, die 85% der unbehindert fahrenden Pkw auf nasser, sauberer Fahrbahn nicht überschreiten. Die Gleichung gilt für die genormten Versuchsbedingungen mit dem Stuttgarter Reibungsmesser SRM ($\text{WFD}_{\text{rechnerisch}} = 1\text{mm}, \dots$).

Die direkte Abhängigkeit μ -WFD wurde von VEITH (1983) und PELLOLI (1977) als logarithmisch-konkav angegeben, d.h. im einfach-logarithmischen Maßstab der beiden

Achsen stellt sich der Verlauf als Geradenschar dar. Diese Charakteristik des Verlaufs kann auch an anderen Veröffentlichungen beobachtet werden (z.B. bei FACH, 1996). Unter Zugrundelegung einer logarithmischen Abhängigkeit sind im einfach-logarithmischen Maßstab zur Kopplung der μ_g -V-Funktion mit der Wasserfilmdicke lediglich die Steigungen der „Geradenschar“ zu ermitteln. Damit kann die geschwindigkeitsabhängige Geradenneigung nach der Zwei-Punkte-Form der Geradengleichung gefunden werden:

$$m_v = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\mu_{g,2} - \mu_{g,1}}{\lg(wfd_2) - \lg(wfd_1)} \quad (3-37)$$

Hieraus ergibt sich der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Geradenneigung als lineare Schätzfunktion:

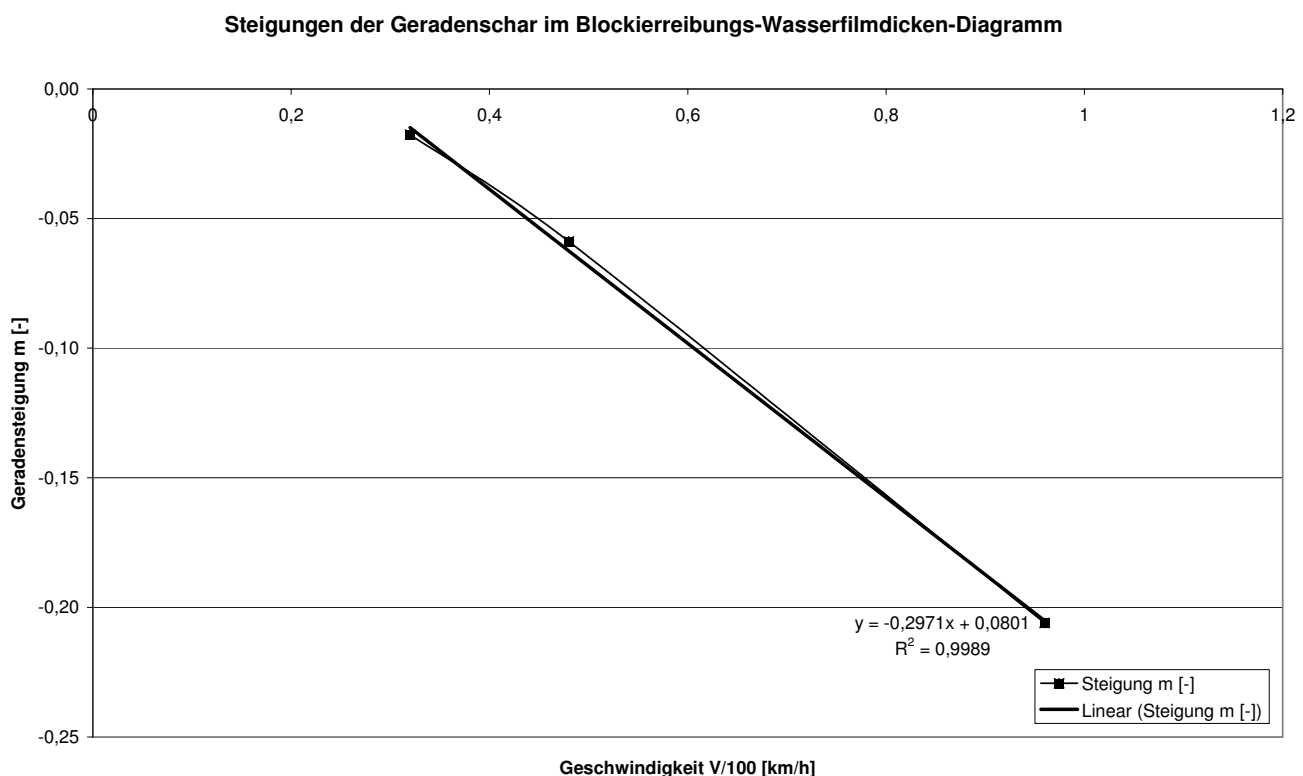


Abbildung 3-10: Steigungen der Geradenschar im Blockierreibungs-Wasserfilmdicken-Diagramm

$$m_v = -0,297 \cdot \left(\frac{V}{100} \right) + 0,08 \quad (3-38)$$

Die in VEITH (1983) angegebene Formel muss damit um einen additiven Term erweitert werden, der die Wasserfilmdicke integriert:

$$m_v = \lg(wfd) \quad (3-39)$$

Unter den Versuchsbedingungen des blockierten Schlepprads (WFD = 1mm) wird der Term automatisch Null, da $\lg(1) = 0$. Ist $WFD < 1\text{mm}$, so wird der Logarithmus < 0 und damit wird $(3-39) > 0$, was einer Anhebung des Reibwerts gegenüber dem Zustand $WFD = 1\text{mm}$ entspricht, bzw. umgekehrt. Somit lässt sich der gesamte Zusammenhang beschreiben durch:

$$\mu_g = F(V, wfd) = 0,241 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 - [0,721 + 0,297 \cdot \lg(wfd)] \cdot \left(\frac{V}{100}\right) + [0,708 + 0,08 \cdot \lg(wfd)] \quad (3-40)$$

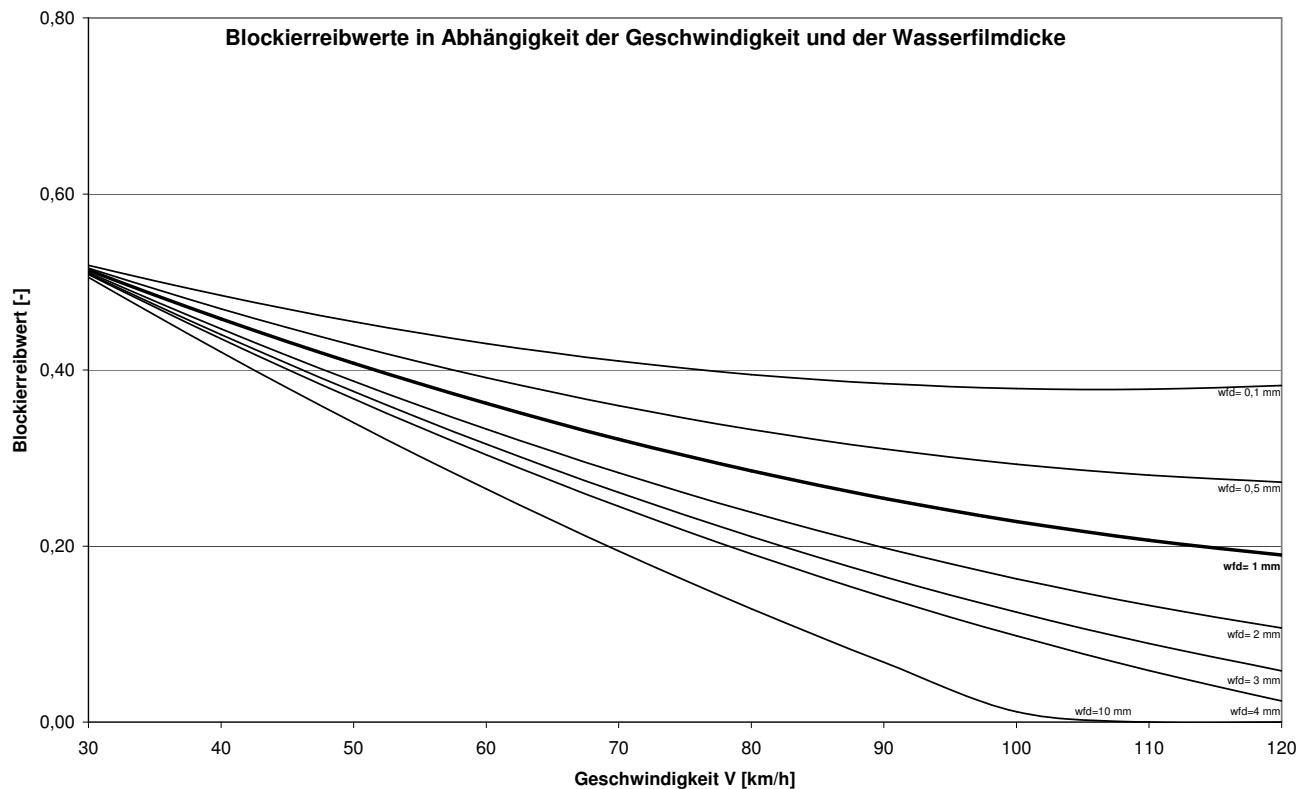


Abbildung 3-11: Blockierreibwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Wasserfilmdicke

Wie aus Abbildung 3-11 zu erkennen ist, ist der Einfluss der Wasserfilmdicke stark geschwindigkeitsabhängig. Wird (3-40) nach V aufgelöst, so ergibt sich $V_{aq} = F(wfd, \mu_{g, \text{grenz}})$:

$$V_{aq} = 61,618 \cdot \lg(wfd) - 20746,888 \cdot \sqrt{9,64 \cdot 10^{-5} \mu_{g, \text{grenz}} + 3,51154 \cdot 10^{-5} \cdot \lg(wfd) + 8,8209 \cdot 10^{-6} \cdot \lg(wfd)^2 - 1,62671 \cdot 10^{-5} + 149,5850622} \quad (3-41)$$

Für unterschiedliche $\mu_{g, \text{grenz}}$ im Wertebereich von 0,0 bis 0,2 ergibt sich dann folgendes Bild (siehe Abbildung 3-12):

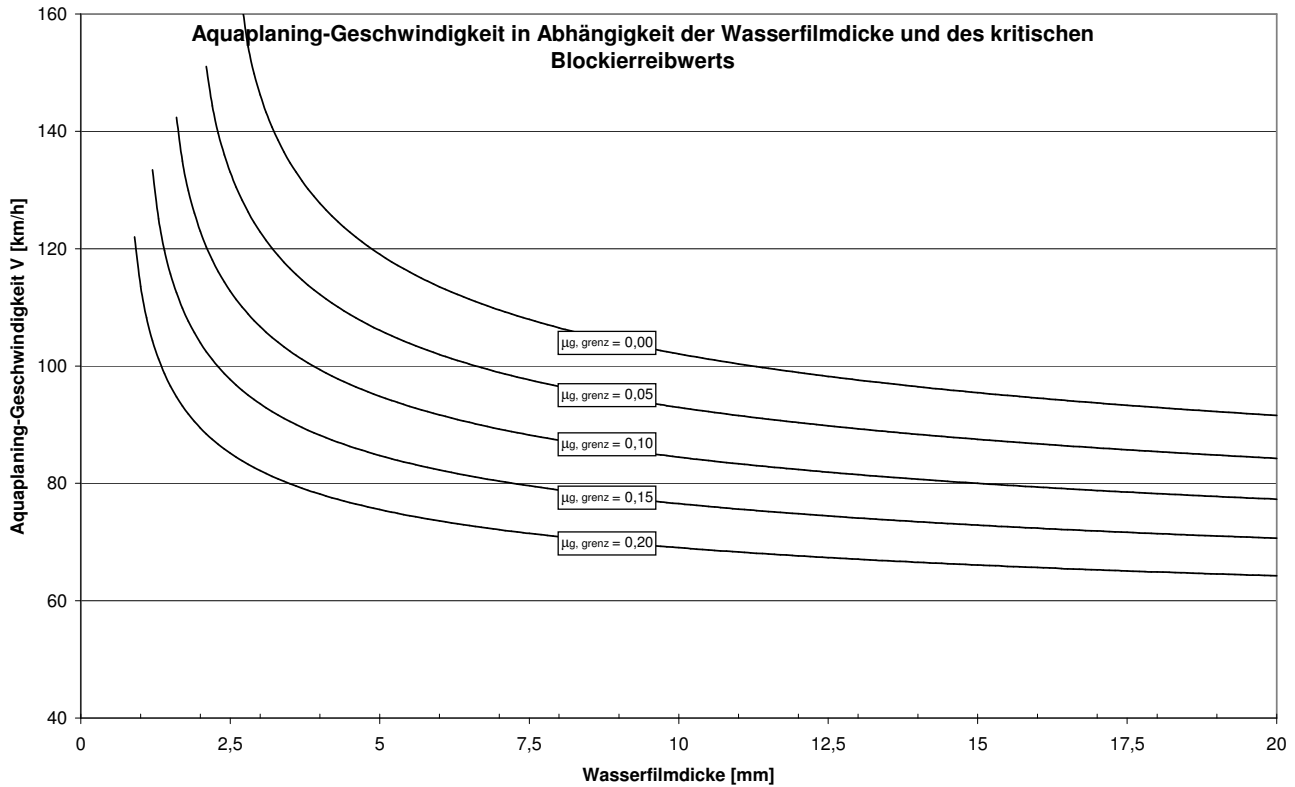


Abbildung 3-12: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke für unterschiedliche Blockierreibwerte

Entsprechend ergibt sich durch die Kopplung von (3-40) und (3-41) die Funktion für den maximalen Reibwert (indirekt zu ermitteln):

$$\begin{aligned}
 V_{aq} = & 61,618 \cdot \lg(wfd) - 20746,888 \cdot \\
 & \cdot \sqrt{8,081 \cdot 10^{-5} \mu_{\max, grenz} + 3,51154 \cdot 10^{-4} \cdot \lg(wfd) + 8,8209 \cdot 10^{-6} \lg(wfd)^2 - 2,04451 \cdot 10^{-5} +} \\
 & + 149,5850622
 \end{aligned}
 \tag{3-42}$$

Ein Schwachpunkt von (3-42) ist jedoch, dass die Funktion in Abhängigkeit von $\mu_{g, grenz}$ erst ab einem Punkt aufwärts definiert ist und gerade die häufig vorkommenden Wasserfilmdicken um 1-2 mm nicht abgedeckt werden. Für diese Bereiche müsste also eine Ersatzfunktion gefunden werden. Zudem wird der Einfluss der Reifenprofiltiefe und der Fahrbahntextur nicht berücksichtigt.

Exponenten-Modell

In einem ersten Schritt werden Exponenten-Funktionen zur Modellbildung herangezogen. Dies ist deshalb naheliegend, da auch die Modelle nach GALLAWAY ET AL., REED ET AL. und AGRAWAL ET AL. auf Exponenten-Funktionen aufbauen. Bei der in Abbildung 3-13 gezeigten Kurvenschar wurde der Koeffizient $a = \text{const.} = 100$ gehalten, während der Exponent b zwischen -0,01 und -0,25 variiert wurde. Die genannten Werte ergeben sich aus den bisherigen Überlegungen und Herleitungen.

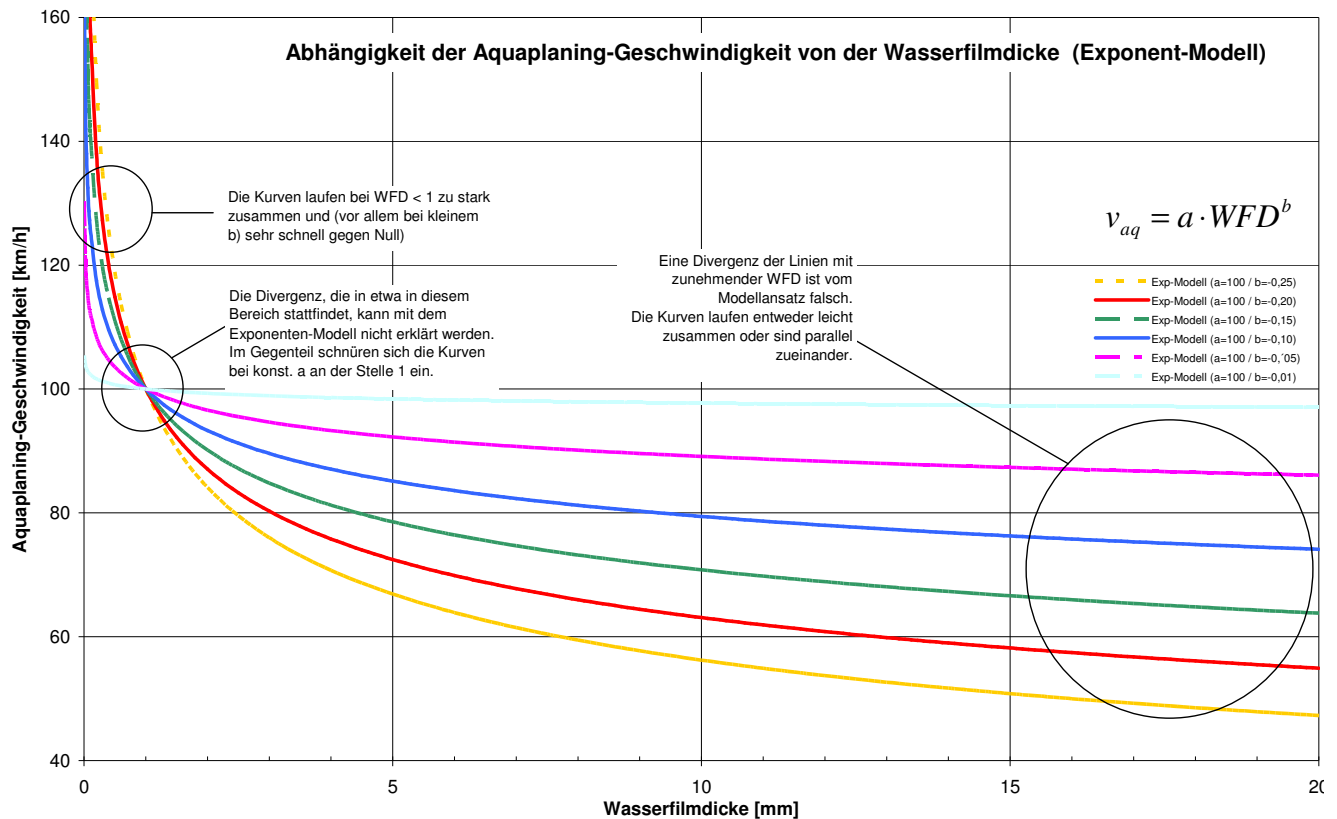


Abbildung 3-13: Modellansatz „Exponenten-Modell“ zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wasserfilmdicke und Aquaplaning-Geschwindigkeit; $a = const$, $b = var$.

Das reine Exponenten-Modell kann die qualitativen Ausprägungen der WFD-Vaq-t-Verläufe nicht exakt nachbilden. Die Divergenz der Linien mit zunehmender WFD entspricht nicht den Testergebnissen. Tatsächlich konvergieren die Kurven leicht bzw. sind parallel zueinander. Die Divergenz der Kurven zwischen ca. 1 und 3 mm WFD bildet das Modell ebenfalls nicht ab. Im Gegenteil dazu schnüren sich die Kurven funktionsbedingt im Punkt {1;1} ein. Die Kurven laufen bei WFD < 1 mm zu stark zusammen.

Der relativ flache Verlauf mit ansteigender WFD wird am besten mit kleinen Exponenten nachvollzogen ($b = -0,01 \dots -0,10$); so können ab WFD > 5 mm gute Approximationen an die Erhebungen erreicht werden. Bei kleinen WFD steigen sie zu sehr an, hier wären nach rechts verschobene Exponenten-Kurven mit höheren Exponenten ($b = -0,15 \dots -0,25$) mit flacheren Verläufen passender. Ein geteilte Funktion ist aufgrund des vorhandenen Knickes ungünstig und wird nicht näher untersucht. Vielmehr wird ein geschlossenes Kurvenmodell zu erreichen versucht.

In Abbildung 3-14 wurde $b = const$. gehalten. Von den oben diskutierten zwei Bereichen wurde ein mittlerer Wert ($b = -0,10$) verwendet. Der Koeffizient a ist dort variabel. Diese Funktionenschar ist in der Charakteristik mit dem Modell nach GALLAWAY ET AL. vergleichbar.

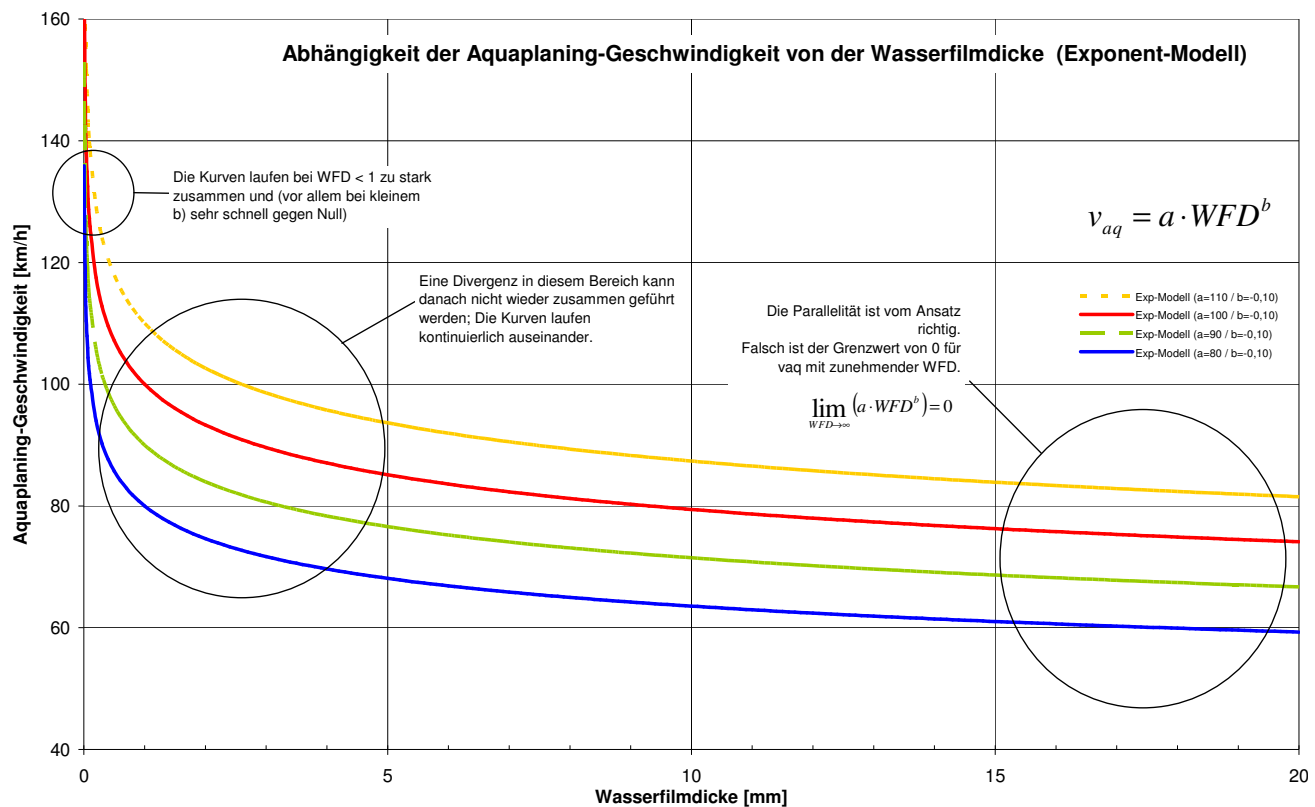


Abbildung 3-14: Modellansatz „Exponenten-Modell“ zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wasserfilmdicke und Aquaplaning-Geschwindigkeit; $b = const$, $a = var$.

S-Kurven-Modell

Um den Ansatz eines geschlossenen, knickfreien Modells weiter zu verfolgen, wurden über Kurven-Fittings an die aufbereiteten Daten weitere Modellansätze getestet. Von den untersuchten Kurvenverläufen war das S-Kurven-Modell dem Exponenten-Modell quantitativ überlegen. Das S-Kurven-Modell wurde daher als Basisfunktion zur Kombination der empirischen und theoretischen Erkenntnisse näher untersucht.

Abbildung 3-15 stellt das S-Kurven-Modell als Kurvenschar (Reifenprofiliefen $\{t = 0; 2; 4; 8\}$) im Vergleich mit den Erhebungen dar. Der Vergleich zeigt eine zufriedenstellend genaue Reproduktion der Versuchskurven.

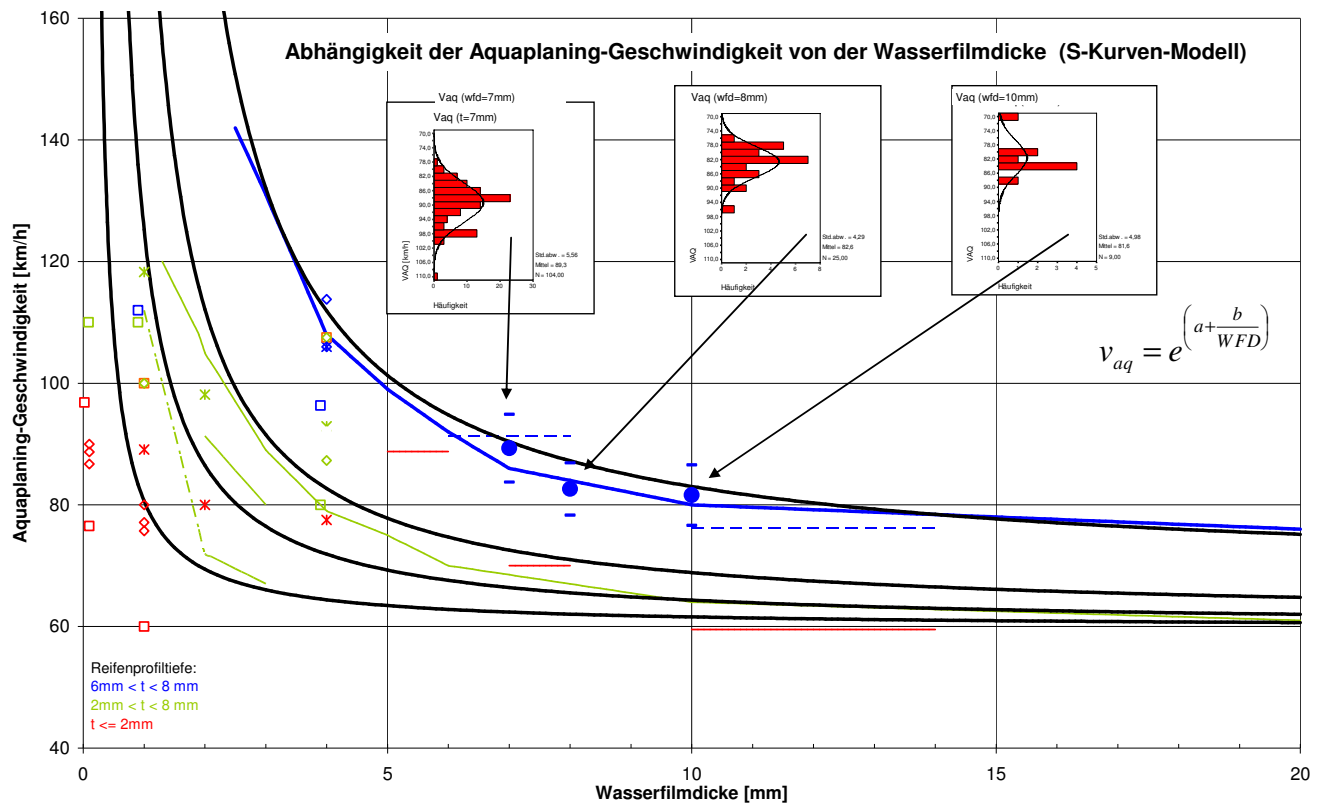


Abbildung 3-15: Aquaplaning-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Reifenprofiltiefe (Qualitative Gegenüberstellung von Erhebungen mit dem S-Kurven Modell)

Zur Überlagerung des Modellansatzes mit der Reifenprofiltiefe wurde auf geometrisch-volumetrische Begründungen zurückgegriffen. Die volumetrischen Modellbegründungen gehen von längsgerillten Reifen ohne seitliche Wasserableitungsmöglichkeiten aus. Die Quer- bzw. Schrägrillen heutiger Serienreifenprofile bewirken jedoch zudem ein seitliches Ableiten des Wassers aus dem Reifenprofil. Dieser Effekt lässt jedoch bei höheren Wasserfilmdicken nach, in erster Linie weil wegen des umgebenen Basisniveaus an Wasserhöhe und dem dadurch erhöhten Widerstand nicht mehr von einer raschen (innerhalb der Überrollzeit) seitlichen Drainage ausgegangen werden darf.

Nach dem in Abbildung 3-16 dargestellten Ansatz von HÖCKER (1971), erweitert nach TRAPP (2002), darf jedoch ab einer Wasserfilmdicke von mehr als 4 mm von einer quadratischen Abhängigkeit von Aquaplaning-Geschwindigkeit und Reifenprofiltiefe ausgegangen werden dürfen. Diese Abhängigkeit wird an der Stützstelle von WFD = 20 mm superponiert. Bei geringen Wassertiefen ist jedoch der dynamische Einfluss vorherrschend und wird modelltechnisch berücksichtigt.

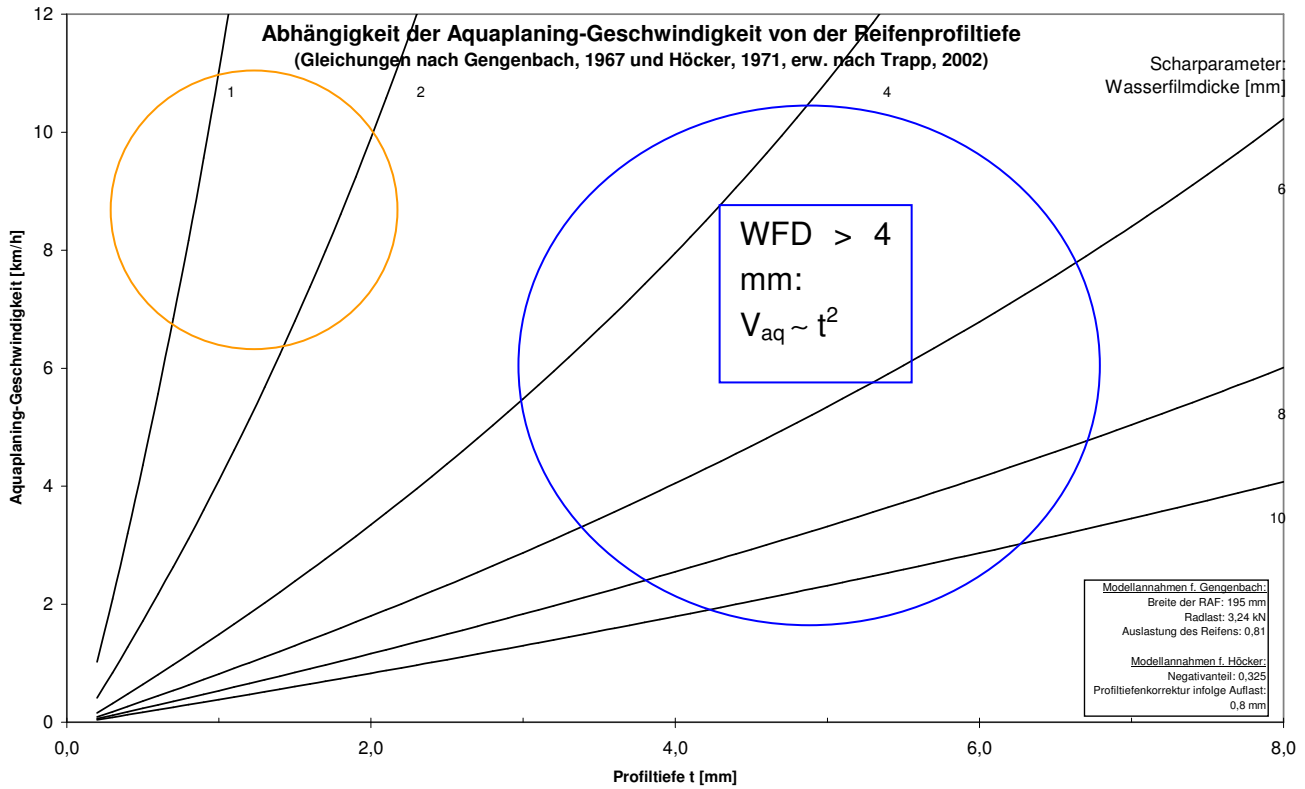


Abbildung 3-16: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Reifenprofiltiefe (Ansätze nach Gengenbach und Höcker)

Aus Beschriebenem ergibt sich für hohe Wasserfilmdicken:

$$q : V' = c_2 \cdot t^2 + c_1 \cdot t + c_0 \tag{3-43}$$

mit:

- q = Verteilungsfunktion
- V' = Aquaplaning-Geschwindigkeit unter alleinigem Einfluss von t, km/h
- c_i = Koeffizienten
- t = Reifenprofiltiefe, mm

sowie für kleinere Wasserfilmdicken:

$$g^{-1} : V' = \frac{t - \hat{n}}{\hat{m}} \tag{3-44}$$

mit:

- g = reziproke Verteilungsfunktion
- m,n = Koeffizienten

Das S-Kurven-Modell besitzt folgende Grundform:

$$V_{aq} = e^{\left(a + \frac{b}{wfd} \right)} \tag{3-45}$$

Unter den obigen Randbedingungen ergeben sich die Koeffizienten des Modells zu:

$$a = g^{-1} \cdot \ln[m_{aq} \cdot g^{-1} + n_{aq}] - q \cdot \frac{\ln[q]}{g^{-1} - q} \quad (3-46)$$

und

$$b = g^{-1} \cdot \ln[(m_{aq} \cdot g^{-1} + \hat{n}) - a] \quad (3-47)$$

Der Einfluss der Fahrbahntextur auf die Aquaplaning-Geschwindigkeit ist zwar geringer als derjenige der Reifenprofiltiefe, er kann aber nicht vernachlässigt werden. Aus dem Modell nach REED ET AL. wurde der Zusammenhang zwischen Aquaplaning-Geschwindigkeit und Reifenprofiltiefe extrahiert. Dieser lässt sich beschreiben durch:

$$V_{aq, \text{tex}} = V_{aq} \cdot (1,0161 - 0,0122 \cdot MTD^2 + 0,11615 \cdot MTD) \quad (3-48)$$

mit:

$V_{aq, \text{tex}}$ = texturbewertete Aquaplaning-Geschwindigkeit, km/h

MTD = mittlere Texturtiefe, mm (Näherungsweise nach KAUFMANN, 1972)

wobei die Texturbewertung nur vorgenommen werden darf, wenn:

$$wfd \geq wfd_{\text{grenz}} \quad (3-49)$$

mit:

$$wfd_{\text{grenz}} = \frac{6317}{22351 \cdot MTD^{0,14} - 12639} + 0,2224 \quad (3-50)$$

Nur dann befindet sich im Ansatz nach REED ET AL. das Maximum in der zweiten Formelkomponenten.

Das S-Kurven-Modell wurde auf Basis der oben beschriebenen, getroffenen Vergleiche und Herleitungen auf folgende Werte kalibriert:

c_0	=	0,1875
c_1	=	- 0,25
c_2	=	60
m_{aq}	=	7
n_{aq}	=	51
m	=	2,129
n	=	- 5,086

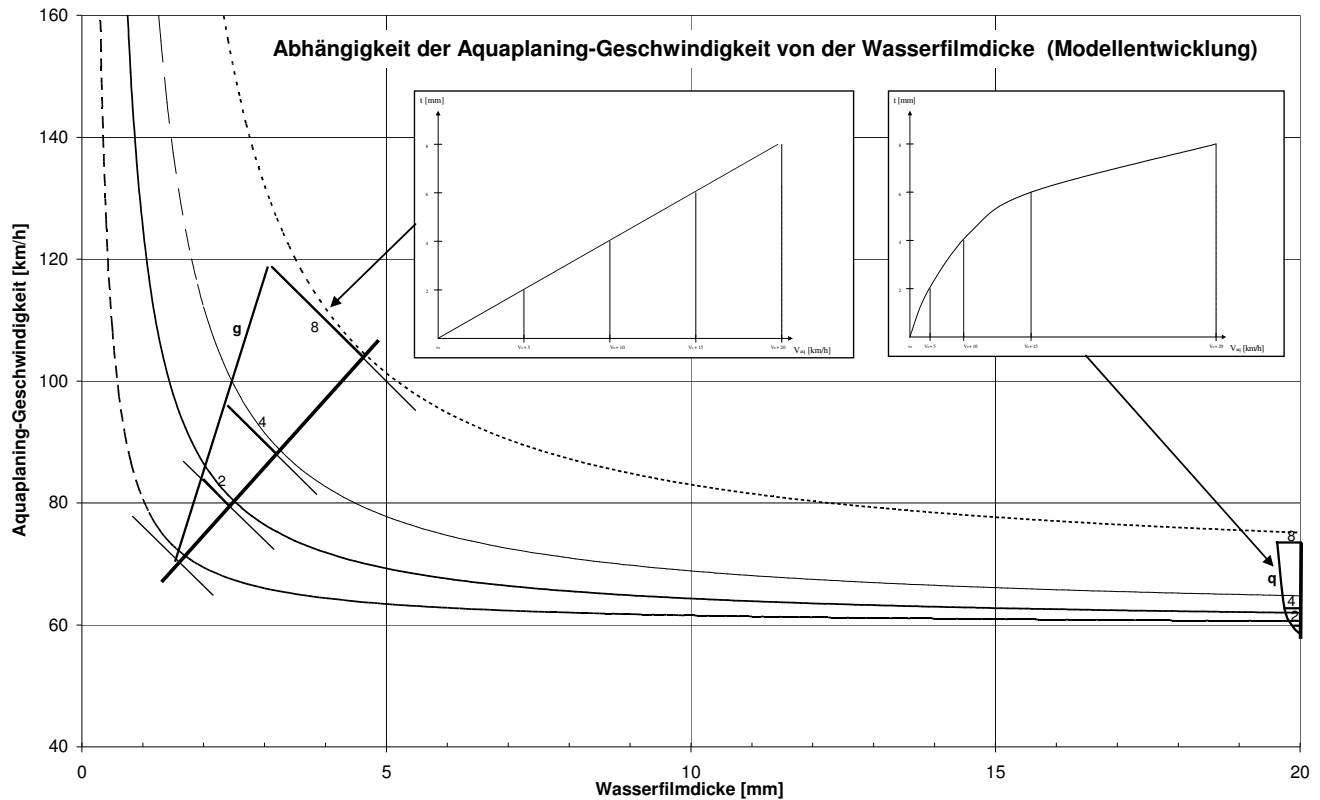


Abbildung 3-17: Hilfsfunktionen zur Kalibrierung des S-Kurven-Modells

3.3 Modellumsetzung - Software-Applikation „PLANUS“

Die Umsetzung der Modellkomponenten erfolgte in Form einer Software-Applikation für das Betriebssystem Microsoft Windows. Das Programm – PLANUS¹¹ - ist als Professional-Anwendung umgesetzt, d.h. Kenntnisse in der Materie Oberflächenabfluss und Aquaplaning sind Grundvoraussetzung. PLANUS benötigt einen Einzel-PC mit State of the Art-Ausstattung. Alle in diesem Bericht gezeigten Berechnungen wurden mit der Programmversion 1.4.1 erstellt.

PLANUS verfügt über die folgenden Grundmodule:

- Parametrisierung (TRS)
- Randbedingungen (OPT)
- Topologie Import/Export
- Simulation
- Drain

¹¹ Planus = lat.: die Oberfläche; Planus = Universität Stuttgart

3.3.1 Simulation

Im Simulationsmodul werden - i.A. sequenziell - alle in Frage kommenden Berechnungen durchgeführt. Dies sind:

1. Topologie der Fahrbahnoberfläche diskretisieren (Beschreibung s. Kapitel 3.3.4 bzw. 3.3.3)
2. Texturmodell anwenden (Beschreibung s. Kapitel 3.4.6)
3. Falllinien generieren und 1-dimensionales Fließmodell anwenden.
4. Wasserfilmdickendarstellung aus Falllinien interpolieren (geometrisches, abstandsgewichtetes Interpolationsschema).
5. Aquaplaning-Geschwindigkeiten modellieren.

Die diskretisierten Ergebnisse werden in dem 2-dimensionalen Multy-Layer-Array „TPlanus“ erfasst. Die zwei Dimensionen sind dabei X und Y,

mit:

- | | | |
|---|---|---|
| X | = | Fahrbahnlängsrichtung (Achse) bei achsbezogenen Modellen, m, bzw. GKS-Hochwert bei raumbezogenen Modellen, km |
| Y | = | Fahrbahnquerrichtung bei achsbezogenen Modellen, m, bzw. GKS-Rechtswert bei raumbezogenen Modellen, km |

Die Layer von TPlanus sind:

- | | | |
|-----|---|--|
| Z | = | geodätische Höhe der Fahrbahnoberfläche, m ü NN |
| W | = | Wasserfilmdicke, mm |
| V | = | Aquaplaning-Geschwindigkeit, km/h |
| BD | = | Record für Rand- und Zwangsbedingungen (z.B. Fahrbahnrand, Mulden-/Grooving-Auslasspunkte, Gratpunkte auf der Fahrbahn etc.), 0...255 |
| TEX | = | Texturen, Verknüpfung mit den Rauheitskennwerten der in der zugeordneten Texturenliste enthaltenen Fahrbahnbeläge, 0...255 |
| RI | = | Rinnen-IDs |
| BKM | = | Strecken-Kilometrierung des Abschnitts bei nicht-achsbezogenen Daten (= X bei achsbezogenen Daten), km |
| FS | = | Fahrbahnquerschnitt-Codierung, enthält Informationen über die Lage des Streifen, die Art des Streifens (Fahr-, Rand-Standstreifen...) und über die Lage von Radspuren, 0...255 |
| FL | = | Falllinien-IDs, weist Zellen als generische Punkte aus und weist sie der entsprechenden Falllinie zu |
| OU | = | zeichnet den Fahrbahnrand bei aus dem Achsmodell zugewiesenen Kilometrierungen (bei raumbezogenen Modellen) als oberen oder unteren Rand aus, 0...1 |

3.3.2 Parametrisierung

Eine der Funktionen von PLANUS besteht darin, ein 3-dimensionales Fahrbahnoberflächenmodell zu erzeugen. Die eingebaute Parametrisierung-Routine (das User-Interface ist in App. B.3 dargestellt) kann die Gittermodelle von Standard-Fahrbahnverwindungen (geteilt /ungeteilt), sowie von Schrägverwindungen generieren. Außerdem sind alle anderen Querneigungssituationen wie konstante Querneigung oder Querneigungsänderungen modellierbar.

Für die Gradienten ist wahlweise eine konstante Längsneigung oder eine bzw. zwei gleichzeitige Höhenplanausrundungen (Kuppen/Wannen) berechenbar.

Das Querneigungsband von Standard- und Schrägverwindungen kann auch aus Lageplan-Entwurfselementen automatisch generiert werden. Die Zusammenhänge ($q = f(R, V_{85})$ etc.) basieren auf den Vorgaben der RAS-L (FGSV, 1995).

Im Fahrbahnquerschnitt sind Querschnittsbreite, Drehachsenanordnung und Fahrbahneinteilung editierbar.

Das Parametrisierungsmodul diskretisiert die Parameter unter Anwendung der folgenden Gleichungen:

Der Index j nummeriert den Krümmungs- und den zugeordneten Querneigungswechsel. Da im Programm immer nur ein Verwindungsbereich betrachtet wird, gilt grundsätzlich: $j = 0$. Der Index i bezeichnet die Anzahl der Tangentenschnittpunkte und beschreibt somit den Höhenplanverlauf. $i = 0$ (keine Tangentenschnittpunkte) bezeichnet einen Bereich konstanter Längsneigung (s_0). i ist theoretisch beliebig wählbar ($i \in \mathbb{N}$), solange die geometrischen Randbedingungen (keine Überschneidungen von Höhenplanausrundungen) eingehalten sind.

1. Für Querneigungswechsel QNW und Klotoidenwendepunkt KWP gilt nach RAS-L (FGSV, 1995) folgende Forderung:

$$\Phi_{QNW,j} \equiv \Phi_{KWP,j} \quad (3-51)$$

mit:

Φ = Station, B-km

j = Indexvariable für Trassierungselemente, hier: $j = 0$

Kann dies nicht erreicht werden, ist folgender Bereich für den Querneigungswechsel zulässig:

$$\Phi_{KWP,j} - c \cdot A_j \leq \Phi_{QNW,j} \leq \Phi_{KWP,j} + c \cdot A_{j+1} \quad (3-52)$$

mit:

A = Klotoidenparameter, m

c = Faktor

wobei $c = 0,1$ bei Straßen der Kategoriengruppe A und $c = 0,2$ bei Straßen der Kategoriengruppen BI und BII.

2. Anrampungsneigungen Δs (nach RAS-L):

$$\Delta s_{j, re/li} = \frac{q_j - q_{j-1}}{\Phi_{QNW, j} - \Phi_{QNW, j-1}} \cdot B_{re/li} \quad (3-53)$$

mit:

re, li = Index für rechter bzw. liinker Fahrbahnrand

q = Querneigung q, -

B = Abstand der Drehachse zum bezeichneten Fahrbahnrand, m

3. Anzahl der Tangentenschnittpunkte TS_i im betrachteten Abschnitt, gem. Tabelle 4 :

Anzahl i	Input Längsneigungen	Input Ausrundungs- parameter	Input Tangenten- schnittpunkt	Station	Berechnung Tangentenlänge
0	s_0	-			
1	s_0, s_1	H_0	$\Phi_{TS,0}$		T_0
2	s_0, s_1, s_2	H_0, H_1	$\Phi_{TS,0}, \Phi_{TS,1}$		T_0, T_1
i	s_{i-1}, s_i	H_{i-1}	$\Phi_{TS,i-1}, \Phi_{TS,i}$		T_{i-1}

Tabelle 4: Parametrisierung von i Tangentenschnittpunkten

4. Überprüfung auf Gradientenbereich:

Bereich B_i (innerhalb der Ausrundung H_i):

$$B_i : \quad \Phi_{TS,i} - T_i \leq x \leq \Phi_{TS,i} + T_i \quad (3-54)$$

mit:

T = Tangentenlänge, m

Zwischenbereich Z_i (zwischen der Ausrundung H_{i-1} und H_i):

$$Z_i : \quad \Phi_{TS,i-1} + T_{i-1} \leq x \leq \Phi_{TS,i} - T_i \quad (3-55)$$

Die Trassierung setzt weiterhin voraus, dass Z_i existiert, d.h. die Länge des Zwischenbereichs muss mindestens Null ergeben:

$$\Phi_{TS,i} - \Phi_{TS,i-1} - (T_i + T_{i-1}) \geq 0 \quad (3-56)$$

5. Lokale Variable für die Ausrundungsfunktion:

$$\hat{x}(x) = \begin{cases} x - \Phi_{TS,i} + T_i & \text{für } x \in B_i \\ 0 & \text{für } x \in Z_i \end{cases} \quad (3-57)$$

6. Lokale Variable für die Längsneigung

$$\tilde{x}(x) = x - \Phi_{TS,i-1} \quad (3-58)$$

7. Funktion für die Höhenvariable

$$z(x, y) = z_{G,0} + z_{G,1} + z_{G,2} + z_Q + z_S + z_H \quad (3-59)$$

Dabei sind:

$$z_{G,0} = z(\Phi_{TS,i-1}) \quad (3-60)$$

mit:

$z_{G,0}$ = Gradientenhöhe beim ersten Tangentschnittpunkt i-1 (Ursprungshöhe), m ü NN

$$z_{G,1} = \frac{s_i \cdot \tilde{x}(x)}{100} \quad (3-61)$$

mit:

$z_{G,1}$ = Höhenänderung der Gradienten infolge Steigung, -gefälle der Tangente i, m

s = Längsneigung, -

$$z_{G,2} = \frac{\hat{x}(x)^2}{2 \cdot H_i} \quad (3-62)$$

mit:

$z_{G,2}$ = Höhenänderung der Gradienten infolge Gradientenausrundung

$$z_Q = \frac{\Delta s_{j,rel\ i}}{B_{rel\ i}} \cdot \frac{x \cdot y}{100} \quad (3-63)$$

mit:

z_Q = Querneigungskomponente der Verwindung

$$z_s = \frac{s_i \cdot y}{100} \quad (3-64)$$

mit:

z_Q = Längsneigungskomponente der Verwindung

$$z_H = \frac{\hat{x}(x) \cdot y}{H_i \cdot 100} \quad (3-65)$$

mit:

z_Q = Variabler Anteil der Gradientenausrundung an der Längsneigungskomponente der Verwindung

Die Ausgangshöhe lässt sich über die Höhenangabe für einen beliebigen Tangentenschnittpunkt k ableiten:

$$z(\Phi_{TS,i-1}) = z(\Phi_{TS,k}) - \sum_{i=0}^k s_i \cdot (\Phi_{TS,i} - \Phi_{TS,i-1}) \quad (3-66)$$

Ist dagegen die Höhe eines beliebigen Punktes an der Stelle x_0 bekannt, muss zuerst die Höhe des auf diesen Punkt bezogenen Tangentenschnittpunkts (der Vorhergehende) ausgerechnet werden, bevor (3-66) angewandt werden kann:

$$z(\Phi_{TS,k}) + s_{k+1} \cdot (x_0 - \Phi_{TS,k}) + \frac{(x_0 - \Phi_{TS,k})^2}{2 \cdot H_{k+1}} \quad (3-67)$$

Weitere Variablen der Topologie-Parametrisierung sind:

x	=	Fahrbahnlängsvariable (Ursprung am Anfang der Verwindung), m
y	=	Fahrbahnquersvariable (Ursprung in der Drehachse), m
h_0	=	Gradientenhöhe am Anfang der Gradientenausrundung [m]
s	=	Längsneigung (+ Steigung; - Gefälle), %
x_H	=	Station am Anfang der Gradientenausrundung (Wanne/Kuppe), m
H	=	Ausrundungshalbmesser (+ Wanne; - Kuppe), m
$H_{(W/K),a}$	=	Ausrundungsbogenanfang, m
$H_{(W/K),e}$	=	Ausrundungsbogenende, m
$x_{LNW,i}$	=	Anfang des Segments i mit konstanter Tangentensteigung LNW

Damit können für jeden Gitterpunkt des Modells die zugehörigen Höhenwerte erzeugt werden. Die Gleichungen für die Falllinien, Schrägneigungen etc. müssen nicht parametrisiert werden, da sie sich aus modell-endogenen Betrachtungen ergeben.

3.3.3 Topologie Importfilter

Ein Importfilter war in der ursprünglichen Version von PLANUS nicht vorhanden. Im Rahmen der Programmerweiterung wurden jedoch diverse Importfilter hinzugefügt (vgl. Kap. 3.4.1 und 3.4.2)

3.3.4 Falllinien generieren

Grundprinzip

Im ersten Schritt müssen die 1-dimensionalen „Pfade“ für die Fluidteilchen generiert werden. Dies wurde dadurch gelöst, dass die Fluidteilchen ihren Pfad selbst finden, indem sie auf der Suche nach dem locus minoris resistentiae über die Fahrbahn wandern. Die Spur, die sie dabei hinterlassen, sind die Falllinien.

Mathematisch betrachtet sind Falllinien Projektionen derjenigen Kurven auf eine horizontale Ebene, die stets orthogonal zu den Höhenlinien stehen (KALENDER, 1971).

Der Ansatz eines einzelnen Fluidteilchen, welches über die Zeit integriert eine Bahnlinie nachzeichnet, ist als LAGRANGE'sche Betrachtungsweise der Fluidkinematik bekannt (HELMIG, 1996).

Im Modell werden die Falllinien sukzessive unter Anwendung eines geometrischen Vorwärtsverfahrens aufgebaut, bei dem von einem gesetzten Startpunkt aus jeweils die Richtung des größten negativen Gradienten als nächster Zielpunkt gewählt wird, der danach selbst als Startpunkt gesetzt wird usw. Die Falllinien sind demnach Polygonzüge, die an einem definierten Punkt starten und am Fahrbahnrand enden.

Routensuch-Algorithmus

Der Routensuch-Algorithmus ist 2-stufig aufgebaut:

1. *Gradientensuchbereich* G absuchen nach dem Richtung des größten negativen Gradienten,
2. *Richtungssuchbereich* R absuchen nach dem am besten passenden Punkt für die in 1. berechnete Richtung.

Ausgehend von einem Startpunkt wird der ihn umgebende Bereich (*Gradientensuchbereich* U_R) nach der Schrittrichtung abgesucht. Hierzu werden die Relativabstände der möglichen Zielpunkte zum Startpunkt mit ihren jeweiligen Höhendifferenzen gewichtet (V_1 : soweit diese kleiner als Null sind).

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{G,j} \\ \Delta y_{G,j} \end{pmatrix} = \sum_{x_r=-G}^{+G} \sum_{y_r=-G}^{+G} \left(\tilde{z}_i^* \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_{g,i} \\ \Delta y_{g,i} \end{pmatrix} \right) \quad * \text{ wenn } \{ \tilde{z}_i \mid \tilde{z}_i < 0 \}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{G,j} \\ \Delta y_{G,j} \end{pmatrix} = \sum_{x_r=-G}^{+G} \sum_{y_r=-G}^{+G} \left(\tilde{z}_i \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_{g,i} \\ \Delta y_{g,i} \end{pmatrix} \right) \quad (3-68)$$

mit:

$\Delta x_{g,i}, \Delta y_{g,i}$ = Relativkoordinaten zum Startpunkt der einzelnen Punkte i des Gradientensuchbereichs G

z = Höhendifferenz Zielpunkt – Startpunkt, m

i = Indexvariable für die Zellen des Gradientensuchbereichs G
i = 1...n mit n = (2·G-1)²-1

j = Indexvariable für das Falllinien-Teilsegment

$\Delta x_{G,j}, \Delta y_{G,j}$ = Koordinaten des theoretischen Zielpunkts

($\Delta x_G; \Delta y_G$) ergibt sich als vorläufiger, theoretischer Zielpunkt. Mit der allgemeinen Winkelfunktion wird der zu ($\Delta x_G; \Delta y_G$) gehörige Winkel φ_G bestimmt.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \cdot \frac{180}{\pi} + \begin{cases} 180 & |x > 0 \\ 360 & |x \leq 0 \cap y \geq 0 \end{cases} \quad (3-69)$$

Nun wird das verschachtelte Schleifenpaar x_r und y_r im Richtungssuchbereich R durchlaufen und die minimale Winkelabweichung $\varphi_{F,j}$ ermittelt:

$$\Delta(\varphi_{R,i} - \varphi_{r,i}) \Big|_{x_r=-R}^{+R} \Big|_{y_r=-R}^{+R} = \min! = \varphi_{F,j} \quad (3-70)$$

Das gefundene Koordinatenpaar ($x_R; y_R$) ist der endgültige Zielpunkt und zugleich Startpunkt ($x_S; y_S$) des nächsten Laufs j+1.

$$\begin{pmatrix} x_{S,j+1} \\ y_{S,j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{R,j} \\ y_{R,j} \end{pmatrix} \quad (3-71)$$

Abbildung 3-18 zeigt einen Startpunkt (Mitte, grau) mit dem abzufragenden Gradientensuchbereich (G = 2).

$\begin{Bmatrix} 0,099 \\ -0,0225 \\ 315^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,09 \\ -0,0135 \\ 296,57^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,081 \\ -0,0045 \\ 270^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,072 \\ 0,0045 \\ 243,43^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,063 \\ 0,0135 \\ 225^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} z[m] \\ \bar{z}[m] \\ \varphi \end{Bmatrix}$ ● V1 ● V2
$\begin{Bmatrix} 0,09625 \\ -0,01975 \\ 333,43^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,0875 \\ -0,011 \\ 315^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,07875 \\ -0,00225 \\ 270^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,07 \\ 0,0065 \\ 225^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,06125 \\ 0,01525 \\ 206,57^\circ \end{Bmatrix}$	
$\begin{Bmatrix} 0,0935 \\ -0,017 \\ 360^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,085 \\ -0,0085 \\ 360^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,0765 \\ 0 \\ - \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,068 \\ 0,0085 \\ 180^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,0595 \\ 0,017 \\ 180^\circ \end{Bmatrix}$	
$\begin{Bmatrix} 0,09075 \\ -0,01425 \\ 26,56^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,0825 \\ -0,006 \\ 45^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,07425 \\ 0,00225 \\ 90^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,066 \\ 0,0105 \\ 135^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,05775 \\ 0,01875 \\ 153,43^\circ \end{Bmatrix}$	
$\begin{Bmatrix} 0,088 \\ -0,0115 \\ 45^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,08 \\ -0,0035 \\ 63,43^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,072 \\ 0,0045 \\ 90^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,064 \\ 0,0125 \\ 116,57^\circ \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0,056 \\ 0,0205 \\ 135^\circ \end{Bmatrix}$	

Abbildung 3-18: Falllinien-Routensuche; Startpunkt und Gradientensuchbereich

Die Zielpunktkoordinaten in V1 sind $(x_G; y_G) = (-1,51; 0,21)$ bzw. in V2 $(-1,58; 0,42)$; die Schritttrichtung ist $\varphi_R = 352,08^\circ$ in V1 bzw. $\varphi_R = 345,17^\circ$ in V2.

Für V1 ist bei $R = 3$ $(x_R; y_R) = (-1; 0)$ und die Winkelabweichung $\varphi_F = 360 - 352,08 = 7,92^\circ$. φ_F hängt von R ab, wie Abbildung 3-19 zeigt. Ab $R = 7$ ist der Winkelabweichung sehr klein ($\varphi_F = 0,21^\circ$) und kann durch Ausweitung des Suchbereichs nicht weiter verringert werden.

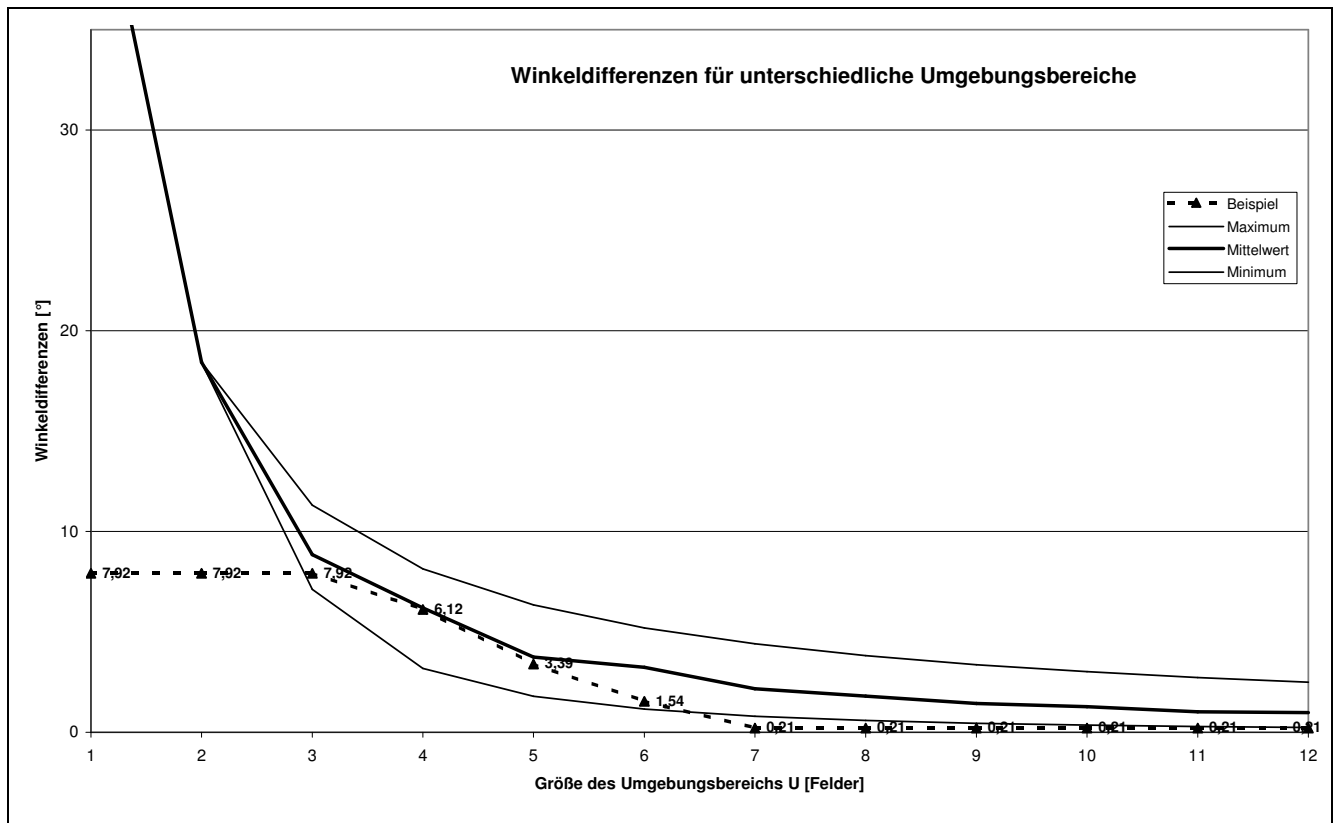


Abbildung 3-19: Winkeldifferenzen für unterschiedliche Richtungssuchbereiche

Einer Erhöhung von R und Verkleinerung von φ_F entgegen wirkt die zunehmende, maximal mögliche Schrittweite (vgl. Abbildung 3-20), d.h. die Differenz $|x_{R,j}, y_{R,j}| - |x_{S,j}, y_{S,j}|$. Sie beträgt stets:

$$s_j = \sqrt{2} \cdot R \cdot g \quad (3-72)$$

mit:

- s = maximal mögliche Schrittweite für das Segment j , m
- g = Rasterdichte, Zellen/m

In den bisherigen Auswertungen wurde mit $R = 6$ gerechnet, d.h. mit einer theoretischen, mittleren φ_F von $1,54^\circ$ und einer maximalen Schrittweite von $s = 1,70$ m.

Die tatsächliche Verteilung zeigt Abbildung 3-21. 54,1% der Winkelabweichungen sind unter 1° . Der Median liegt bei $0,92^\circ$, der Median der Schrittweiten liegt bei $0,74$ m (= 3,71-fache der minimalen Schrittweite $0,20$ m).

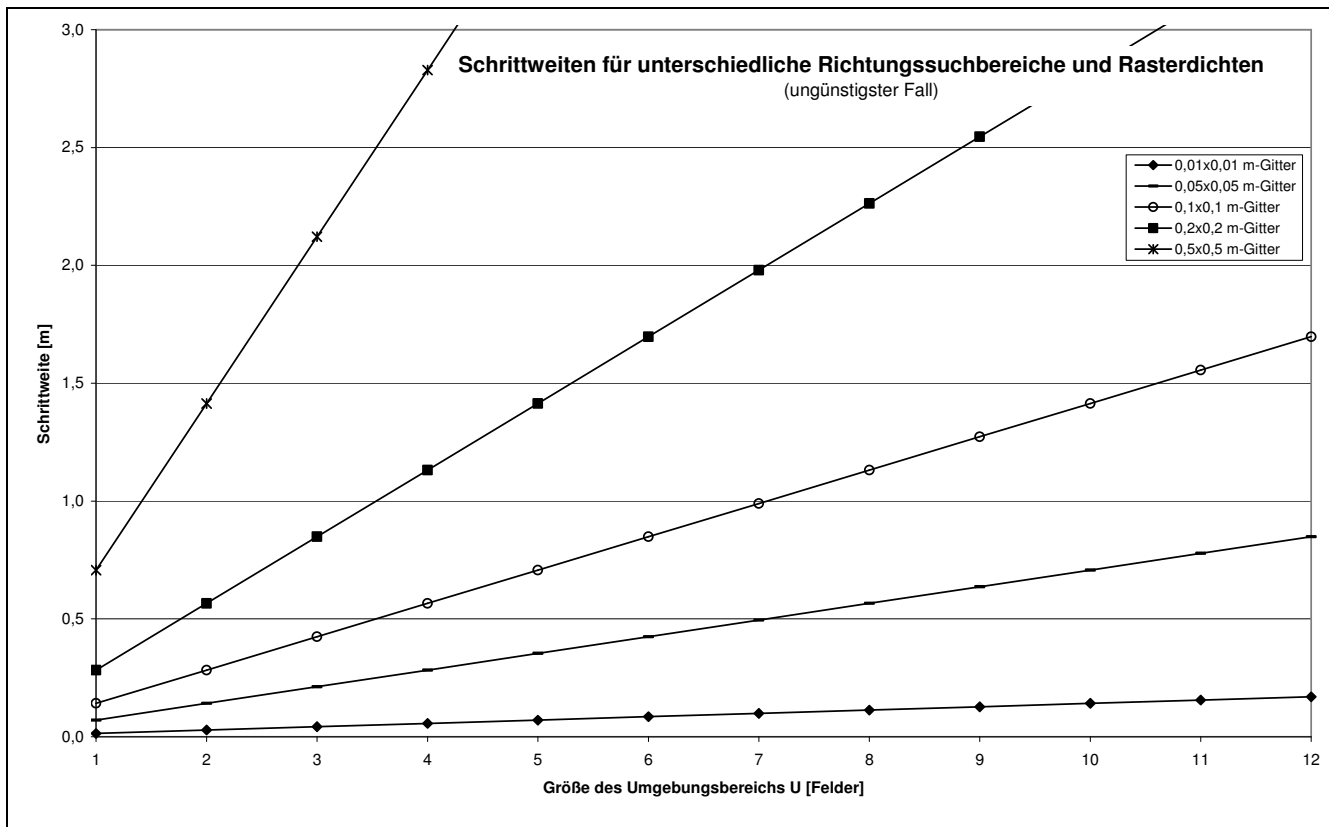


Abbildung 3-20: Maximal wählbare Schrittweiten für unterschiedliche Richtungssuchbereiche und Rasterdichten

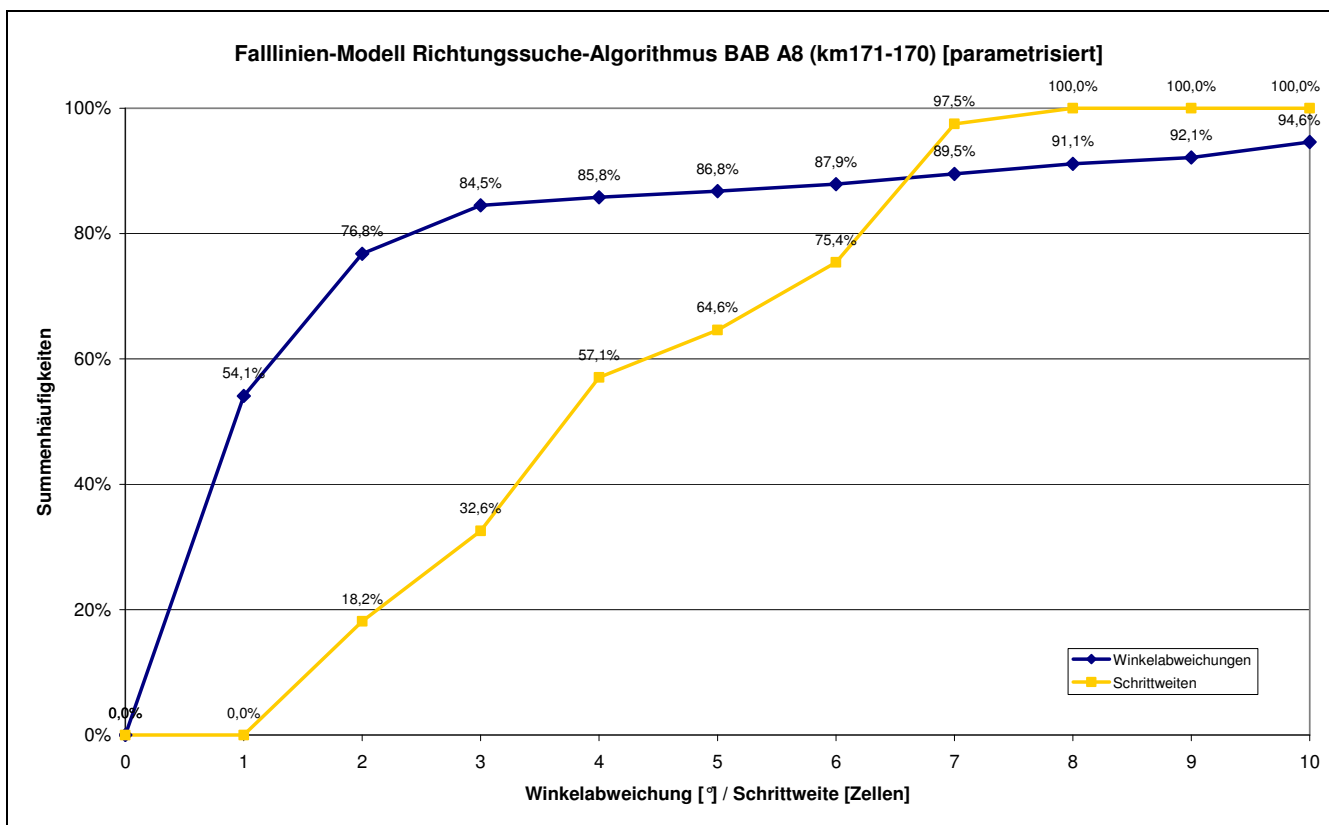


Abbildung 3-21: Richtungssuche-Algorithmus Kenngrößen für BAB A8 (km 171-170); Summenhäufigkeiten Winkelabweichungen und Schrittweiten

Abbildung 3-22 zeigt einen Detailausschnitt einer Falllinien-Verteilung. Die dunklen Punkte sind die originären Stützpunkte der Polygonzüge, die hellen Punkte sind Zwischenpunkte. Bei einer mittleren Schrittweite (Median) von 3,71 Zellen sind demnach 2,71 Zellen aufzufüllen.

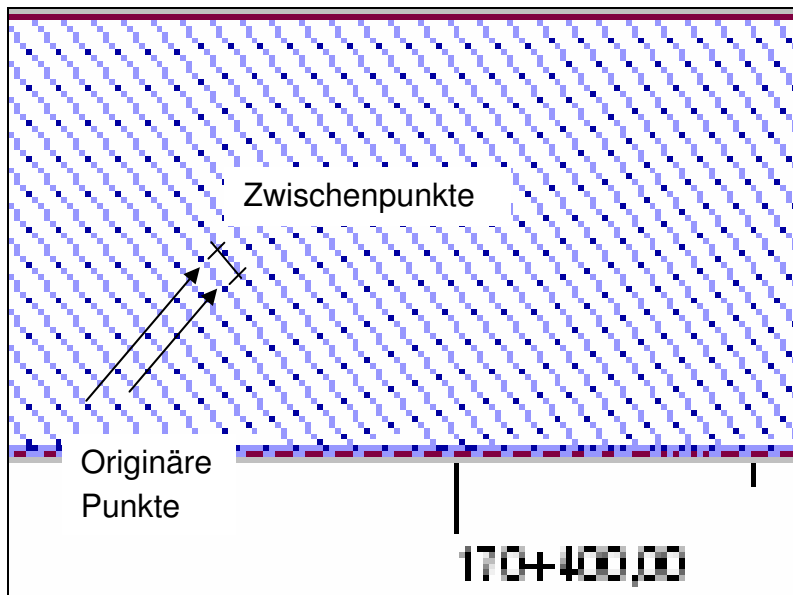


Abbildung 3-22: Vergrößertes Bild einer Falllinien-Verteilung

Für die Generierung der Zwischenpunkte wurde der Vektor-Raster-Algorithmus nach BRESENHAM¹² in das Modell implementiert (vgl. Abbildung 3-23). Hierbei wird ein Vektor in ein Rasterbild konvertiert, indem immer diejenigen Pixel ausgewählt werden, die den geringsten Abstand von der tatsächlichen Linie haben.

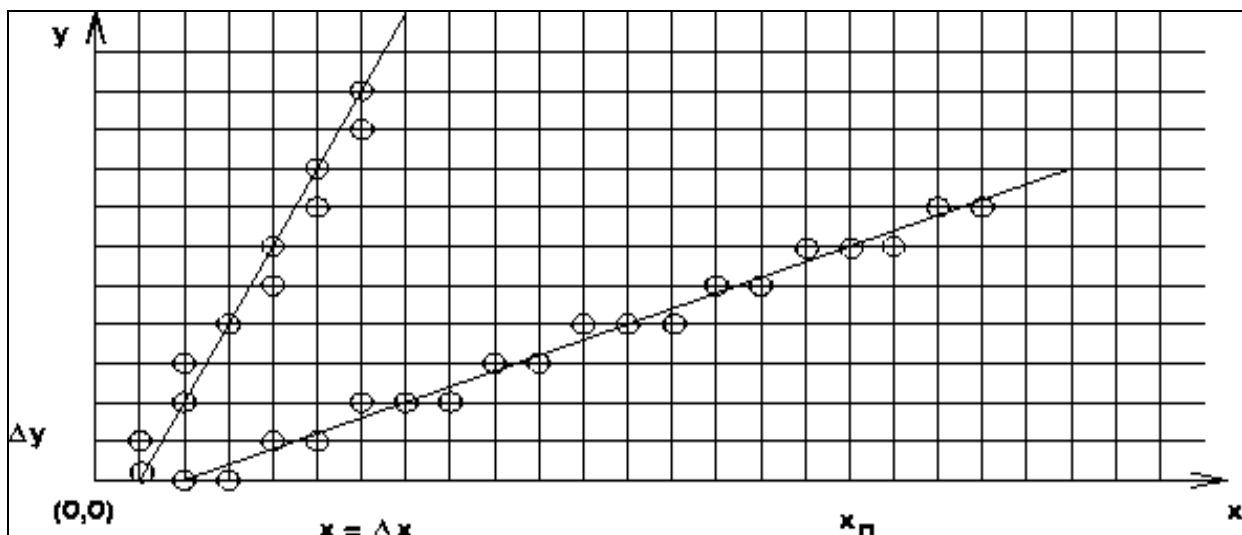


Abbildung 3-23: Vektor-Raster-Konvertierung mit dem BRESENHAM-Algorithmus

¹² Entwickelt 1965 von J.E. BRESENHAM. Da er nur ganzzahlige Addition und Subtraktion sowie die Multiplikation mit 2 beinhaltet, gilt er als sehr effizient. Diese Operationen können durch den Computer sehr schnell ausgeführt werden.

Evaluierung der Abweichungen

Da die geometrische Genauigkeit der Falllinienverläufe ein kritischer Punkt des Verfahrens ist, wurde untersucht, inwieweit die vorhandenen Winkelabweichungen eine Rolle spielen.

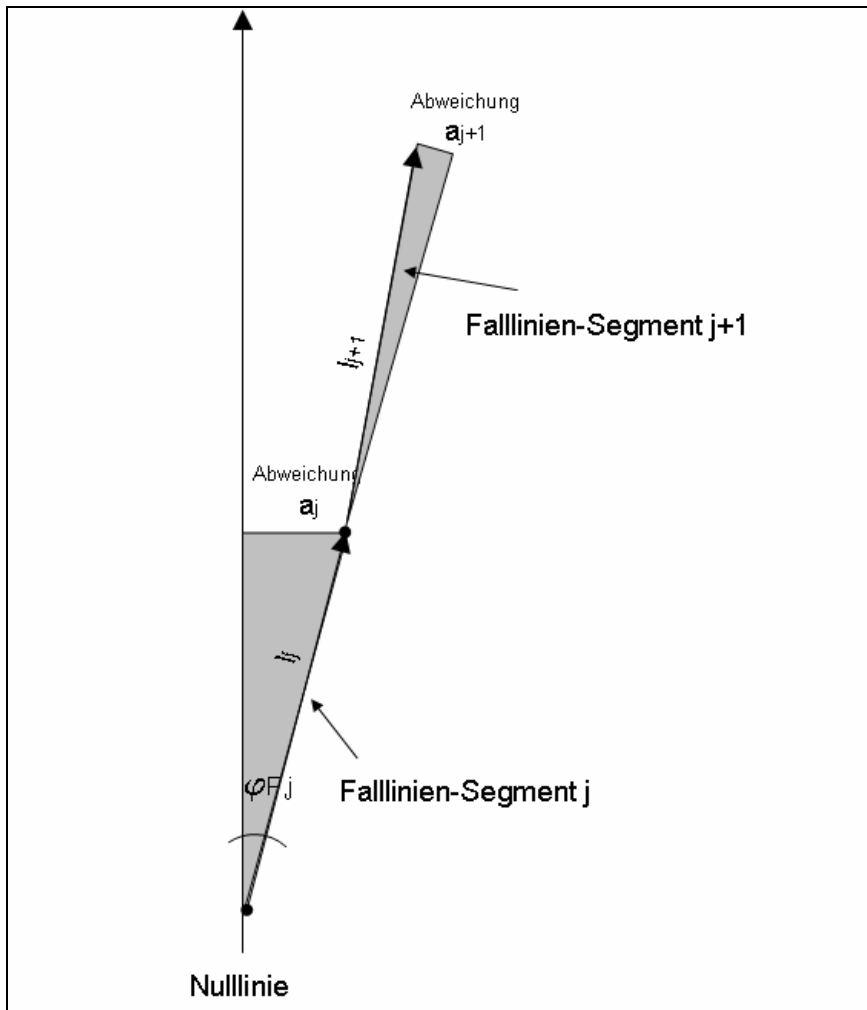


Abbildung 3-24: Grundschemata Evaluierung der Abweichungen bei der Falllinien-Richtungssuche

Wie Abbildung 3-24 zeigt, berechnet sich die Abweichung einer Falllinie von der Nulllinie als kumulierte Summe der Abweichungen ihrer Falllinien-Segmente:

$$a = \sum_j l_j \cdot \sin \left(\sum_{k=1}^j \varphi_{F,k} \right) \quad (3-73)$$

mit:

- l_j = Länge des Falllinien-Segments j , m
- $\varphi_{F,k}$ = Winkelabweichung des Fallliniensegments k
- k = Indexvariable über alle Segmente bis zum aktuellen j

Als Nulllinie wird demnach die Achse verstanden, entlang der die Kurve entwickelt werden würde, wenn keine Winkelabweichungen auftreten. Trotz der Kumulation von Winkelabweichungen können die Falllinienverläufe mit guter Genauigkeit approximiert werden. Zur Bestimmung optimaler Versuchsparameter wurden umfangreiche Sensitivitäts-

untersuchungen durchgeführt. In Abbildung 3-25 ist das Ergebnis eines Testfalls dargestellt. Es zeigt eine 2,32%-Abweichung von der Nulllinie (3,42 m bei 147,42 m Falllinienlänge und $R = 7$).

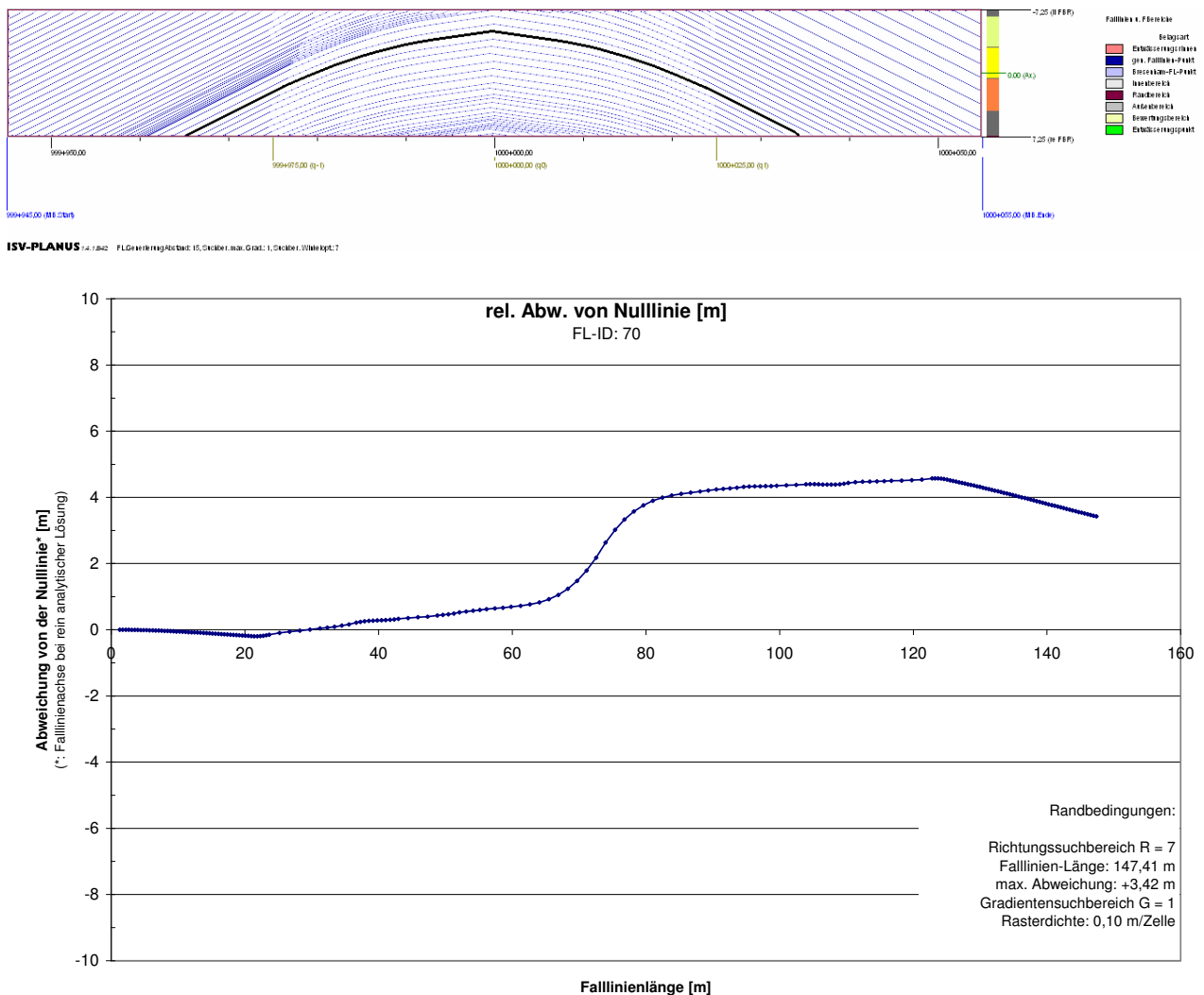


Abbildung 3-25: Grundschematische Evaluierung der Abweichungen bei der Falllinien-Richtungssuche

Grundsätzlich lässt sich aus den durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen ein Bereich von $6 \leq R \leq 10$ empfehlen.

Die Winkelabweichungen behaften das Modell zwar mit einer geringen Unschärfe, sind aber systembedingt und nicht zu vermeiden, da das Orthogonalraaster-System nur eine gewisse Auswahl an Winkeln bietet. Trotzdem sind im Modell Verfahren implementiert, um die ermittelten Fließrichtungen möglichst genau zu approximieren.

Bei der kinematischen Welle wird die entsprechende Fließgleichung simultan während der Falllinien-Generierung angewandt. Die Wasserfilmdicken werden nur für Stützpunkte berechnet. Die Modelleingangsparameter ergeben sich:

- Sohlneigung I_S aus:

$$I_S = \frac{\Delta z = z(x_S; y_S) - z(x_R; y_R)}{\Delta l = \left| \begin{matrix} x_S & - & x_R \\ y_S & - & y_R \end{matrix} \right|} \quad (3-74)$$

mit:

Δz = Höhendifferenz, m

Δl = Abstand, m

- Fahrbahntextur R aus PLAN[x_S;y_S].TEX (Texturmodell)
- Fließweglänge l aus der Summe der Teillängen der einzelnen Falllinien-Segmente:

$$l = \sum_{j=1}^{j_akt} \left| \begin{matrix} \Delta x_{R,j} \\ \Delta y_{R,j} \end{matrix} \right| \quad (3-75)$$

mit:

j = Indexvariable für die Segmente der Falllinie

j_akt = momentan berechnetes Segment

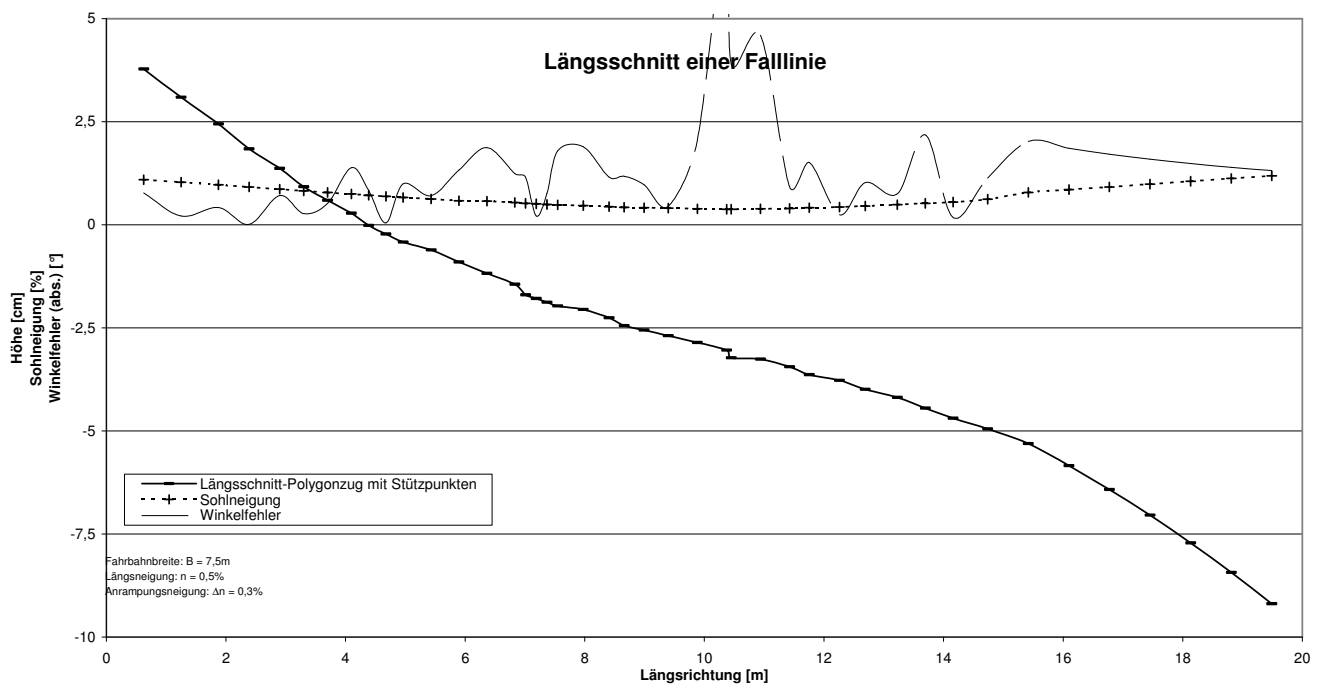


Abbildung 3-26: Längsschnitt, Winkelabweichungen und Sohlneigungsverlauf einer Falllinie

Berücksichtigung von Zweidimensionalität

Eines der größten Probleme, die durch die 1-dimensionale Modellierung entstehen, ist die Konsistenz beim Übergang zur 2-Dimensionalität.

Verlaufen benachbarte Falllinien nicht parallel sondern, wie z.B. in Abbildung 3-27 gezeigt, divergent bzw. konvergent, ändert sich damit auch die Abflussbreite, die durch die jeweiligen Falllinien repräsentiert wird.

HÖCKER (1971A) hat dazu bemerkt, dass daher die Abflussmenge $i \cdot L_f$ nicht nur aus der Länge einer Falllinie berechnet werden darf, sondern dass von der Fläche auszugehen sei, die von zwei benachbarten Falllinien gebildet wird. Allgemein muss die Fläche über eine fiktive Fließbreite der Gerinneströmung betrachtet werden, die entlang des Fließwegs variabel ist.

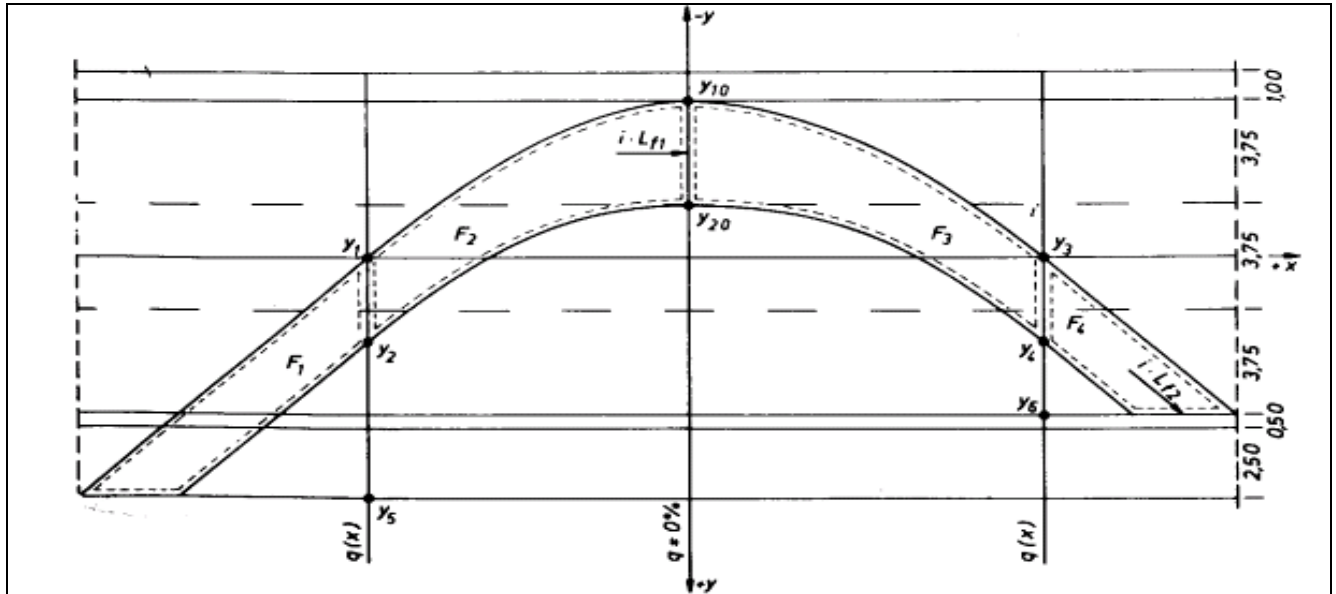


Abbildung 3-27: Berechnung der Wasserfilmdicke für eine Verwindung mit Querneigungswechsel (HÖCKER, 1971a)

Im numerischen Modell wird dies so umgesetzt, dass beim Suchalgorithmus in den diskreten Abständen eine zur aktuellen Falllinie f Orthogonale (in fortschreitender Richtung immer nach rechts) generiert wird (Abbildung 3-28). Aus dem Berührungspunkt mit der vorhergehenden Falllinie $f-1$ ergibt sich die Breite, die – für den Bereich i – als konstant angesehen wird. Die Breite muss vom Modellmaßstab in den Realmaßstab zurückgerechnet werden, wodurch sich Sprünge in der Querschnittsbreite ergeben können, die in der Größenordnung des Modellrasters liegen. Die „bezogene Fließweglänge“ $L_{f,b(n)}$ an der Stelle n – bezogen auf die Fließquerschnittsbreite - ergibt sich somit durch Summation aller Teilflächen i bis zur Position n bezogen auf die Breite an der Position n :

$$L_{f,b(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{B_{(n)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{f(i)} \cdot B_{(i)})}{B_{(n)}} \quad (3-76)$$

Mit $L_{f,b(n)}$ wird dann die Wasserfilmdicke anstelle von $L_{f(n)}$ berechnet. Es erscheint einleuchtend, dass beim Auseinanderlaufen von Falllinien die Wasserfilmdicke relativ ab- und beim Konvergieren relativ zunimmt.

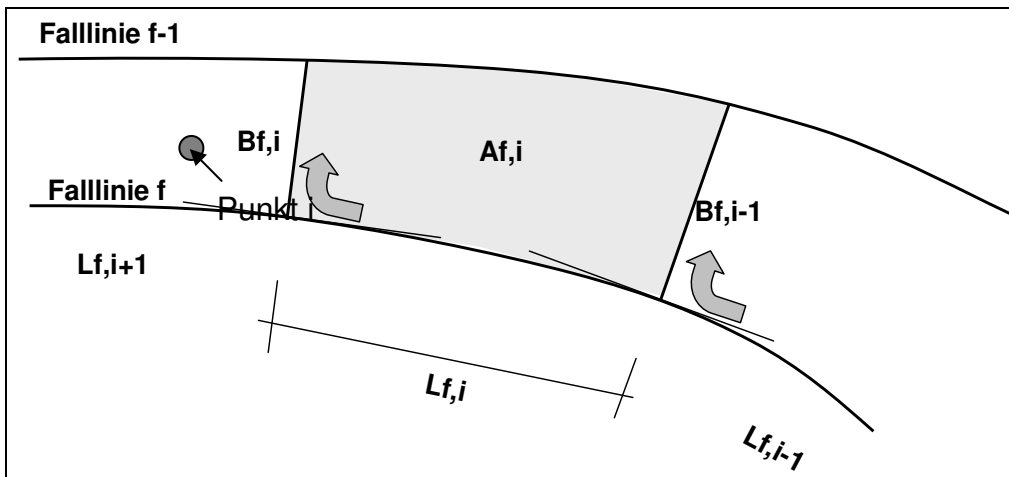


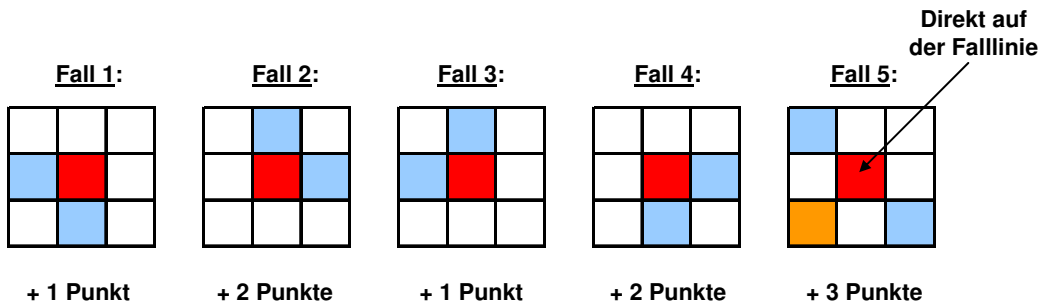
Abbildung 3-28: Ermittlung der fiktiven Fließquerschnittsbreite – schematisch

Die Berechnung wird gemäß der Systematik in Abbildung 3-29 und Abbildung 3-30 durchgeführt.

Ein Passieren einer Falllinie von der „Breitenlinie“ kann nicht allein aus den Punktwerten der Breitenlinie identifiziert werden, da auch der Fall „Passieren ohne Berührung“ zu berücksichtigen ist (diagonal durch die Rasterlinie hindurch).

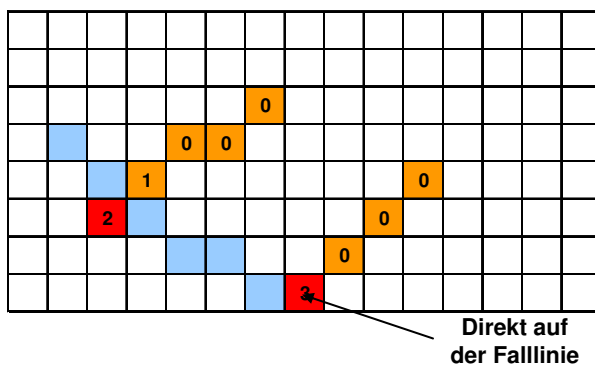
Berechnung der (fiktiven) Fließquerschnittsbreite zwischen den Falllinien

1. Berechnungsvorschrift für das Identifizieren der nächsten Falllinie



Wenn zusammen mind. 3 Punkte erreicht sind, wird abgebrochen

Beispiel:



Die obere Linie trifft den Fall 1 an (+1 Punkt), im weiteren Verlauf ergibt sich Fall 2 (+2 Punkte). Damit Abbruchkriterium erreicht.

Im unteren Beispiel wird sofort Fall 5 angetroffen (+3 Punkte). Damit wird abgebrochen.

Abbildung 3-29: Berechnung der fiktiven Fließquerschnittsbreiten zwischen benachbarten Falllinien (I)

Berechnung der (fiktiven) Fließquerschnittsbreite zwischen den Falllinien

2. Beispiel für „Breitenlinien“

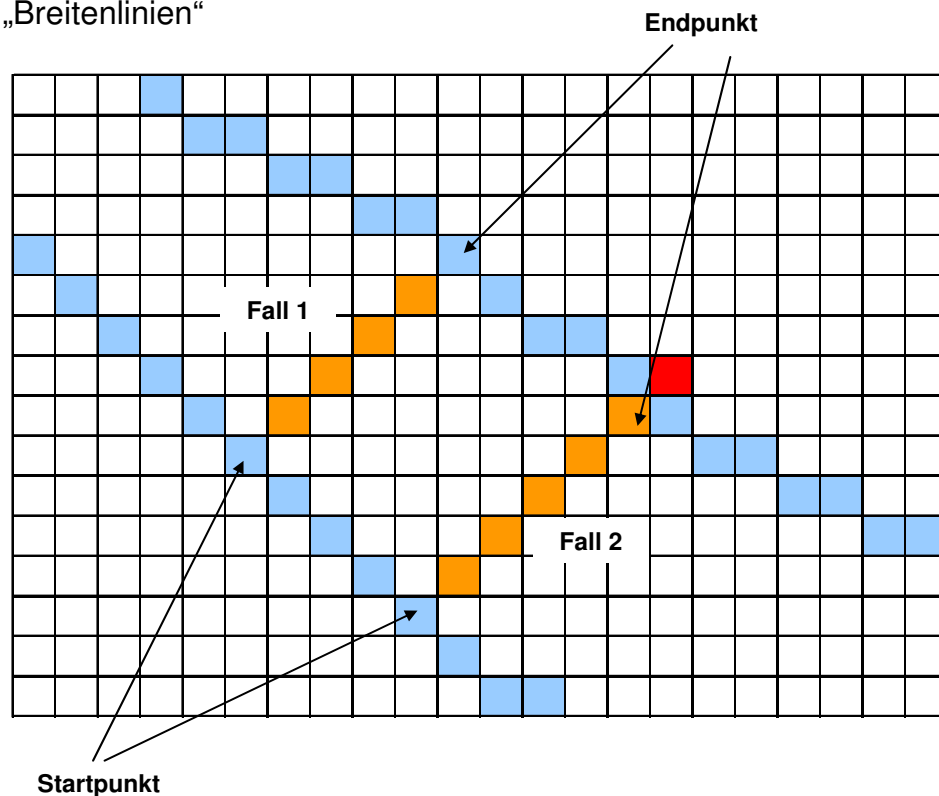


Abbildung 3-30: Berechnung der fiktiven Fließquerschnittsbreiten zwischen benachbarten Falllinien (II)

3.3.5 Interpolationsalgorithmus

Ein Kernstück von PLANUS ist der Interpolationsfilter, der aus der Schar 1-dimensionaler Falllinien, die jedoch bereits 2-dimensionale fiktive Gerinne repräsentieren, ein 2-dimensionales Bild erstellt. Dies wird erreicht, indem die noch leeren Zwischenpunkte zwischen den Falllinien aufgefüllt werden. Aus Basis der interpolierten Auffüllung wird z.B. der Einfluss von Radspuren, die Bewertung der Effektivität durch Vorher-Nachher-Differenzen, sowie die Berechnung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten aus der Wasserfilmdickenverteilung (Textureinflüsse) vorgenommen.

Nach den a) geometrisch generierten Falllinien-Verläufen und den b) hydrodynamisch 1-dimensional modellierten Wasserverteilungen, wird hierfür ein geometrisches Schema verwendet.

Es greift auf einen dem Potenzialprinzip ähnlichen Formalismus zurück:

Mit der Interpolationsfunktion

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i \in j} \Phi_{ij} \cdot g_{ij}}{\sum_{i \in j} g_{ij}} \quad (3-77)$$

und

$$g_j = \frac{\sum_{i \in j} g_{ij}}{n_j} \quad (3-78)$$

mit:

- Φ = generischer Wert, z.B. Wasserfilmdicke, mm
- g = Potenzialgewicht, m
- n = Anzahl der Elemente
- i = Index der generischen Falllinien-Einzelpunkte
- j = Index der Falllinie

und dem Potenzialgewicht

$$g_{ij} = 1 - \frac{dr_{ij}}{r} \quad (3-79)$$

mit:

- r = Bezugsniveau, maximal möglicher Abstand d , m, vorgegeben durch Interpolationsbereich
- d = Zellabstand des Punkt $\{i;j\}$ vom Zielpunkt $\{m;n\}$

wobei sich der maximal mögliche Abstand r ergibt zu:

$$r = \sqrt{2} \cdot l \quad (3-80)$$

mit:

- l = Interpolationsbereich, Anzahl Zellen um den Zielpunkt $\{m;n\}$

wird für jeden Punkt i der Falllinie j im Interpolationsbereich l eine potenzialgewichtete, falllinieninterne Interpolation durchführt, wobei die Potenzialgewichte stets auf den falllinienexternen Zielpunkt $\{m;n\}$ bezogen sind. Das Ergebnis sind die falllinienbezogenen Werte Φ_j und Potenzialgewichte g_j für alle Falllinien j , von denen mindestens 1 Punkt in l liegt.

Die j Falllinienwerte werden nun einer von der ersten Form leicht abgeänderten Form des Potenzialansatzes unterzogen. Damit ergibt sich die Größe des Zielwerts für den Punkt $\{m;n\}$:

$$\Phi_{mn} = \frac{\sum_{j \in I} \phi_j}{\sum_{j \in I} g_j} \quad (3-81)$$

mit:

- Φ = generischer Wert, z.B. Wasserfilmdicke, mm
 m, n = Indexvariablen für die Position des Punktes im Modellgitter (Rasterkoordinaten)

Der Vorteil der doppelten Interpolation liegt auf der Hand: alle Falllinienwerte und –abstände zum Zielpunkt werden mit dem Gewicht repräsentiert, das sich aus der Lage der Falllinien zum Zielpunkt ergibt und nicht durch die Anzahl der Punkte i , mit denen eine Falllinie zur Zielwertmittelung beitragen kann. D.h. eine einzelne Falllinie wird nicht übergewichtet gegenüber einer anderen, nur weil von ihr zufälligerweise mehr generische Punkte im Interpolationsbereich um den Zielpunkt sind.

Der Interpolationsfilter wurde in PLANUS in 2 Varianten implementiert:

1. Konstanter Interpolationsbereich l
2. Variabler, sich selbst anpassender Interpolationsbereich l

Beim konstanten Interpolationsbereich handelt es sich bei l um eine exogene Randbedingung. Sie sollte so gewählt werden, dass – im ungünstigsten Fall – mindestens zwei Punkte auf zwei verschiedenen Falllinien erreicht werden können. Aus den Falllinienabständen bei der Generierung lässt sich l wegen Divergenz der Linien nicht unbedingt ableiten. Es empfiehlt sich daher, l um den vorher abzuschätzenden Einfluss der Divergenz zu vergrößern. Eine Vergrößerung von l bedeutet mitnichten eine Glättung der Ergebnisse, da weiter entfernt liegende Punkte durch g_{ij} entsprechend deutlich geringer gewichtet werden.

Der Nachteil eines höheren Werts ist die Rechenzeit, die diese Routine verursacht. In der vorliegenden Untersuchung wurde $l = 30$ bei einem Falllinienabstand von 5 Feldern zu Grunde gelegt.

Bei der zweiten Variante wird l sukzessiv vergrößert, bis die Bedingung erfüllt ist, dass aus mindestens zwei unterschiedlichen Falllinien generische Punkte zur Verfügung stehen. Die Variante 2 ist a) schneller, da kein Sicherheitszuschlag bedacht werden muss und b) logischer, da nur die wirklich relevanten Punkte eingerechnet werden. Trotzdem erscheinen die Ergebnisse unsauberer (stärker variierend), was daran liegt, dass die zur Mittelung herangezogenen Punkte unmittelbarer und zufallsverteilt erscheinen und verschwinden, als bei der ersten Variante mit dem regelmäßigen Interpolationsbereich.

Die folgenden 4 Abbildungen zeigen schematisch exemplarisch den Ablauf der zweiten Interpolationsvariante:

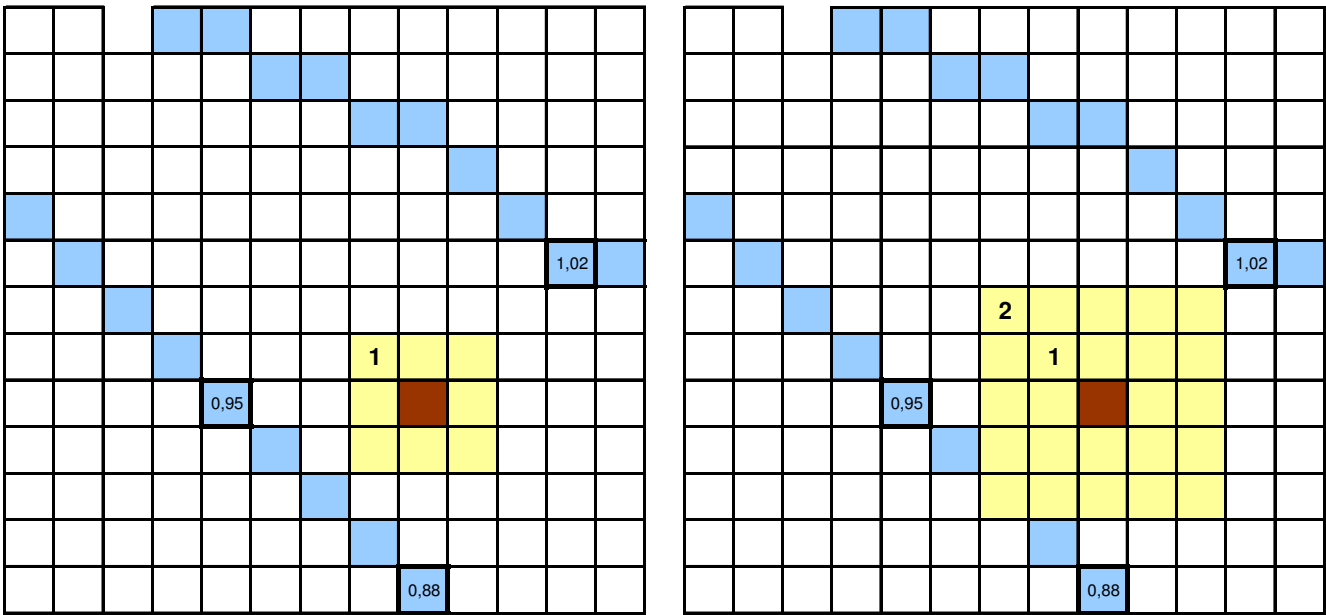


Abbildung 3-31: Schritt 1 (linke Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 1$, I enthält noch keine Falllinien; Schritt 2 (rechte Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 2$, I enthält noch keine Falllinien

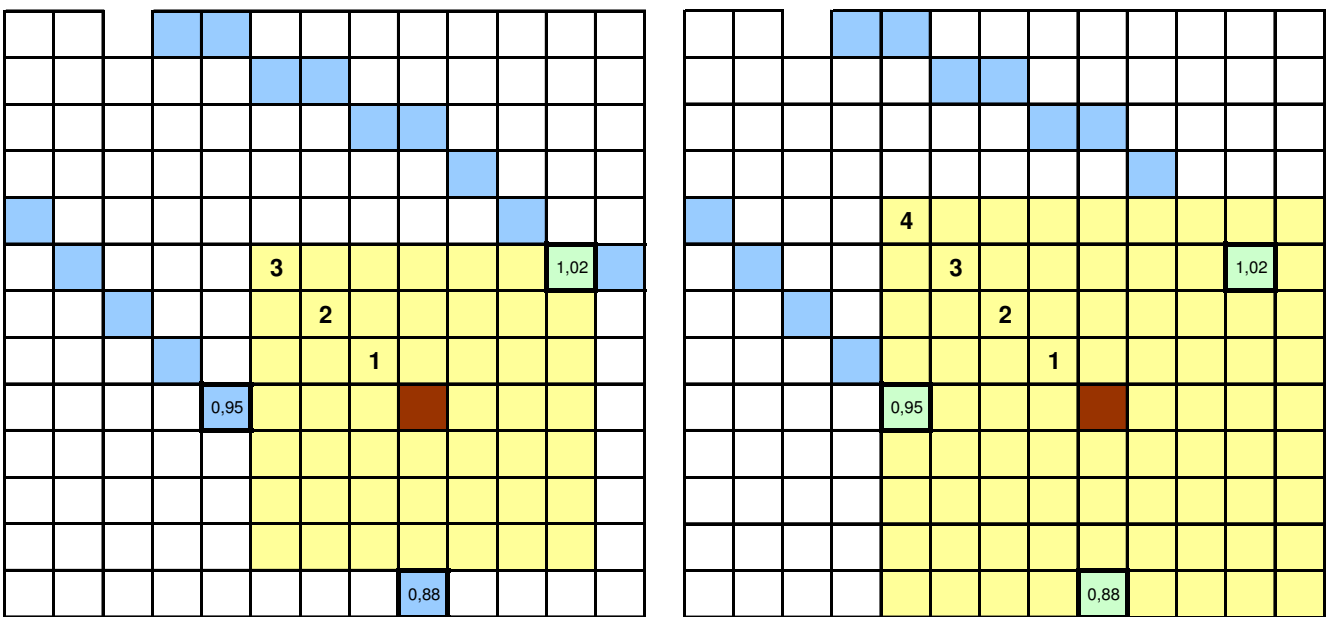


Abbildung 3-32: Schritt 3 (linke Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 3$, I enthält eine Falllinie mit einem Repräsentanten; Schritt 4 (rechte Abb.): Zielpunkt mit Interpolationsbereich $I = 4$, I enthält die zweite Falllinie mit zwei Repräsentanten

3.3.6 Rinnenoptimierung

Grundlagen

Während alle anderen Modellierungsvarianten vom User zu editieren sind, ist dies bei Entwässerungsrinnen ebenfalls möglich („Definierte Rinnen“ im Modul „Rinnen“). Daneben

gibt es einen Optimierungsalgorithmus. Dieser ist ein auf verschiedenen Bewertungsverfahren und -varianten basierender Batch-Algorithmus.

Grundprinzip ist, dass automatisch über eine vorzugebende Schrittweite a am Fahrbahnrand sukzessiv Rinnen gesetzt werden. Für jede Variante werden diverse Bewertungskenngrößen berechnet. Eine davon kann als Optimierungskenngröße gewählt werden.

Über die Falllinien- und Wasserfilmdickenverteilungen im Ohne-Fall ist zumindest der grobe Bereich vorhersagbar, in dem Rinnen zu setzen sind. Dieser kann als Rinnenbereich vom Anwender definiert werden. Die jeweilige optimale Position und –ausrichtung jedoch ist trivialerweise nicht vorherzusagen, da die Wirkungseffekte und die Kombination mit ihren Bewertungen sehr komplex sind. Dies trifft vor allem bei mehreren gleichzeitigen Rinnen zu. In Abbildung 3-33 ist zu erkennen, wie die Einzugsgebiete für zwei einfache Trassierungsbeispiele definiert werden.

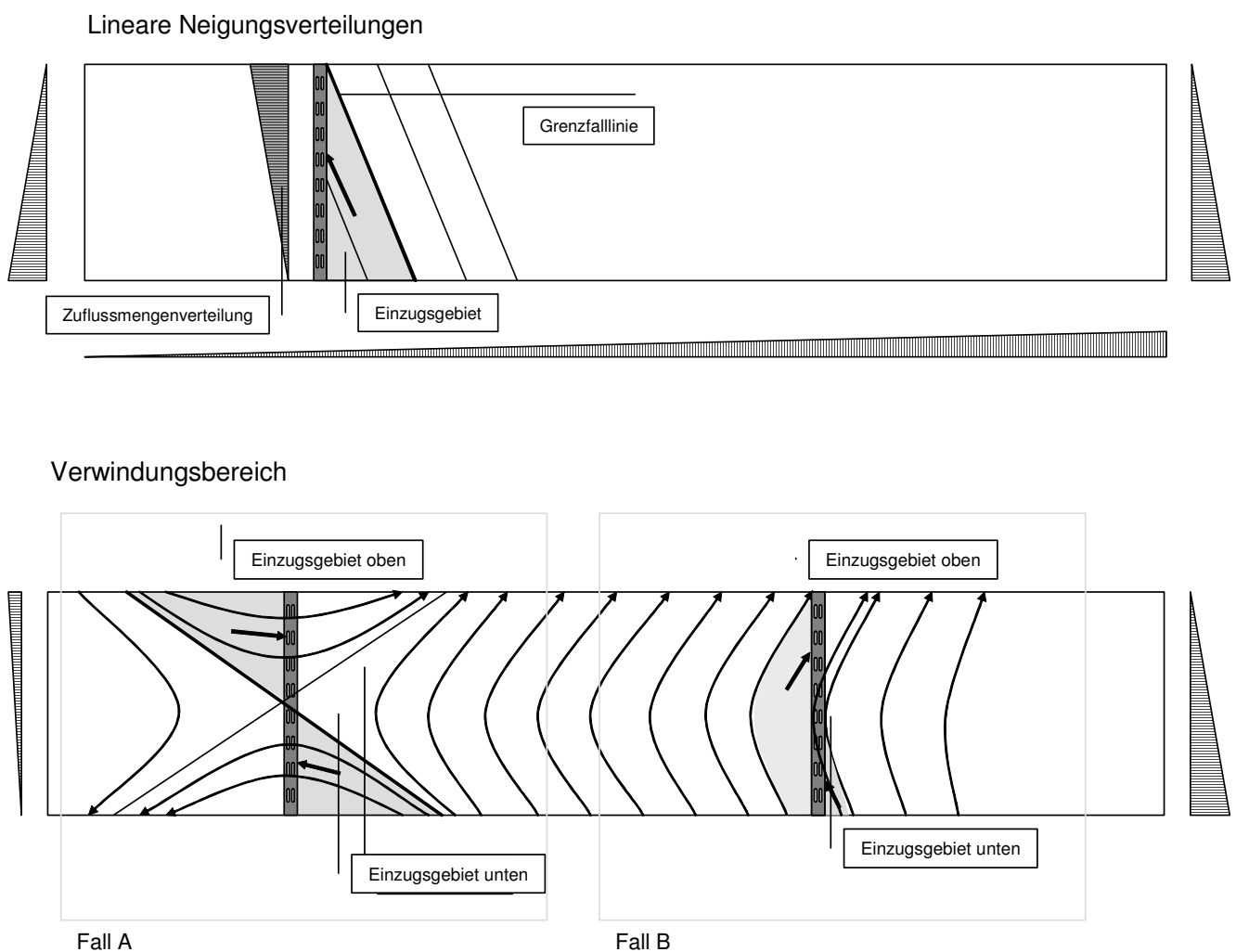


Abbildung 3-33: Querrinnen über die Fahrbahnbreite mit Falllinien und Einzugsgebieten. Oben: Standard-Streckenabschnitt ($q = \text{const.}$, $s = \text{const.}$), unten: Verwindungsbereich mit $s = 0\%$.

Aus Untersuchungen zur maximalen Wasseraufnahmekapazität von Querrinnen (vgl. Abbildung 3-34 und Abbildung 3-35) wurde der Grad der Abminderung der Wasserfilmdicken in Abhängigkeit der Sohlneigungen im Zufluss und der Zuflusswassermenge bzw.

Beregnungsintensität ermittelt. Untersucht wurden die beiden Modelle RD100 und RD200 der Fa. ACO Drain Passavant GmbH, Rendsburg.

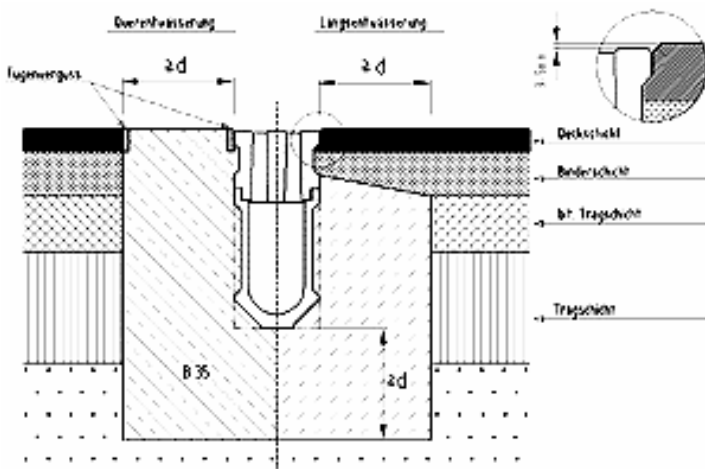


Abbildung 3-34 ACO-Drain Querrinne. Prinzipskizze für den Einbau in Asphalt (ACO PASSAVANT, 2003)

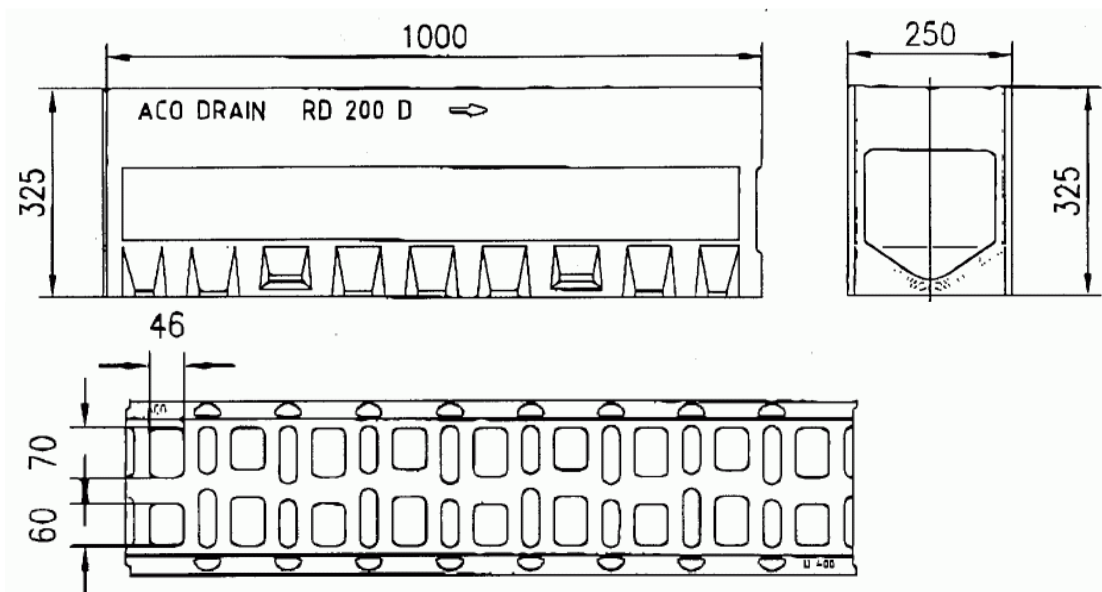


Abbildung 3-35: Detail Einlaufquerschnitt ACO-Drain RD 200 D (ACO PASSAVANT, 2003)

Die empirisch gewonnenen Zusammenhänge wurden in das Modell implementiert. In den meisten Fällen sind die Rinnen in der Lage, sämtliches anströmendes Oberflächenwasser aufzunehmen. Dies wird modelliert über eine Abminderung der Wassermenge im Fließquerschnitt bzw. über Kürzung der Fließweglänge.

Obwohl das Entfernen sämtlichen Oberflächenwassers die Vermutung zulässt, dass bei den in Verwindungsbereichen üblichen Falllinienlängen von über 90 m sehr weitreichende Auswirkungen erreicht werden, ist dies auf Grund der schnellen Zunahme der Wasserfilmdicke mit der Fließweglänge deutlich weniger der Fall. Der Effekt der Abminderung des Abflusses durch eine Querrinne und der darauf folgende, rasche Anstieg der Wasserfilmdicke ist

anhand der längsten Falllinie im Ohne-Fall (ID 794 mit 93,11 m Fließweglänge) in Abbildung 3-36 dargestellt.

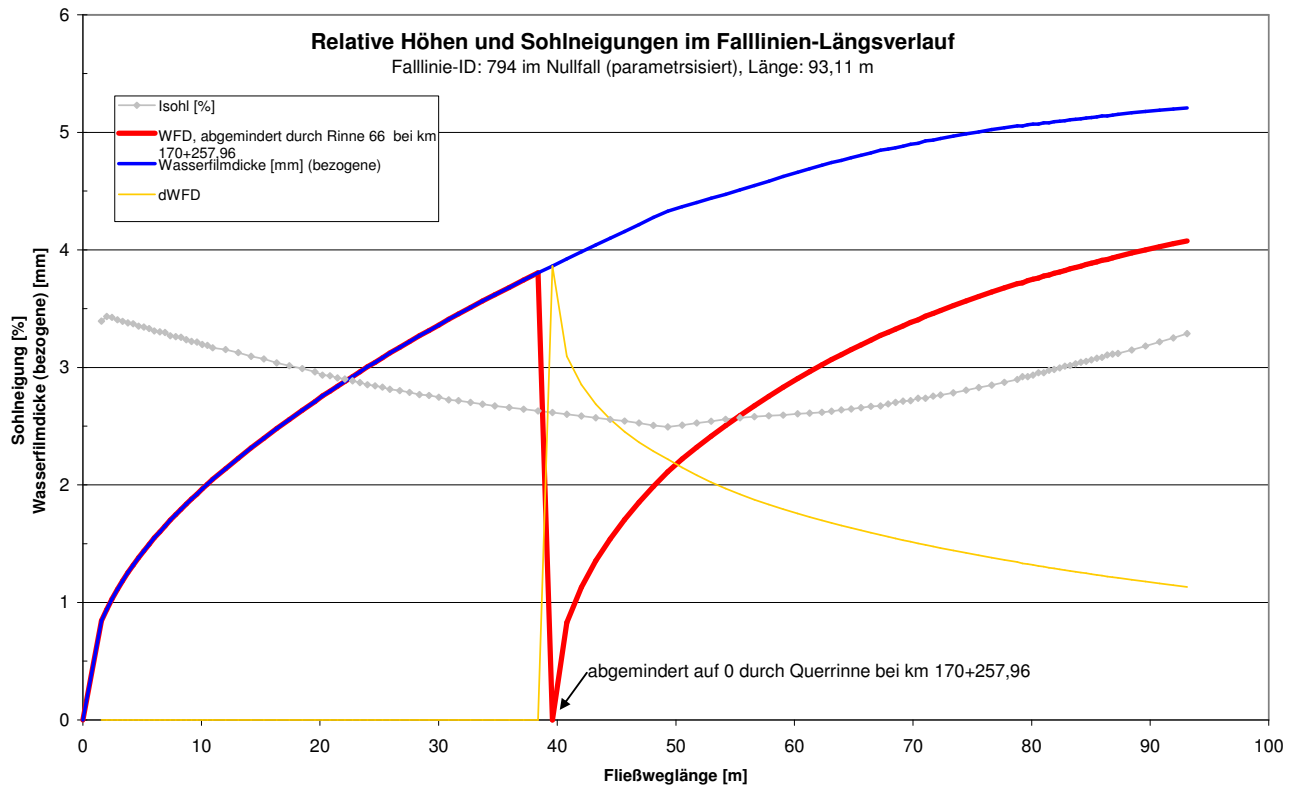


Abbildung 3-36: Abminderung des 1-dimensionalen Wasserabflusses beim Überqueren einer Entwässerungsrinne (Beispiel: Falllinie 794 im Ohne-Fall und Querrinne bei km 170+257,96)

Die Differenz der Wasserfilmdicken zwischen abgeminderter und ursprünglicher Falllinie nimmt sehr schnell wieder ab. Auf Aquaplaning-Geschwindigkeiten umgerechnet, tritt dieser Effekt noch deutlicher in Erscheinung.

Bewertungsschema

Für die Beurteilung der optimalen Rinnenanordnung (Rinnenposition und -ausrichtung) sind in PLANUS zwei unterschiedliche Verfahren implementiert:

„Zielgröße erreichen“

Die Routine versucht, ein gewähltes Zielkriterium zu verbessern: entweder die Wasserfilmdicke zu minimieren oder die Aquaplaning-Geschwindigkeit zu maximieren.

$$B = \max WFD \quad \text{bzw.} \quad \min Vaq \Big|_{B \in E} \quad (3-82)$$

mit:

- B = Bewertungsgröße, variat
- E = Bewertungsbereich
($E \subset M \dots$ Modellierungsbereich)

„Leistungsfähigkeit maximieren“

Die Routine versucht, die Rinnen so anzuordnen, dass sie ein Maximum an Wassermenge aus dem System bringen. Als Mittel zur Messung der Leistungsfähigkeit werden die Differenzrechnungen (Mitfall – Ohnefall) herangezogen. Da der Differenzwert (Wasserfilmdicke bzw. Aquaplaning-Geschwindigkeit) für jede Zelle in diskreter Form, also punktweise vorliegt, bietet es sich an, die Differenzen aller Zellen zu summieren. Der offensichtliche Einfluss der Rinnenlänge auf die Leistungsfähigkeit muss herausgekürzt werden. Hierzu wird die Bewertungsgröße auf die Rinnenlänge bezogen (Leistung pro Rinnenlänge).

Ein weiteres mögliches Bezugskriterium, welches in PLANUS zur Bewertung vorgegeben werden könnte, sind die Herstellungskosten einer Rinne in Abhängigkeit der Rinnenlänge oder des Einbauwinkels. Hierzu fehlen jedoch bislang Erfahrungswerte. Eine Programmiererweiterung ist jedoch problemlos zu ergänzen.

Hinzu kommt die Überlegung, dass die diskreten Differenzbeträge unterschiedlich zu gewichten sein sollten. Dies kann durch die Potenzierung der einzelnen Zellwerte erreicht werden. Durch größere Exponenten werden größere Zellwerte stärker berücksichtigt:

$$B = \frac{\sum_i \text{sign}(\Delta w_i) \cdot |\Delta w_i^k|}{L_{Ri}} \cdot g^2 \Big|_{\Delta w_i \in E} \quad (3-83)$$

mit:

- B = Bewertungsgröße, variat
- Δw_i = Differenzwert (Mitfall – Ohnefall) der Zelle i, Wasserfilmdicke, mm bzw. Aquaplaning-Geschwindigkeit, km/h
- L_{Ri} = Rinnenlänge, m, bzw. Herstellungskosten, GE
- E = Bewertungsbereich
($E \subset M \dots$ Modellierungsbereich)
- k = Exponent zur Gewichtung von Δw
- $\text{sign}(X)$ = Vorzeichenfunktion, $\text{sign}(X) = 1$, wenn $X > 0$, $\text{sign}(X) = -1$, wenn $X < 0$,
 $\text{sign}(X) = 0$, wenn $X = 0$
- g = Rasterdichte, m^{-2}

Ein Rinnen-Optimierungslauf in PLANUS wird durch ein Batch-Script gesteuert, welches die einzelnen Programm-Module¹³ von PLANUS sequenziell aufruft. Dieses Script kann durch ein User-Interface grafisch interaktiv editiert werden kann. Für die Optimierungsläufe können folgende Rinnen-Attribute vorgegeben und variiert bzw. optimiert werden:

¹³ Falllinien-Generierung und 1-dim. Abflusssimulation, Wasserfilmdicken verteilen, Aquaplaningmodell (vgl. Kapitel 0)

1. Rinnenposition

In der inneren Schleife werden entlang des definierbaren Randbereichs $RR \in R$ Rinnen im vorgegebenen Abstand a generiert. a muss ein ganzzahliges Vielfaches der Rasterdichte g betragen.

2. Rinnenausrichtung

In der äußeren Schleife werden die Rinnen entsprechend der vorgegebenen Winkelwerte $\alpha_{k=1\dots K}$ aus der Winkel-Liste ausgerichtet.

Die Anzahl an Durchläufen N in 1. und 2. ergibt sich damit zu:

$$N_{1/2} = \frac{L_{RR}}{a} \cdot K \quad (3-84)$$

mit:

- L_{RR} = Länge des Randbereichs RR , entlang dem Rinnen erzeugt werden, m
- a = Abstand zwischen einzelnen Rinnen, m , $a = \{1,2,3,4,\dots\} \cdot g$
- K = Anzahl unterschiedlicher Rinnenausrichtungen

3. Nach beiden Schleifendurchläufen erfolgt eine Bewertung in Bezug auf das gewählte Kriterium B . Die optimale Rinnenanordnung¹⁴ wird gewählt und fixiert. Dann wird die Rinnenanzahl inkrementiert und die Schleifen 1 und 2 durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist¹⁵. Die äußerste Schleife 3 zählt damit die Anzahl der gleichzeitig angeordneten Rinnen R .

Insgesamt ergibt sich die Anzahl der Optimierungsdurchläufe N damit zu:

$$N_{1/2/3} = \sum_{i=1}^R [N_{1/2} - (i-1)] \quad (3-85)$$

da keine Rinnenposition mehrfach besetzt werden kann. Mit der Vorgabe, dass sich keine Rinnen kreuzen dürfen, kann sich – bei Schrägrinnen – $N_{1/2/3}$ weiter reduzieren.

3.4 Modell-Erweiterung

Das in Kapitel 3 beschriebene, ursprüngliche PLANUS-Modell wurde für folgende neuen Anforderungen erweitert:

¹⁴ Kombination aus Rinnenausrichtung und –position.

¹⁵ Maximale vorgegebene Rinnenanzahl erreicht oder Zielkriterium erfüllt, z.B. eine min. V_{aq} im gesamten Bewertungsbereich E von 100 km/h wurde erreicht.

- irreguläre Topologie
- ungerichtete Raumdaten als Modellierungsgrundlage

Die Einstufung der *irregulären Topologien* in den Modellierungsalgorithmus ergibt sich aus allgemeinen Betrachtungen zur Größenordnung von Oberflächen (vgl. Abbildung 3-37). Die planerisch beabsichtigte Topologie entspricht der Form nach dieser Einstufung. Die Größenordnung (1.) der Gestaltabweichung erlaubt eine geometrische Modellierung mit dem ursprünglichen Falllinien-Algorithmus.

Die Makrotextur (Wellenlänge: $5 < \lambda < 50$ mm) der Fahrbahnoberfläche entspricht einer Gestaltabweichung 3. Ordnung. Sie wird im Modell nicht geometrisch, sondern als Grundrauschen in Form einer den Fließwiderstand beschreibende Rauheitskenngröße, aufgefasst.

Eine geometrische Modellierung der Makrotextur ist im Grunde unrealistisch. Das Raster bei der Oberflächenabtastung, wie auch das Raster beim Modellieren müsste $g = 0,5$ cm betragen. Die MOSES-Daten wurden z.B. im 15 cm-Raster erfasst; die Untergrenze der Modellierung (Rechnerkapazität und -leistung) liegt bei ca. $g = 5 - 10$ cm.

Als Gestaltabweichung 4. Ordnung kann die Mikrotextur ($\lambda < 1$ mm) verstanden werden. Diese hat jedoch für den Aquaplaning-Effekt keine entscheidende Bedeutung.

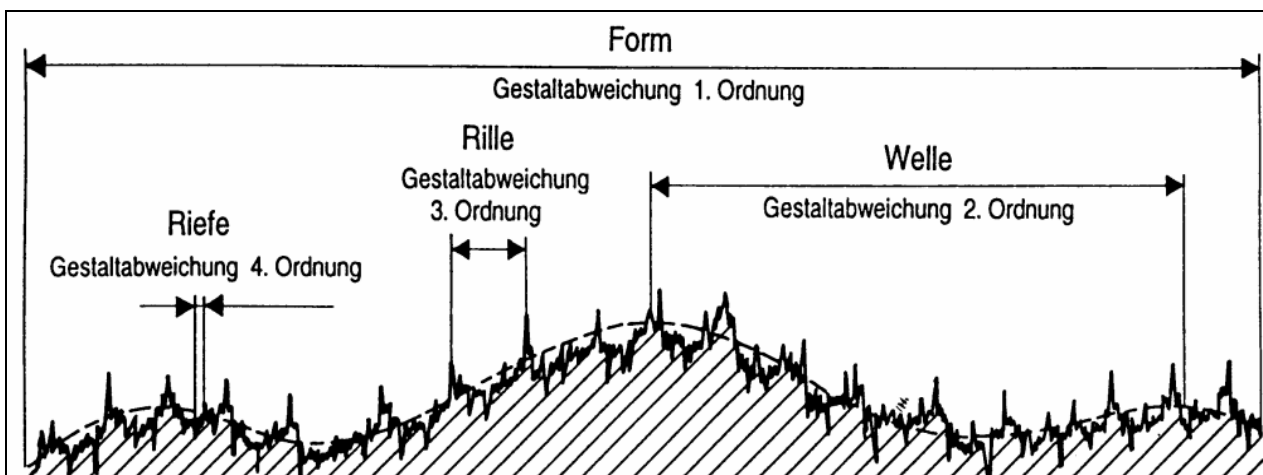


Abbildung 3-37: Überlagerte Formabweichungen unterschiedlicher Ordnung [DIN 4760]

Neu hinzu kommt nun die Irregularität der Fahrbahnoberfläche als Gestaltabweichung 2. Ordnung. Sie wird als irregulär bezeichnet, da sie ungewollt von der gewollten Form abweicht. Die Abweichungen ergeben sich aus:

- Einflüssen des Verkehrs (Spurrinnen),
- Ungenauigkeiten bei der Herstellung,
- Reparatur- und Flickstellen etc.

Damit ist jede reale Fahrbahnoberfläche im Grunde irregulär.

Da die Größenordnung dieser Irregularitäten im Bereich der Modellierungsgenauigkeit liegt, wird sie – wie die Form - geometrisch modelliert. Die Falllinien-Routine musste auf die Größenordnung dieser Abweichungen angepasst werden (s. Kapitel 3.4.3).

Die Anpassungen auf Grund von ungerichteten Raumdaten sind in Kapitel 3.4.1 und 3.4.5 beschrieben.

3.4.1 Import und Transformation der MOSES-(ungerichtete DA001)-Daten

Die MOSES-Messdaten liegen, wie bereits in 2.1.2 beschrieben, im DA001-Format vor; mit dem Unterschied, dass Achsnummer und Punktkennung nicht generisch vorhanden sind. Die Importroutine wurde dementsprechend angepasst.

1. Einlesen aller Zeilen (Punktwerte) der Datei (Abbildung 3-38) und Pufferung in einem Hilfsarray.

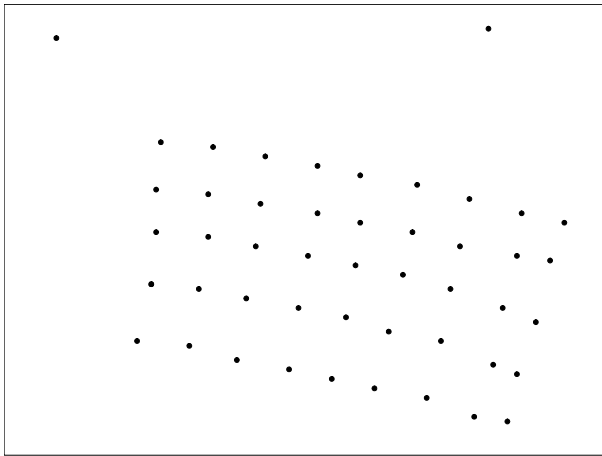


Abbildung 3-38: Beispiel für die als (unkoordinierte) Punktwolke vorliegenden Fahrbahntopologie-Daten (räumlich fixiert im GAUSS-KRÜGER-System); 2 „Ausreißer“ (abseits gelegene Punkte) sind im Datensatz enthalten.

2. Ermittlung der vier Eckpunkte des Datensatzes (Abbildung 3-39). Die Schwierigkeit besteht darin, „Ausreißer“ auszufiltern, damit diese nicht fälschlicherweise als Eckpunkte interpretiert werden. Dies geschieht über den Vergleich der Abstände eines Punktes zu seinen jeweiligen Nachbarpunkten mit der mittleren Punktdichte im gesamten Bereich.

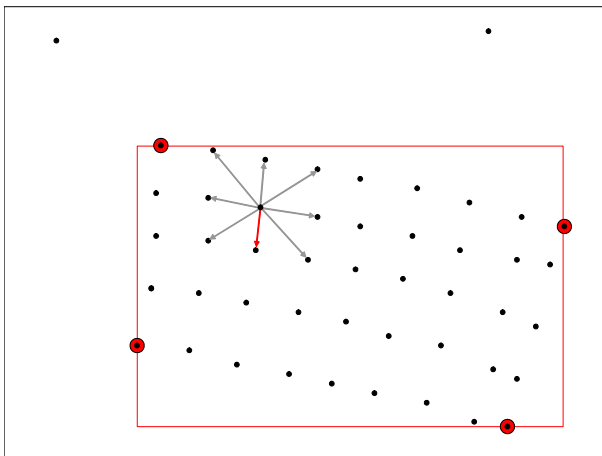


Abbildung 3-39: Modellierungsbereich mit den 4 Eckpunkten und Randabgrenzung

3. Transformation der ordinal vorliegenden Punktdaten in das raumbezogene Orthogonalraster (ORS) des Programms, dargestellt durch das Quadratgitter (Abbildung 3-40). Quadrate repräsentieren die Zellen des ORS, ihre Mittelpunkte sind die Ankerpunkte der Zellen. Im dem in Schritt 2 abgegrenzten Modellierungsbereich wird jede Zelle des ORS durchlaufen. Ihr Höhenwert wird dabei aus den drei nächstgelegenen Nachbarpunkten des GKS bezogen (über eine abstandsgewichtete Zielinterpolation). Nach dieser Regel kann einem Zielpunkt (des ORS) nur dann eine Höhenkoordinate zugeordnet werden, wenn er sich innerhalb eines im GKS aufgespannten Dreieckes befindet. In Abbildung 3-40 trifft dies für drei der exemplarischen Zielpunkte zu und für einen Punkt nicht.

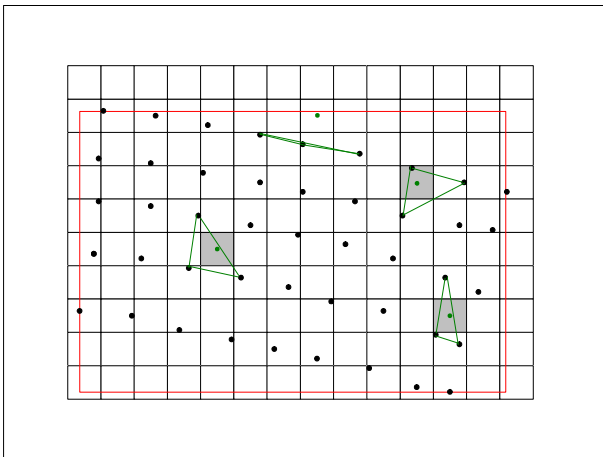


Abbildung 3-40: Illustration des Transformationsalgorithmus GKS → ORS

4. Alle ORS-Punkte, die nach 3. berechnet werden können, gelten als Teil der Fahrbahnfläche (in Abbildung 3-41 grau schattiert); die anderen Punkte liegen außerhalb der Fahrbahnfläche (Innenbereich), sind jedoch Teil des Modellierungsbereichs (s. Glossar). Der Fahrbahnrand wird durch die Grenze zwischen grauen und nicht schattierten Zellen gebildet.

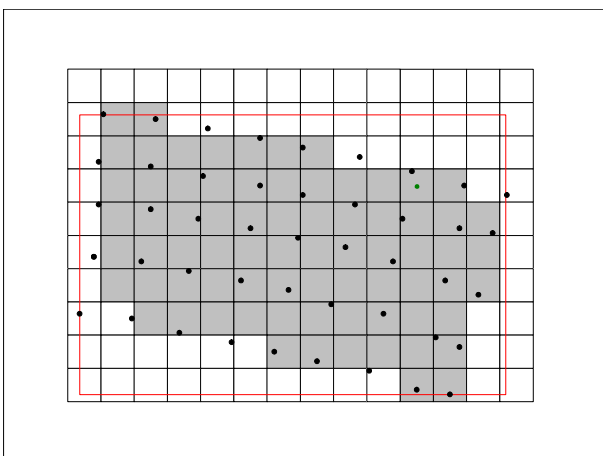


Abbildung 3-41: Abgrenzung des Innenbereichs (grau schattierte Zellen) im gesamten Modellierungsbereich

Diese Routine erwies sich als rechenzeit-beanspruchend. Sie muss jedoch für jeden Datensatz nur ein Mal durchgeführt werden, danach liegen die Daten im internen ORS-Format vor und können in dieser Form weiter verwandt werden.

Der Formalismus dazu ist folgender:

$$\sum_{m=1}^{\max_m} \sum_{n=1}^{\max_n} \left[d_{mn,k} = \sqrt{\left(x_{mn} - \sum_{k=1}^{\max_k} x_k \right)^2 + \left(y_{mn} - \sum_{k=1}^{\max_k} y_k \right)^2} \right] = \min \quad (3-86)$$

mit:

- m, n = diskrete X- bzw. Y-Zeiger
 max_... = Größe des Felds (m, n, oder k), Gitterzellen
 X_{mn}, Y_{mn} = auf das Koordinatensystem des Import-Datensatz konvertierte Rasterdaten, m
 k = Indexvariable für die eingelesenen Datensätze, -

wobei gilt:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{mn} = \begin{bmatrix} \min_X_k \\ \min_Y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} \cdot g \quad (3-87)$$

mit:

- min_...k = kleinster Wert der k Datensätze (X bzw. Y)
 g = Rasterdichte, m⁻¹

bewirkt eine Minimierung der Punktabstände zum temporären Zielpunkt {m; n}. Mit obiger Routine werden die 3 nächstgelegenen Punkte um den Punkt {m; n} gesammelt. Im Normalfall bilden diese ein Dreieck. Ist der Punkt {m; n} innerhalb dieses Dreiecks, so ist dieser kein Randpunkt und seine Punktwerte können wie folgt aus den 3 Punkten interpoliert werden:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{mn} = \frac{\frac{1}{d_I} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_I + \frac{1}{d_{II}} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{II} + \frac{1}{d_{III}} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{III}}{d_I + d_{II} + d_{III}} \quad (3-88)$$

mit:

- X, Y, Z = X-, Y- Koordinaten (z.B. GAUSS-KRÜGER-System), Z, Höhe ü NN, m
 m, n = diskrete X- bzw. Y-Zeiger
 d = Abstände d_{mn,k} für die 3 nächsten Punkte
 I, II, III = Indizes für die 3 nächsten Punkte

3.4.2 Import und Diskretisierung von Achsdaten (DA055, DA066)

Unabhängig von der Codierung (DA055 oder DA066) und dem Aufbau des Datensatzes liegen achsbezogene Fahrbahndaten grundsätzlich in einer Form wie in Abbildung 3-42 dargestellt vor.

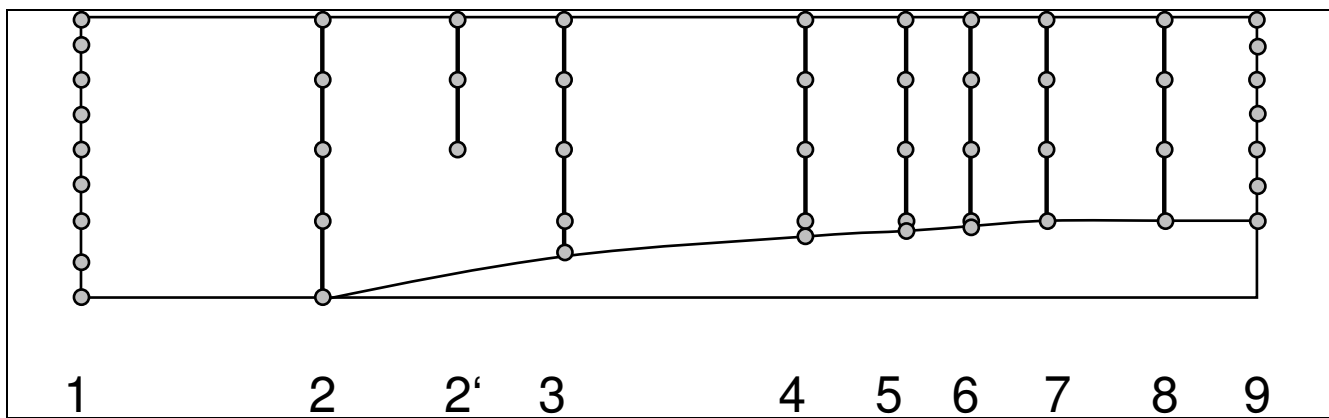


Abbildung 3-42: Grundaufbau achsbezogener Datenarten

Die Fahrbahnoberfläche wird durch Querprofile (hier 1...9) zusammengesetzt, die wiederum aus ihren Stützpunkten aufgebaut sind. Der Abstand und die Zahl der Stützpunkte im Querprofil ist beliebig, ebenso der Abstand der Querprofile untereinander. Die Länge der Querprofile kann auch veränderlich sein, um, wie im Beispiel eine Fahrbahneinengung abzubilden. Sind einzelne Querprofile in der Folge verkürzt, wie im Beispiel das Profil 2', so wird davon ausgegangen, dass dieses Profil nicht den Verlauf des Fahrbahnrandes abbildet, sondern als zusätzliches Stützprofil zur Erhöhung der Punktdichte in dessen Umgebung dient. Im Gebrauch der Datenarten stehen die Stützpunkte innerhalb einzelner Querprofile oftmals für die Querschnittseinteilung, d.h. sie befinden sich auf Fahrbahnmarkierungen (im Beispiel also 3 Fahrstreifen, verengt von 4, ohne Standstreifen).

Der Diskretisierungsalgorithmus folgt diesem Muster. Zuerst werden die Querprofile aus den vorhandenen Stützpunkten interpoliert. Im zweiten Schritt werden die Längsprofile interpoliert indem die Querprofilspunkte (auch interpolierte) zu den Zwischenpunkten verbunden werden.

Die Routine ist Folgende:

Zuerst werden die Daten punktweise eingelesen und gesammelt. Dabei werden folgende Informationen berücksichtigt:

$$IR_k = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ bkm \end{bmatrix}_{k=0..max_k} \quad (3-89)$$

mit:

IR = Punktdatensatz

k = Indexvariable für die Punktdatensätze

Nun wird die Schleife k durchlaufen; die Zugehörigkeit der Punkte zu einer Querprofilgruppe q kann anhand des Betriebskilometers bkm identifiziert werden, daher sind die (meist zusätzlich vorhandenen) Achs- und Punkt-IDs unerheblich.

Für das Interpolieren der Querprofile gilt:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{mn} = \frac{Y_{m+1} - Y_k}{Y_{k+1} - Y_k} \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{k+1} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_k \right) + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_k \quad (3-90)$$

unter den Voraussetzungen

$$\{m; n\} \in q \text{ und } \{X_k; Y_k\}, \{X_{k+1}; Y_{k+1}\} \in q \quad (3-91)$$

mit:

- X = X-Koordinate (Fahrbahnlängsrichtung), entspricht Betriebs-km (BKM)
- Y = Y-Koordinate (Fahrbahnquerrichtung), m
- Z = Höhe, m ü NN
- m, n = diskrete X- bzw. Y-Zeiger
- k = Zeiger auf den Punktdatensatz (k = 1...max_k)
- q = Index der Querprofilgruppe (q = 1...max_q)

Für alle in Längsrichtung verbleibenden Zwischenpunkte {m;n}, für die gilt:

$$\exists \{m-i; n\} \in q \text{ und } \{m+j; n\} \in q+1 \quad (3-92)$$

kann der Punktwert aus diesen beiden Punkten interpoliert werden:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{mn} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(m-i, n)} + \frac{i}{i+j} \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(m+j, n)} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(m-i, n)} \right) \quad (3-93)$$

mit:

- i = X-Abstand von {m; n} zum vorhergehenden Querprofil (q-1)
- j = X-Abstand von {m; n} zum folgenden Querprofil (q)

3.4.3 Anpassung der Falllinien-Routine an die irreguläre Topologie

Die ursprüngliche Beschreibung der Umrandung des Fahrbahntopologie-Modells durch ein 4-Phasen-System (oben – rechts – unten – links) ergab sich aus dem Charakter des Orthogonalrasters.

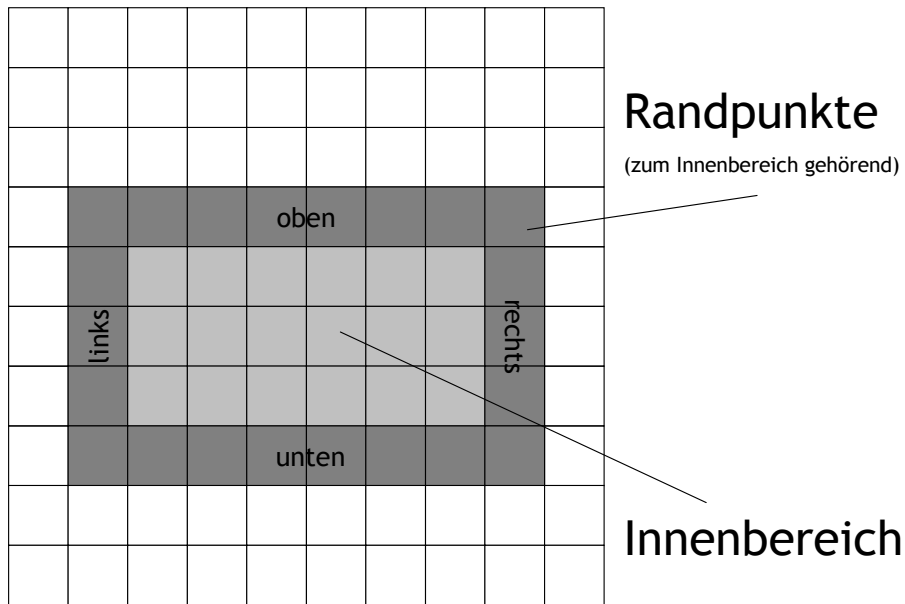


Abbildung 3-43: 4-Phasen-System zur Umrandung des Fahrbahnbereichs

Die Bewegungsroutine entlang dieser Umrandung war simpel aufgebaut:

$$\begin{bmatrix} m_{i+1} \\ n_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i \\ n_i \end{bmatrix} + s \cdot \begin{bmatrix} \delta_{13} \\ \delta_{24} \end{bmatrix} \tag{3-94}$$

wobei

$$\begin{bmatrix} \delta_{13} \\ \delta_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ph.1 & Ph.2 & Ph.3 & Ph.4 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{3-95}$$

mit:

- i = Index auf Startpunkt der Falllinien (o.a.)
- s = Schrittweite bei der Randbewegung (Falllinienabstände) , Zellen

Für die irreguläre Topologie musste diese Vorgehensweise deutlich flexibilisiert werden. Nachdem die Umrandung jedwede Form annehmen kann, sollte der Algorithmus in der Lage sein, den Rand selbständig zu finden. Die einzigen Informationen, die hierzu vorliegen, ist die Einteilung der Zellen nach $BD = 1$: Fahrbahnbereich und $BD = 0$: Außenbereich. Zudem muss der Algorithmus einen Randpunkt haben, von dem aus die Routine startet. Er ist auf Grund der der BD -Eigenschaft in der Lage, sich diesen Punkt selbst zu setzen.

Für die Eigenschaft „Randpunkt“ muss gelten:

$$\{m;n\} \in I \text{ und:} \\ \exists n \text{ Zellen } P \subseteq Dir \subseteq I \text{ in } U_{\{m;n\}} = 1, 1 \geq n \geq 3 \tag{3-96}$$

mit:

- Dir = Direkt angrenzende Zellen (s. Glossar)

- I = Innenbereich
- $U_{\{m; n\}}$ = Größe des Umgebungsbereichs um den Punkt $\{m; n\}$, größter orthogonaler Zellabstand
- P = Bezeichner für Zellen/Punkte
- n = Anzahl (der Elemente mit den gegebenen Eigenschaften), -

Die Abbildung 3-44 schematisiert die Logik. Grau dargestellt sind die Zellen des Innenbereichs. Zellen, die am Rand des Innenbereichs sind, haben weniger als 4 benachbarte Zellen des Innenbereichs, sind aber selbst Element des Innenbereichs. Beide Argumente müssen wahr sein.

								1	1		
							1	2	3	2	
					1	2	3	4	2	2	
			1	2	2	3	4	4	4	1	1
X	1	2	2	3	4	4	4	4	2	2	
X	3	3	4	4	4	4	4	4	3	1	
X	4	4	4	4	4	4	4	4	2	1	
X	4	4	4	4	4	4	4	3	3		
X	4	4	4	4	4	4	4	4	2	1	
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Abbildung 3-44: Lokalisieren von Randzellen

Die Routine zum Erzeugen der Falllinien orientiert sich an den Randzellen. Ausgehend von einer beliebigen Startzelle im Randbereich wird in einem Umkreis $U = 1$ (Zellen $u = 1 \dots 8 \in U$) von einer Zelle eine Nachbarzelle ermittelt, die auch dem Randbereich angehören muss. Diese wird nun als Startzelle definiert und die Schleife wiederholt. Folgende notwendige Forderungen werden zur Stabilität bzw. Konsistenz getroffen:

1. Damit keine ungewollte Richtungsumkehr auftritt, wird der Schrittwinkel ρ_i gemerkt. Die Winkeldifferenz mit dem Folgewinkel ρ_{i+1} darf maximal 90° betragen:

$$\forall u \in U, \Delta\rho_i = \rho_{i+1,U} - \rho_i \leq 90^\circ \tag{3-97}$$

Im Beispiel in Abbildung 3-45 stehen für die Zelle i im Umkreis U drei Nachbarzellen zur Verfügung. Mit $\rho_i = 135^\circ$ ist durch die Winkelbedingung eine Richtungsumkehr zur vorigen Zelle $u = 8$ mit $\Delta\rho = 315^\circ - 135^\circ = 180^\circ$ ausgeschlossen.

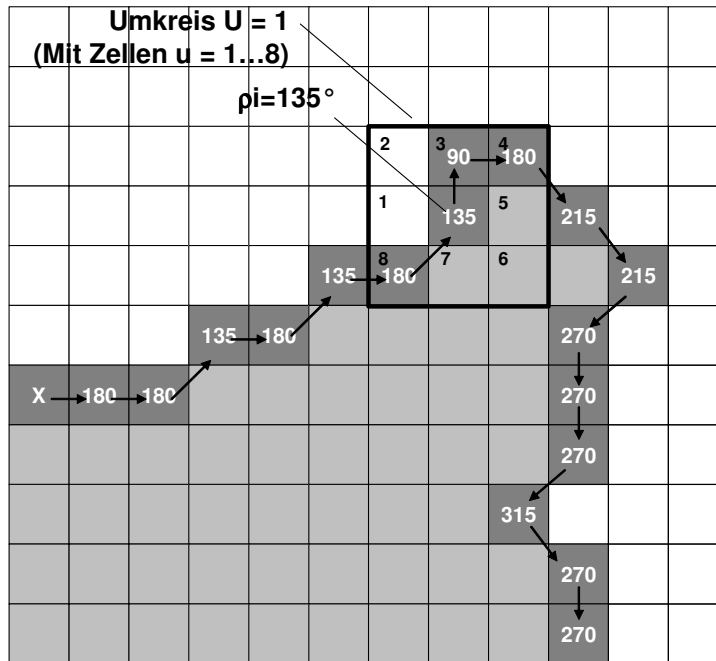


Abbildung 3-45: Routensuche entlang Randbereich

2. Daneben werden direkt angrenzende Folgezellen gegenüber indirekten Nachbarzellen bevorzugt gewählt.

$$u_i \in Dir! \tag{3-98}$$

Damit wird nun verhindert, dass bei einer Situation wie in Abbildung 3-45 der darüber liegende Punkt $u = 3$ ausgelassen würde. Er wird - trotz größerer Differenz $\Delta\rho = 90^\circ - 135^\circ = 45^\circ$ - dem schräg benachbarten Punkt $u = 4$ ($\Delta\rho = 135^\circ - 135^\circ = 0^\circ$) vorgezogen.

3.4.4 Geometrische Ermittlung der Falllinien-Verläufe

Die oberflächlich abfließende Wasserströmung (bzw. die Falllinie) erfährt Richtungsänderungen bzw. Ablenkungen aus der momentanen Fließrichtung durch die Einwirkung eines Impulses in Form einer Beschleunigung (orthogonal zur Fließrichtung). Je höher die Fließgeschwindigkeit, umso größer muss die Beschleunigungskomponente senkrecht zur Fließrichtung sein. Dieser Zusammenhang ist in den Impulsgleichungen der Hydrodynamik (NAVIER-STOKES-Gleichungen) erfasst.

Im Gegensatz dazu werden beim hier entwickelten Winkelschrittverfahren die Falllinien allein aus der Topografie der Fahrbahnoberfläche entwickelt (rein geometrisch). Eine Änderung der Topografie, die eine Falllinie aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung ablenkt (z.B. durch Zunahme des Gefälles quer zur Fließrichtung) hat bei geometrischen Winkelschrittverfahren unmittelbare und direkte Auswirkungen auf den Falllinien-Verlauf.

Unter Berücksichtigung von Fließgeschwindigkeit und Beschleunigung (Hydrodynamik), löst die Änderung der Topografie zuerst eine Querbeschleunigung aus, die dann – abhängig von der Fließgeschwindigkeit, die orthogonale (zur Fließrichtung) Geschwindigkeitskomponente vergrößert. Damit ändert sich auch die Richtung für die Strömung.

Die Gründe für die Anwendung eines geometrischen Winkelschrittverfahrens wurden bereits oben (Kap. 2.1.1) bzw. in RESSEL/HERRMANN (2006A) angeführt (Stabilität, Rechengeschwindigkeit, Kalibrierungsmöglichkeit durch Modellversuche vs. reine Hydrodynamik).

3.4.5 Anpassung der Rinneniteration an die irreguläre Topologie

Die Randabwicklung bei der Rinneniteration entspricht derjenigen bei der Fallliniensuche (vgl. Kap. 3.4.3). Anders als beim Falllinien-Routing, bei dem sich die Schrittrichtung aus der Topologie ergibt, ist bei der Rinnendiskretisierung die Ausrichtung vorgegeben und muss auf den Fahrbahnbereich übertragen werden.

Die auf den Modellierungsbereich übertragene Rinnenausrichtung berechnet sich dabei aus dem Randwinkel am Ausgangspunkt der Rinne. In Abhängigkeit von der Richtung des Rand-Routing ergibt sich damit folgender Zusammenhang (vgl. Abbildung 3-46):

$$\tau = \begin{cases} \rho + \alpha & \text{bei } Ri.^+ \\ \rho - \alpha & \text{bei } Ri.^- \end{cases} \quad (3-99)$$

mit:

- τ = diskretisierte Rinnenausrichtung
- α = parametrische Rinnenausrichtung
($\alpha = 90^\circ$: Querrinne, ...)
- ρ = Randwinkel
- $Ri.$ = + : im Uhrzeigersinn und umg.

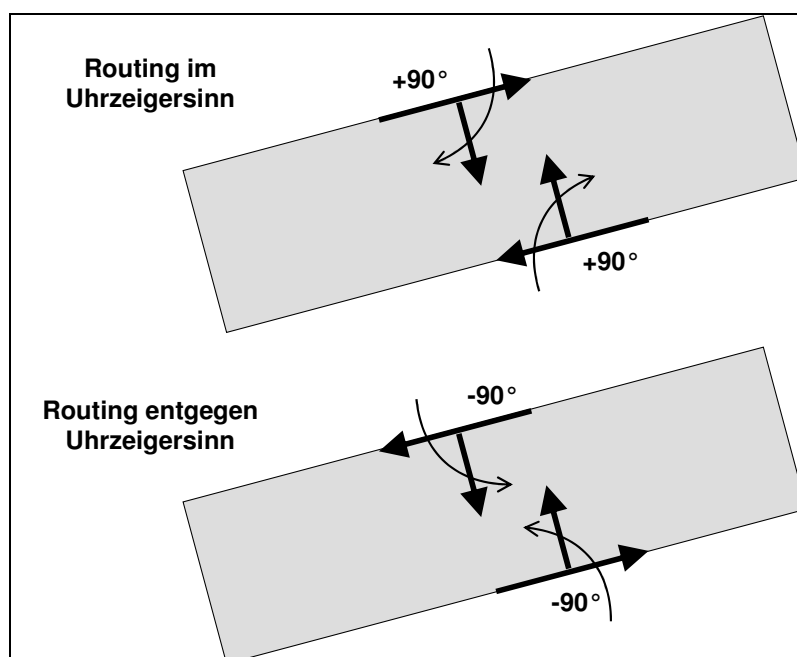


Abbildung 3-46: Diskretisierung der Rinnenausrichtung für irreguläre Topografien

Der Randwinkel kann durch Mittelung aus mehreren angrenzenden Randwinkeln ermittelt werden um eine Anpassung an die Randausrichtung zu erreichen. In Abbildung 3-47 ist dies exemplarisch für eine arithmetische (ungewichtete) Mittelung aus 6 Winkeln dargestellt. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, den Abstand des gewerteten Winkels zum Zielpunkt zu gewichten. Der Bezugsbereich (Anzahl der berücksichtigten Zellen) muss entsprechend groß gefasst sein, damit die diskretisierte Rinnenausrichtung nicht durch lokale Randwinkelsprünge ($\pm 45^\circ$) zu stark gestört wird. Ein Bezugsbereich von 10 wurde als default gesetzt (dies bedeutet, dass 20 benachbarte Zellen berücksichtigt werden). Eine andere Methode ist, den Ausgangspunkt mit demjenigen Punkt auf dem gegenüberliegenden Randbereich zu verbinden, der die geringste Bkm-Differenz aufweist¹⁶.

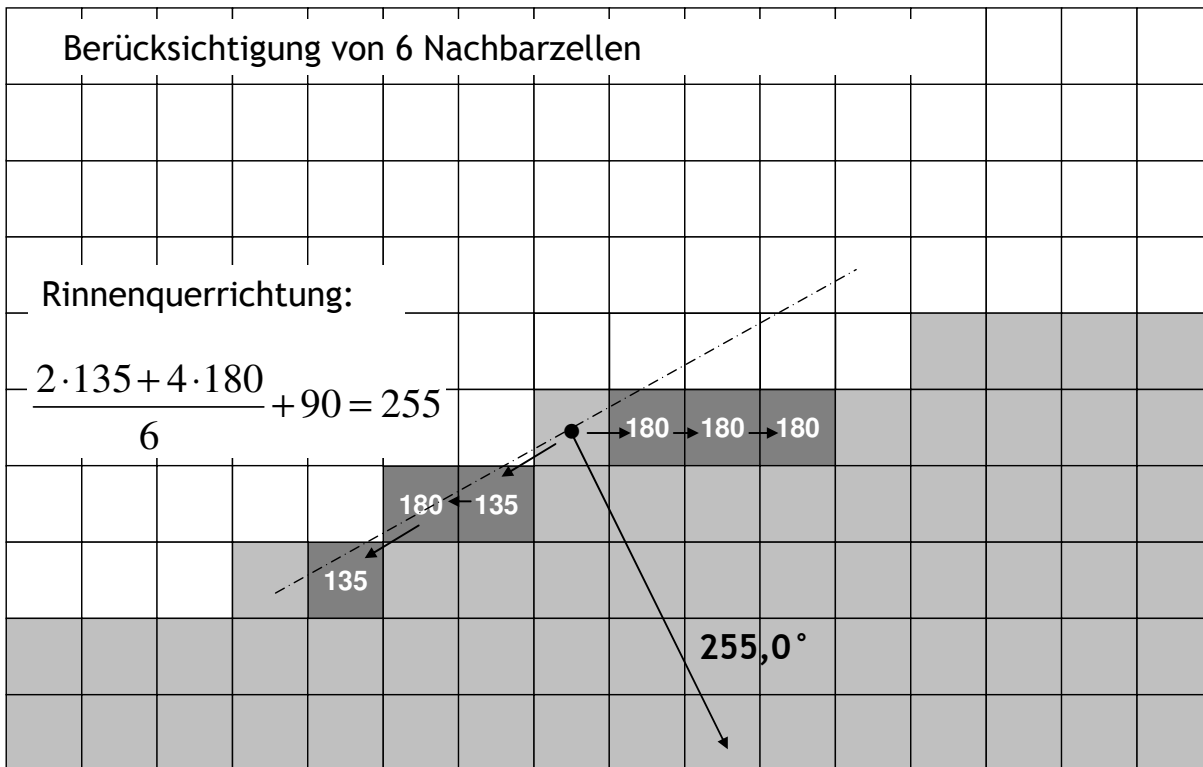


Abbildung 3-47: Diskretisierung von Entwässerungsrinnen

3.4.6 Einführung eines Texturmodells

Auch im Verlauf von relativ kurzen Abschnitten, wie sie bei der Modellierung von Verwindungsbereichen üblich sind (max. 1-2 km Länge), sind unterschiedliche Fahrbahnbeläge eher die Regel als die Ausnahme. So sind beim vorliegenden Beispiel BAB A8 (km 171 – 170) auf nur 1 km Streckenlänge in der Längsrichtung 6 verschiedene Fahrbahnbelags-Abschnitte vorhanden (vgl. Kap. 2.2.2).

¹⁶ Die beiden Bkm-Ränder können anhand des PLAN.OU-Attributs erkannt werden.

Ein weiterer Fall besteht darin, dass die einzelnen Fahrstreifen aus unterschiedlichen Belägen bestehen¹⁷.

Die Anforderung an das Texturmodell bestand also darin, dass sowohl in Längs- als auch Querrichtung unterschiedliche Texturen appliziert werden können.

In Abbildung 2-5 ist das Benutzerinterface für das Texturmodell abgebildet. Das Texturmodell besteht aus drei gekoppelten Elementen:

1. In der *Texturenliste* werden die unterschiedlichen Fahrbahnbeläge mit ihren kennzeichnenden Werten und Anmerkungen gesammelt. Die Texturenliste ist frei editierbar und erweiterbar.
2. Das *Texturmodell* weist den einzelnen Fahrbahnbereichen (längs/quer) eine Textur-ID zu, die zu den Kenndaten in der Texturenliste verweist. Das Texturmodell ist frei editierbar.
3. Im *TPlanus.TEX-Layer* werden die Textur-IDs diskretisiert den einzelnen Punkten der Fahrbahnoberfläche zugewiesen. Über die Verknüpfung zur Texturenliste werden die jeweiligen Rauheitswerte bei der Simulation berücksichtigt.

Das Diskretisieren des Texturmodells, also der Schritt von 2. auf 3., ist v.a. bei raumbezogenen Modellen, wie auch im Fall BAB A 8 (km 171-170) nicht trivial. Für die Unterteilung der Texturabschnitte wurde der Rinnen-Setzen-Algorithmus verwendet (Querrinnen); für das Auffüllen der Zellen innerhalb der durch Fahrbahnrand und gesetzter Unterteilung definierten Segmente mit der zugehörigen Textur-ID wurde eine FloodFill-Methode¹⁸ implementiert.

Die diskreten Textur-Kennwerte werden verwendet bei der

- Anwendung des Fließmodells, zur Beschreibung der Sohlrauhigkeit,
- Berechnung der Wasserfilmdicken, zur partiellen Ermittlung der bezogenen Wasserfilmdicken (nach HÖCKER, 1971) aus den Wassertiefen,
- Anwendung des Aquaplaning-Modells, bei der Berücksichtigung der Makrotextur als fiktiver Reifenprofiltiefe (basierend auf den volumetrischen Betrachtungen nach KALENDER, 1972; erweitert).

¹⁷ Oft anzutreffen ist z.B. der Fall, dass der rechte Fahrstreifen wegen der höheren Beanspruchungen durch den Schwerverkehr erneuert werden musste; die anderen Fahrbahnbereiche jedoch nicht.

¹⁸ FloodFill ist eine Standardmethode von Borland Delphi, sie kann jedoch nur auf Zeichenbereiche (TCanvas) angewendet werden. Für das TPlanus-Array musste daher eine eigene Methode entwickelt werden.

3.4.7 Grooving betrachtet als eingeprägte Makrotextur

Vereinfacht betrachtet ist Grooving nichts anderes als eine künstlich aufgeprägte Makrotextur. Vor allem wenn die Rauheit eine vergleichsweise untergeordnete Rolle spielt, ist diese Betrachtung eine praktikable Lösung. Eine detaillierte, geometrische Lösung, die den Wasserabfluss in den Rillen einzeln berücksichtigt und die Grooves als Mikrokanäle betrachtet, wurde in RESSEL/HERRMANN (2006B) entwickelt. Das Modell ist für die hier vorliegenden, (im Mega- bis Makrotexturbereich vorherrschenden) irregulären Topologie-Verhältnisse jedoch nicht praktikabel.

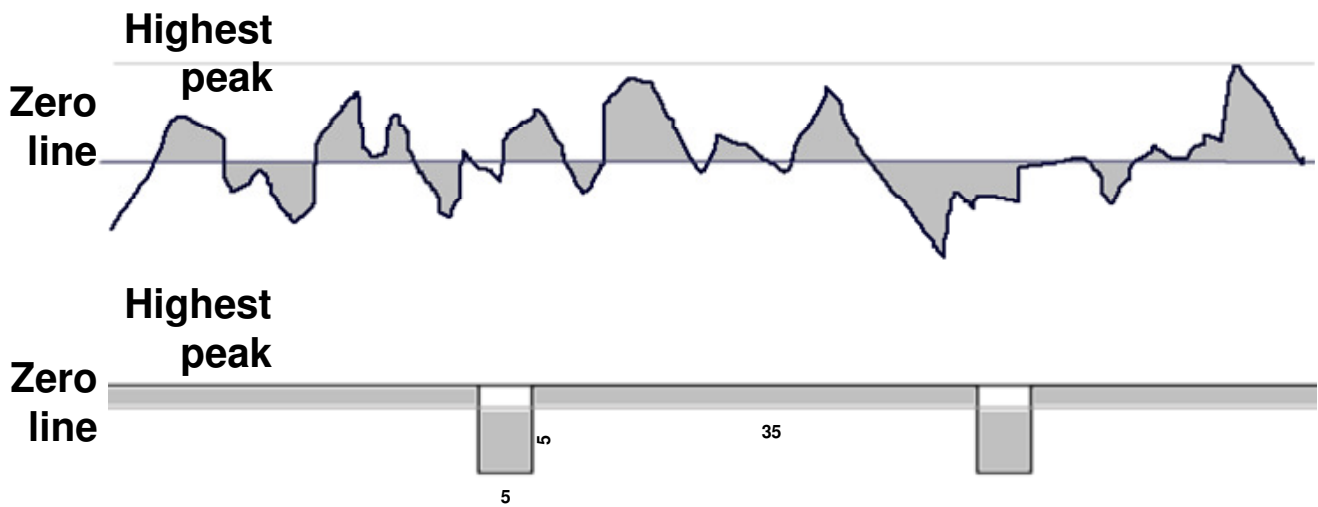


Abbildung 3-48: Profilschnitt bei natürlicher und künstlicher (Grooving) Makrotextur; nicht maßstäblich

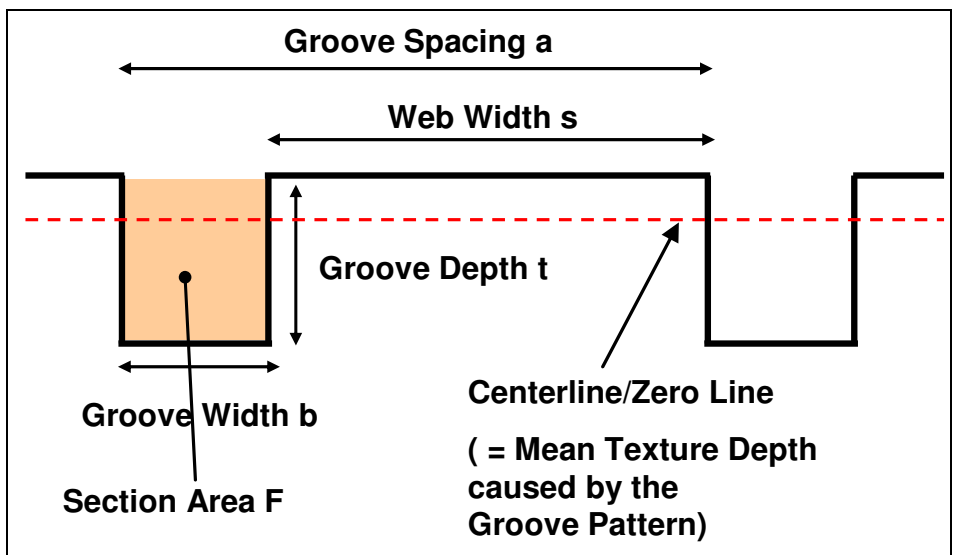


Abbildung 3-49: Grooving - Terminologie

Ausgehend von der obigen Terminologie wird die künstliche Makrotextur wie folgt berechnet:

Ermittlung der Nulllinie:

$$c = \frac{F}{a} = \frac{7 \cdot 7}{31} = 1,581 \quad (3-100)$$

mit:

- c = Position der Nulllinie, bezogen auf die theoretische Oberkante (falls MTD = 0) (in Übereinstimmung mit HÖCKER (1971): bezogene Wasserfilmdicke), mm
 F = Rillenfläche, mm²
 a = Rillenabstand, mm

Daraus berechnet sich die gedachte Texturtiefe MTD_n zu:

$$MTD_n = \frac{b \cdot (t - c) + s \cdot c}{a} \quad (3-101)$$

mit:

- b = Rillenbreite, mm
 t = Rillentiefe, mm
 s = Stegbreite, mm

Die Sohle des Rillenkanals wird infolge der Diamantfräsung als annähernd glatt vorausgesetzt. Damit wird die natürliche Texturtiefe MTD abgemindert auf:

$$MTD' = MTD \cdot \frac{s}{a} \quad (3-102)$$

Die verwendete Texturtiefe ergibt sich durch Superposition aus der abgeminderten, natürlichen und aus der künstlichen Makrotextur:

$$MTD = MTD' + MTD_n \quad (3-103)$$

4 MODELLIERUNGSERGEBNISSE

4.1 Annahmen

Die Modellierungsergebnisse werden von PLANUS als Text und Grafik ausgegeben. Für die Grafikausgabe sind die Klassengrenzen und Farbcodes (Legenden) vom Anwender editierbar. Im hier vorliegenden Bericht wurden zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieselben Grafik-Konfigurationen beibehalten. Diese sind auf einer Legendenübersicht, s. App. G, dargestellt.

Die Modellrechnungen wurden auf Basis von 4 (vereinzelt 6) unterschiedlichen Regenereignissen durchgeführt. Ausgehend von einem Basisregen $r_{15(n=1)}$ von 125,7 l/(s*ha) (Vorgabewert nach RAS-Ew für Stuttgart) wurden die Regenhäufigkeiten n variiert.

Anders als bei der Dimensionierung von Straßenentwässerungseinrichtungen gelten bei der Wahl des Bemessungs-Regenereignisses z.T. andere Prämissen. Diese leiten sich aus folgenden Überlegungen ab:

1. Sprühfahnen und Sichtweiten

Ab gewissen Regenintensitäten ist nicht mehr das Aquaplaning-Verhalten, sondern vermutlich die durch Sprühfahnen und Niederschlag abgeminderte Sichtweite der die Fahrgeschwindigkeit begrenzende Faktor. Eine Erhöhung der maximal möglichen, sicheren Fahrgeschwindigkeit kann somit ab diesem Punkt keine sicherheitsrelevante Verbesserung bringen.

2. „Imponderabilität“ (Unabwägbarkeit eines Ereignisses)

Dieser Effekt erklärt die These, dass nicht unbedingt sehr hohe und demnach seltene Regenereignisse für die Fahrsicherheit am gefährlichsten sind, sondern eher moderat hohe Regenereignisse. Deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sind dazu noch deutlich höher, d.h. es findet eine höhere Risiko-Exposition statt.

3. Wirtschaftlichkeit

Während ein Überschreiten der Leistungsfähigkeit von Straßenentwässerungseinrichtungen (Rohrleitungen, Abläufe...) hazardöse Auswirkungen haben kann, ist dies bei Aquaplaning-Betrachtungen prinzipiell nur bedingt der Fall. Zunächst wird nur die maximale Fahrgeschwindigkeit herabgesetzt, die noch als sicher einzustufen ist. Nach allen bisherigen Erkenntnissen bis auf eine Untergrenze von ca. 60 km/h, unter der Aquaplaning bei Pkw nahezu unwahrscheinlich wird. Wenn der Fahrer jedoch seine Geschwindigkeit den Wetterverhältnissen anpasst - was ihm durch §3 StVO auferlegt ist - so äußert sich dies in einer verminderten Reisegeschwindigkeit während des Regenfalls. Erst im Zusammenspiel mit weiteren Faktoren (tatsächliche Fahrgeschwindigkeit nicht an noch sichere Geschwindigkeit angepasst, zu geringe Reifenprofiliefen) wird aus dem Zeitverlust durch erhöhte Reisezeiten ein konkretes Sicherheitsrisiko.

Auf dieser Grundlage wurden die folgenden Regenhäufigkeiten für die Bemessung abgeleitet:

Regenhäufigkeit n [a⁻¹] (...): nur vereinzelt gerechnet	Regenspende r [l/(s*ha)] umgerechnet nach REINHOLD	Regenintensität i [mm/min]	Klassifizierung der Regenart (nach LUCAS, 1968)
(0,05)	347,56	2,085	Schwerster Gewitterregen
0,2	224,29	1,346	Schwerer Regenguss
1	125,70	0,754	Schwerer Regenguss
5	59,77	0,359	Starker Regen
10	38,60	0,232	Mittlerer Regen
(20)	20,79	0,125	Mittlerer Regen

Tabelle 5: Bemessungs-Regenereignisse für die Modellrechnungen

Aufbauend auf den Untersuchungen in Kap. 3.3.4 wurde im Falllinien-Modell für den Richtungssuchbereich $R = 1$ und für den Gradientensuchbereich $G = 6$ gewählt. Der Abstand der Fallliniengenerierung beträgt $a = 5$.

Ogleich das Simulationsmodell bzw. das Programm eine Variation der Reifenprofiltiefe vorsieht und dies auch immense Auswirkungen auf das Ergebnis einer Simulation hat, wurde für alle durchgeführten Simulationen die nach StVZO vorgeschriebene Mindestreifenprofiltiefe von 1,6 mm konstant beibehalten. Nur auf Basis dieser verordneten Größe kann eine abgesicherte Aquaplaning-Dimensionierung erfolgen.

Der erstaunlich deutliche Effekt unterschiedlicher Reifenprofiliefen ist jedoch in Kapitel 5 in verkürzter Form dargelegt.

4.2 Analyse des Abschnitts im Ist-Zustand (Ohne-Fall)

Abbildung 4-1 zeigt die modellierten Wasserfilmdicken und Aquaplaning-Geschwindigkeiten für den Ohne-Fall, d.h. für die Konfiguration, in der sich der Verwindungsbereich zum Zeitpunkt der Laseraufnahme befand, ohne eine applizierte Maßnahme.

Wie aus Abbildung 4-1 hervorgeht, liegt ein deutliches Wasserfilmdicken-Maximum im Umfeld des Querneigungswechsels vor, ist jedoch leicht in Gefällrichtung verschoben. Der Bereich erhöhter Wasserfilmdicken erstreckt sich nahezu auf den gesamten Querneigungsübergang. Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, wurden bereits vor dieser Untersuchung auf diesem Streckenabschnitt Grooving-Maßnahmen durchgeführt. Die realisierten Grooving-Maßnahmen ergeben zwar eine leichte Abnahme der Wasserfilmdicken, sie können aber kein Absenken auf das Niveau bewirken, welches in den umgebenden Abschnitten vorzufinden ist.

Das vorhandene Grooving wird im Bezugsfall (Ohne-Fall) für die Wirkungsabschätzungen der weiter in Frage kommenden Maßnahmen beibehalten. Eine genauere, auf die Trassierungsparameter bezogene Betrachtung des Ohne-Falls wird in Kap. 4.6.1 nachvollzogen. Die genauen Kenngrößen zum vorhandenen Grooving werden in Kap. 4.5.1 erörtert.

Die Wirkung der Grooving-Textur lässt sich aus den Wasserfilmdickenverteilungen gut erkennen. So gibt es deutliche Wasserfilmdicken-Sprünge beim Übergang von ungegroovetem zu gegroovetem Beton.

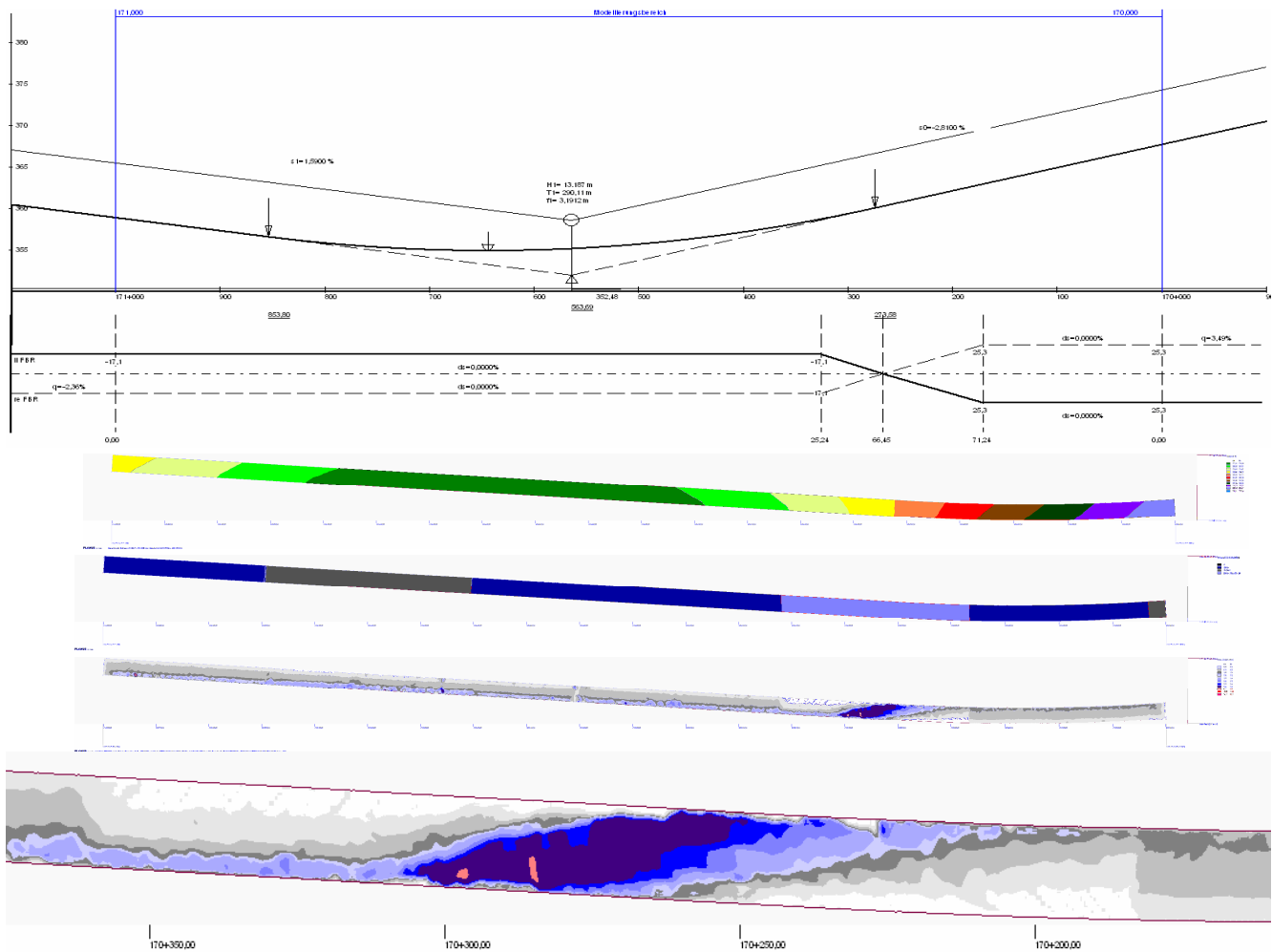


Abbildung 4-1: Rückgerechneter Höhenplan, Topologie-, Textur-, Wasserfilmdicken- und Aquaplaning-Geschwindigkeiten-Darstellung (für $t = 1,60$ mm und Regenhäufigkeit $n = 1$); unten: Detailausschnitt für $t = 1,60$ mm; $n = 1$ (ca. B-km 170+350 bis 170+150)

Bei der Aquaplaning-Darstellung ist das Bild weniger deutlich, da die Grooving-Textur zu einer deutlicheren Abminderung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten führt als die anderen Texturen (vgl. Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Das Umfeld um den Querneigungswechsel weist hier kaum niedrigere Aquaplaning-Geschwindigkeiten auf als der rechte Fahrbahnrand zwischen ca. km 171+000 und 170+360; bzw. als der linke Fahrbahnrand zwischen ca. km 170+180 und 170+000.

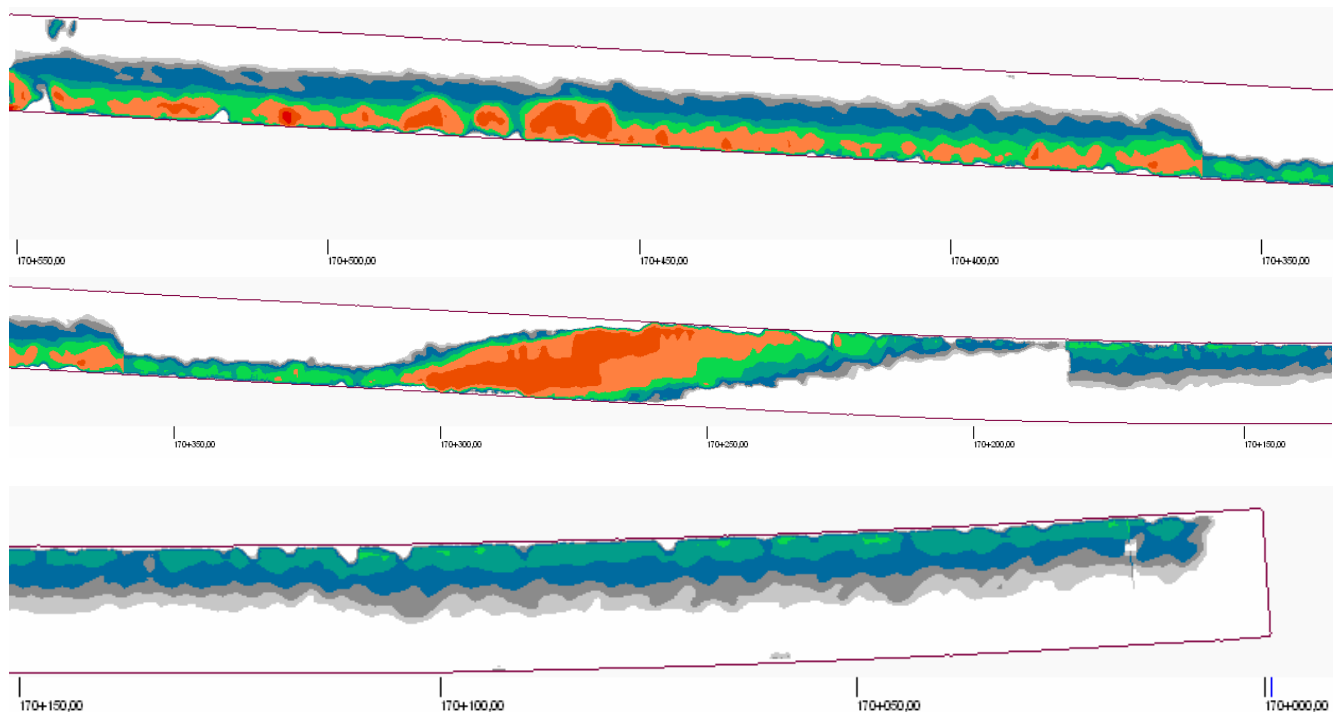


Abbildung 4-2: Aquaplaning-Geschwindigkeiten-Verteilungen (Detailausschnitte für $t = 1,60$ mm; $n = 1$). Oben: normaler Streckenabschnitt von ca. B-km 170+550 bis 170+350; Mitte: Verwindungsbereich (ca. B-km 170+350 bis 170+150); Unten: normaler Streckenabschnitt von ca. B-km 170+150 bis 170+000

Wie Abbildung 4-2 (oben) erkennen lässt, sind auch deutlich kritische Stellen in dem dem Querneigungswechsel vorgelagerten Streckenabschnitt vorhanden, wohingegen im nachfolgenden Abschnitt (Abbildung 4-2 unten) deutlich niedrigere Werte auftreten (ca. 30 km/h niedriger). Dies ergibt sich aus zwei Faktoren: a) die Querneigung ist im günstigeren Abschnitt um ca. 1% höher (3,49% gegenüber 2,36%); b) die Längsneigung ist dort ebenfalls höher (2,81% gegenüber < 2%, variierend wegen Wannenausrundung).

Der kritische Bereich in Abbildung 4-2 (oben) ergibt sich folglich aus der prinzipiellen Trassierungssituation mit einer Kombination aus sehr niedrigen Werten der beiden Neigungskomponenten (längs / quer), die – obwohl sie sich annähernd im Rahmen der Richtlinien befinden – schon zu unzureichenden Entwässerungsverhältnissen führen können. Durch die in Bezug auf Aquaplaning als kritischer einzustufende Zementbeton-Oberfläche wird die Situation darüberhinaus intensiviert.

Günstigerweise liegen jedoch die kritischsten Stellen in diesem Streckenabschnitt genau außerhalb der Fahrbereiche im Standstreifen, sodass das Sicherheitsrisiko deutlich abgeminderter in Erscheinung tritt, als es sonst der Fall wäre.

Aus dieser ersten Voranalyse lässt sich ableiten, dass die zu erarbeitenden Sanierungskonzepte in erster Linie im Umfeld des Querneigungswechsels ansetzen sollten (was mit der Grooving-Maßnahme bereits verfolgt wurde). Die hierzu in Frage kommenden Maßnahmen sind Änderungen der Trassierungsparameter (im hier vorliegenden Sanierungsfall sinnvollerweise nur des Querneigungsbandes) sowie das Setzen von Rinnen.

Grooving wurde in dem Bereich bereits durchgeführt. Daher wird in der Analyse die Fragestellung untersucht, ob das gewählte Grooving-Pattern und der gewählte Grooving-Abschnitt noch weitere Optimierungspotenziale bergen.

Im oben aufgezeigten, ebenfalls kritischen Bereich außerhalb der Verwindung (Abbildung 4-2, oben) ist als Maßnahme großflächiges Grooving zu empfehlen. Die zwar intensiv wirkenden Entwässerungsrinnen sind wegen der Kleinräumigkeit ihrer Wirkungsbereiche nicht optimal eingesetzt. Eine Änderung der Trassierungsparameter ist nicht zwingend erforderlich. Das Grooving kann sich auf den rechten Fahrstreifen beschränken.

Im Folgebereich nach dem Querneigungswechsel (Abbildung 4-2, unten) ist keine Maßnahme erforderlich. Die hier auftretenden Aquaplaning-Werte entsprechen dem Mittel der überall, d.h. auf der gesamten umgebenden Autobahnstrecke anzutreffenden Performance. Es darf daher vorausgesetzt werden, dass vom Fahrer eine an diese Situation angepasste Fahrgeschwindigkeit gewählt wurde.

Unabhängig vom zu verbessernden Bereich ist auf jeden Fall die maximale Geschwindigkeit, mit der der untersuchte Abschnitt noch sicher befahren werden kann, zu analysieren.

4.3 Lösungsvorschlag 1: Vorgabe einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit

Die Berechnung der Aquaplaning-Performance mag auf den ersten Blick simpel erscheinen, wenn von der Zielgröße einer minimalen, sicheren Fahrgeschwindigkeit, mithin des untersten Werts der Aquaplaning-Geschwindigkeit im untersuchten Bereich, ausgegangen wird. Wie gezeigt wird, kann diese Kenngröße allein die Komplexität des Gesamtzusammenhangs jedoch nicht genügend abbilden. Daher werden die folgenden weiteren Bewertungskenngrößen hergeleitet und aufgezeigt:

- unterste Aquaplaning-Geschwindigkeit
- im gesamten Fahrbahnbereich
- fahrstreifenbezogen
- fahrzeugbezogen (differenziert nach linker und rechter Fahrzeug-Seite und da mit auch radspurbezogen)
- Quantile von Aquaplaning-Geschwindigkeiten (quantitative Aggregation)
- Cluster von Aquaplaning-Geschwindigkeiten (räumliche Aggregation)
- Imponderabilität (Veränderungsstärke der Aquaplaning-Geschwindigkeit im Fahrverlauf)
- Einwirkungsdauer bzw. -länge (während der ein definierter Grenzwert unterschritten wird)

4.3.1 Unterste Aquaplaning-Geschwindigkeit und Aggregation (quantitativ und räumlich)

Abbildung 4-3 zeigt, wie mit zunehmender Grenz-Aquaplaning-Geschwindigkeit die Fläche des Modellierungsbereichs (bzw. Fahrbahnbereichs) unterhalb dieses Grenzwertes zunimmt. Ein Wert für die Fläche von z.B. $0,1 \text{ m}^2$ bei $V_{aq} \leq 90 \text{ km/h}$ bedeutet hierbei, dass es im Modellierungsbereich eine Fläche von $0,1 \text{ m}^2$ gibt, deren kritische Geschwindigkeiten unterhalb von 90 km/h liegen.

Flächen müssen nicht zusammenhängend sein. Sie werden im Modell aus den gerasterten Zellabständen berechnet. Bei einem Rasterabstand $g=0,20 \text{ m}$ repräsentiert 1 Zelle damit $0,04 \text{ m}^2$. Alle Flächen sind folglich ein ganzzahliges Vielfaches von diesem Wert.

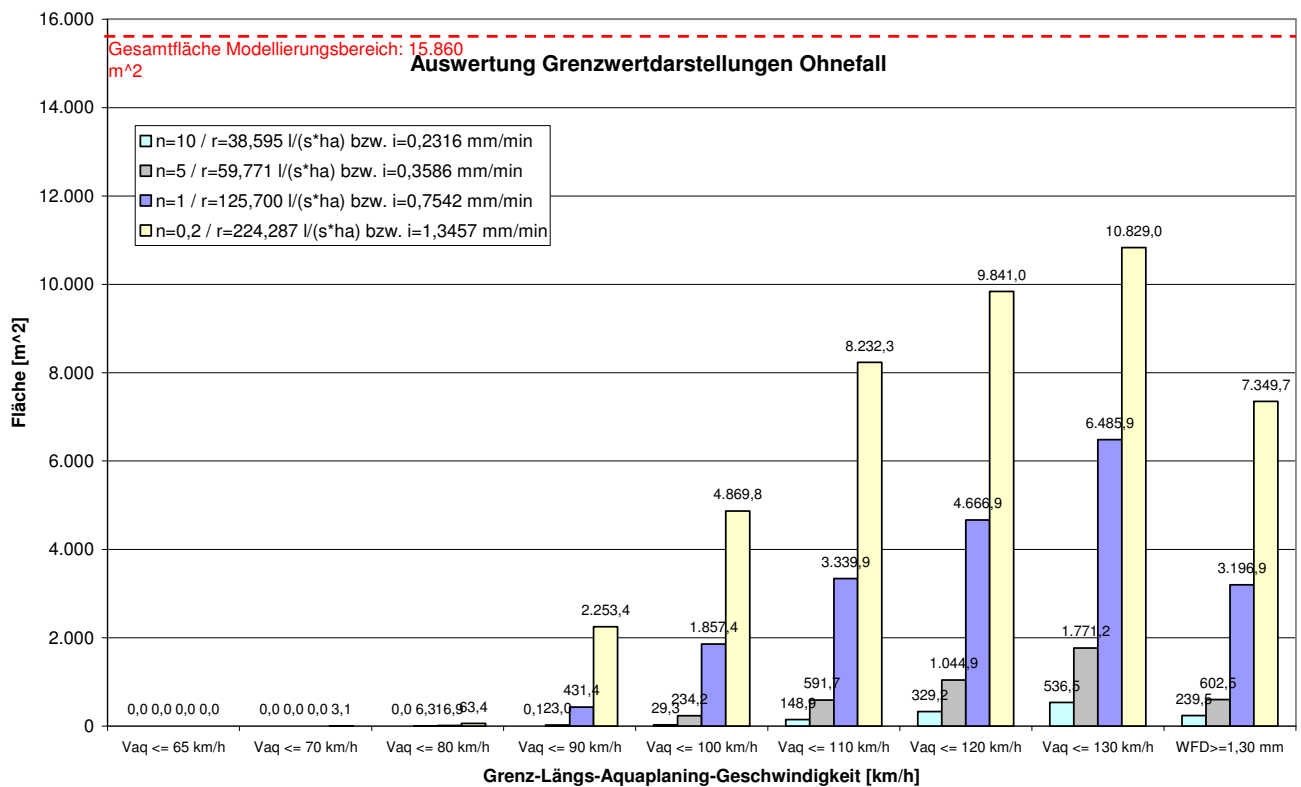


Abbildung 4-3: Auswertung Grenzwertdarstellungen „Ohnefall“

Nach einer Faustregel (HÖCKER, 1971) darf bei einer Dimensionierung nach $1,30 \text{ mm}$ Wasserfilmdicke von einer Aquaplaning-Geschwindigkeit von 120 km/h bei einer Reifenprofiltiefe von $t = 2,5 \text{ mm}$ ausgegangen werden. Nach der Abbildung 4-3 entspricht die $WFD \geq 1,30 \text{ mm}$ -Verteilung am ehesten der $V_{aq} \leq 110 \text{ km/h}$ -Verteilung, allerdings mit einer Reifenprofiltiefe von $t = 1,6 \text{ mm}$ gerechnet. Mit $t = 2,5 \text{ mm}$ würden die V_{aq} -Werte ansteigen und dieser Regel entsprechen.

Bei der Betrachtung von Einzelwerten befinden sich die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für alle Regenereignisse innerhalb einer Spannweite von 10 km/h (zwischen $75,5$ und $65,9 \text{ km/h}$ (vgl. Tabelle 6)). Sie liegen damit erstens in einem sehr engen Bereich, trotz der deutlich unterschiedlichen Regenintensitäten, zweitens sind sie sehr dicht an der ohnehin quasi „Aquaplaning-freien Grenze“ von 60 km/h , die durch das angewandte S-Kurven-Modell (RESSEL/HERRMANN, 2006A) bestätigt werden konnte.

Eine derartige Dimensionierung wäre sicherlich nicht falsch, ist jedoch nicht praxisbezogen, da ein einziger Punkt (0,04 m²) letztlich ausschlaggebend wäre für die Dimensionierung einer 15.745 m² großen Gesamtfläche

Wie bereits einleitend beschrieben und aus App. C.2 ersichtlich, werden darüber hinaus die jeweiligen Positionen der Punkte unterhalb definierter Grenzwerte und die Clusterung von Punkten zu berücksichtigen sein. Die sich daraus ergebenden zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (abgerundet auf jeweils ganze Dekameter), wie auch diejenigen aus der rein größenmäßigen Dimensionierung, sind in Tabelle 6 dargestellt.

Regen- häufigkeit n	zulässige Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Flächen und Cluster	
	rein größenmäßige Dimensionierung	Berücksichtigung von Clustern und Positionen	
10	75,5	100	29,82 m ² , verteilt auf 8 Cluster, davon 1 im Fahrbereich
5	73,2	90	23,73 m ² , verteilt auf 6 Cluster, davon 1 im Fahrbereich
1	69,4	80	17,77 m ² , verteilt auf 5 Cluster, davon 0 im Fahrbereich
0,2	67,2	80	67,13 m ² , verteilt auf 19 Cluster, davon 0 im Fahrbereich
0,05	65,9	70	4,03 m ² , verteilt auf 1 Cluster, davon 0 im Fahrbereich

Tabelle 6: Dimensionierung nach zulässigen Höchstgeschwindigkeiten; größenmäßig und unter Berücksichtigung von Position und Clustern

Viele aquaplaning-kritische Bereiche befinden sich am rechten Fahrbahnrand und damit außerhalb des Fahrbereichs, sie können daher unberücksichtigt bleiben. Kleine Hotspots können ebenfalls vernachlässigt werden, da ihre flächenmäßige Ausdehnung und damit ihre zeitmäßige Einwirkungsdauer zu gering sind, um ernsthaft gefährlich zu sein.

Es zeigt sich, dass eine gewisse Fläche über dem Grenzwert von ca. 70 bis 85 m² an diesem Beispiel BAB A 8 (km171 - km170) durchaus unschädlich ist, da sich die meisten der kleinflächigen kritischen Stellen günstigerweise im Standstreifen befinden. Auf andere Modellfälle ist selbstverständlich nicht ohne weiteres übertragbar.

4.3.2 Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren / Imponderabilität

Die folgenden 3 Abbildungen zeigen die Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren, also den Rollspuren unter den Fahrzeugreifen. Für die Rechnungen wurde

eine Radstandsweite von 1,65 m angenommen (Mittelklasse-Pkw). Die X-Achse der Diagramme entspricht der Fahrbahnlängsachse. Von links nach rechts interpretiert ergibt sich demnach eine fiktive Durchfahrt¹⁹ durch den Modellierungsbereich.

In Abbildung 4-4 sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Texturen zu erkennen. So hat z.B. der Asphalt durch seine relativ offenporige Oberfläche ein höheres Aufnahme- und Drainagevermögen für das beim Überrollen durch den Reifen verdrängte Wasser als der Beton. Damit liegt auch die Aquaplaning-Geschwindigkeit höher. Der Unterschied zum Beton ist umso höher, je höher die kritische Geschwindigkeit insgesamt liegt²⁰.

Der Sprung von Beton zu Grooving-Beton ist noch höher. In den Diagrammen kommt er wegen der Überlagerung von Textur- und Topologie-Einflüssen (Querneigungswechsel) nur schwächer zum Ausdruck.

Allen Diagrammen und Fahrkurven ist gemeinsam, dass durch den Grooving-Abschnitt die kritische Geschwindigkeit zunächst deutlich abgehoben wird, danach durch den Querneigungswechsel rapide auf ein Minimum absinkt und genauso schnell²¹ wieder ansteigt.

Anhand der Niederschlagshäufigkeit $n = 0,2$ (Abbildung 4-4) wird exemplarisch der Einfluss einer plötzlich stark abfallenden sicheren Fahrgeschwindigkeit aufgezeigt:

Fahrzeug 1 hat eine Initialgeschwindigkeit²² von 120 km/h, ab ca. km 170+765 sinkt die kritische Geschwindigkeit unter diesen Wert. Nach ca. 65 m (170+700) ist das Minimum erreicht (85 km/h). Innerhalb von nur 65 m Fahrstrecke entsteht aus dem Fahrzustand „Fahren mit (gerade noch) angepasster Geschwindigkeit“ der Zustand „Fahren mit 35 km/h über der kritischen Geschwindigkeit“, wenn keine Geschwindigkeitsanpassung durch den Fahrer vorgenommen wird. Auch mit unterstellter Geschwindigkeitsanpassung ist es nicht gewiss, ob diese während der erforderlichen Strecke bzw. auf den erforderlichen Mindestwert durchführbar wäre (beeinflusst durch Bremsvermögen Fahrzeug, Einschätzung Gefahrensituation durch Fahrer).

¹⁹ Für jeden Fahrstreifen werden zwei Spuren erzeugt (entsprechend linken und rechten Radspuren der Fahrzeuge). Die Nummerierung erfolgt für den Querschnitt von links nach rechts (Fahrzeug 1: linker Fahrstreifen ...).

²⁰ Am höchsten für Fahrzeug 1 mit $V_{Aq,Beton} \approx 125$ km/h und $V_{Aq,Asphalt} \approx 140$ km/h; am geringsten für Fahrzeug 3 mit $V_{Aq,Beton} \approx 90$ km/h und $V_{Aq,Asphalt} \approx 93$ km/h

²¹ Nichtsdestotrotz handelt es sich um eine Einflussbereichslänge von ca. 50 m – 100 m Länge; demnach nicht vernachlässigbar.

²² Tatsächliche, auf Grund der Umfeldeinflüsse (Fahrbahnzustand, Witterung,...) gewählte Fahrgeschwindigkeit.

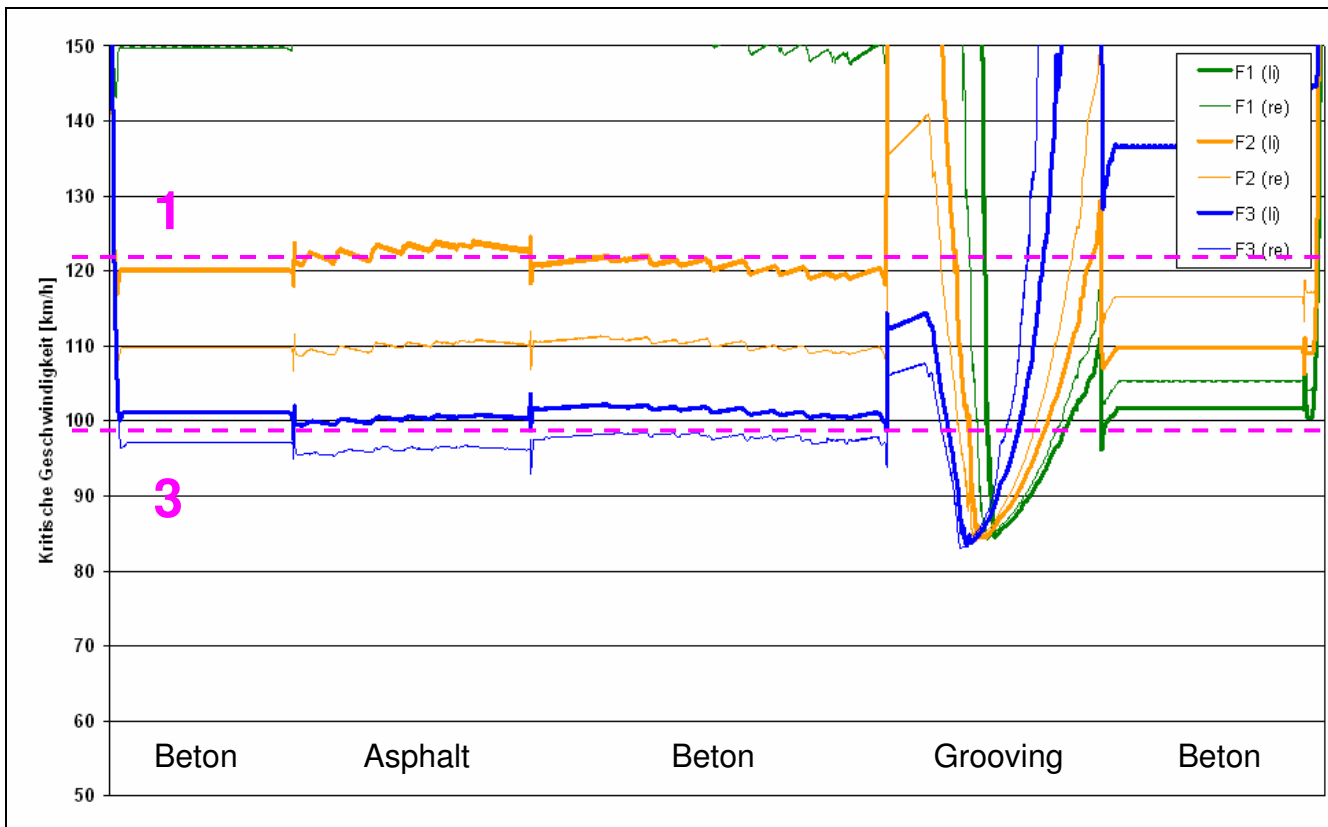


Abbildung 4-4: Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren (Reifen-Rollspuren), Regenhäufigkeit $n=0,2$; Fahrzeug Radstandbreite: 1,65m

Fahrzeug 3 hat dahingegen eine angenommene Initialgeschwindigkeit von 95 km/h. Die kritische Geschwindigkeit sinkt ab ca. km 170+765 unter diesen Wert. Bei 170+725 ist das Minimum erreicht (ca. 85 km/h). Die anzupassende Fahrgeschwindigkeit beträgt ca. 10 km/h auf ca. 40 m Strecke. Daher ist die Gefährdung niedriger einzuschätzen.

Es ist also – trotz im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglicher Quantifizierung der einzelnen Risikopotenziale – zu erkennen, dass bei Querneigungswechseln weniger der Wert mit der niedrigsten Aquaplaning-Geschwindigkeit, sondern vielmehr das Abfallen der Aquaplaning-Geschwindigkeit im Fahrverlauf stark fahrstreifenabhängig ist.

Das Phänomen des Abfallens der sicheren Geschwindigkeit um einen bestimmten Betrag auf ein neues Level wird, um die Unvorhersehbarkeit und Unabwägbarkeit der plötzlich sich veränderten Situation zu entsprechen, im Folgenden als *Imponderabilität* bezeichnet.

Aus den Diagrammen für $n = 1$, $n = 0,05$ und $n = 0,2$ ergibt sich, dass die Imponderabilität umso größer ist, je kleiner die Intensität des auslösenden Regenereignisses ist.

Wie gezeigt wurde, wird eine Angabe der singulären niedrigsten Aquaplaning-Geschwindigkeit den Betrachtungen vermutlich nicht gerecht. Vielmehr sollte immer eine definierte Initialgeschwindigkeit, d.h. mittlere Geschwindigkeit eines sich auf die kritische Stelle annähernden Fahrzeugs, berücksichtigt werden, um die Imponderabilität zu erfassen.

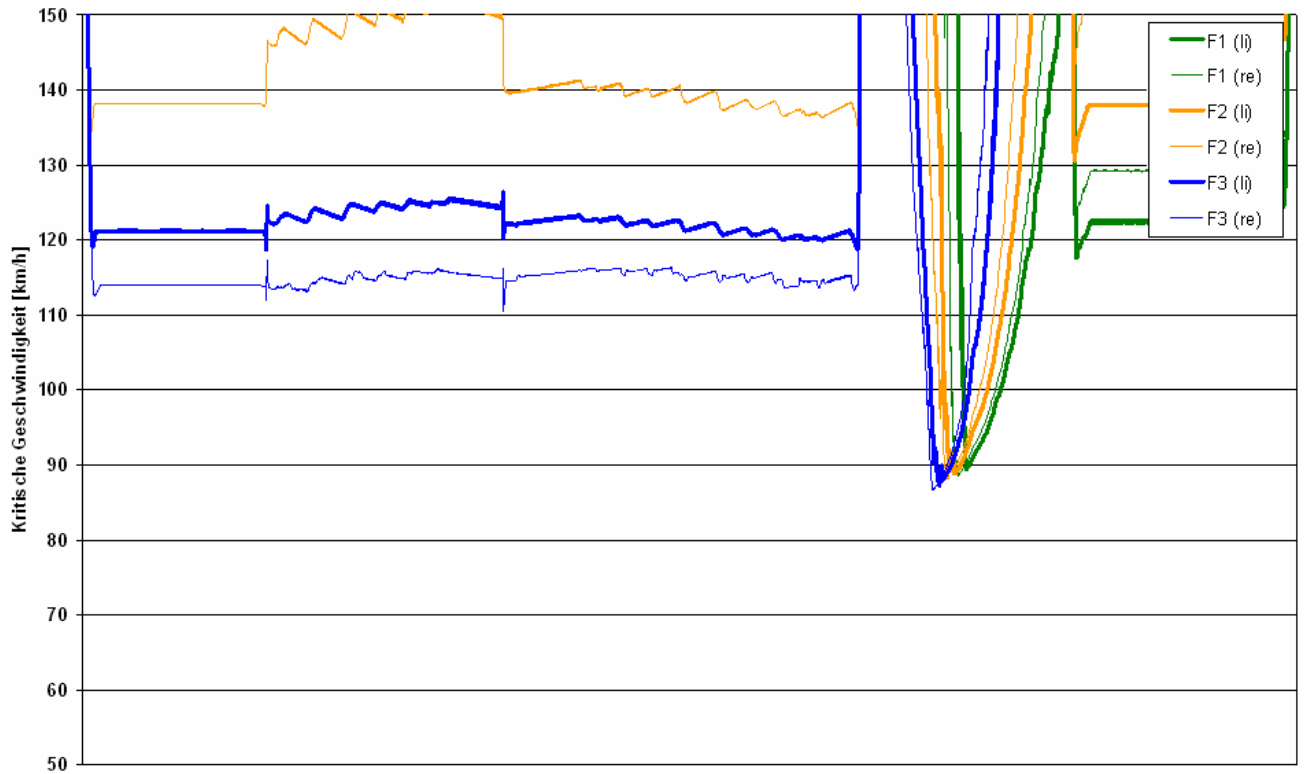


Abbildung 4-5: Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren (Reifen-Rollspuren), Regenhäufigkeit $n = 1$; Fahrzeug Radstandbreite: 1,65m

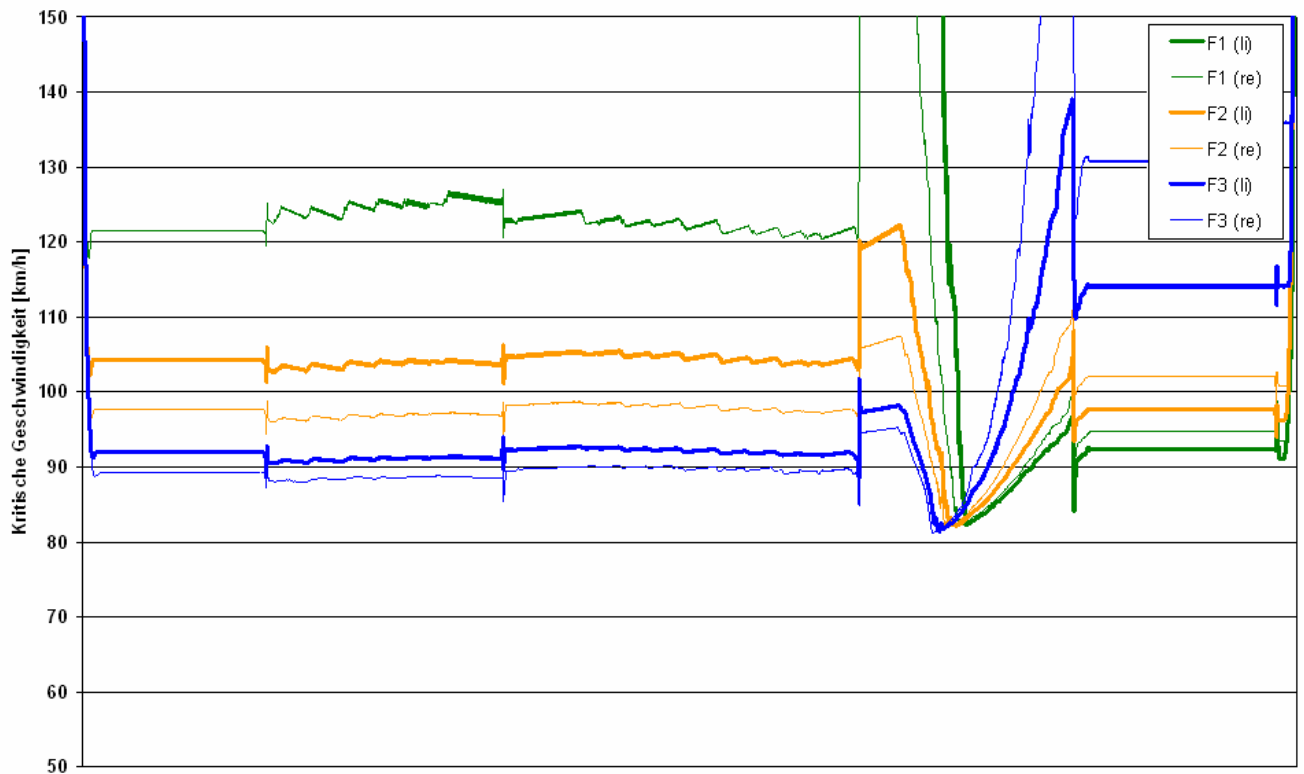


Abbildung 4-6: Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren (Reifen-Rollspuren), Regenhäufigkeit $n = 0,05$; Fahrzeug Radstandbreite: 1,65m

Für die Initialgeschwindigkeit sollte praktischerweise die Geschwindigkeit gelten, mit der die Vorlaufstrecke sicher befahren werden kann (vgl. Abbildung 4-4). Die Initialgeschwindigkeit

liegt also auf oder etwas über der kritischen Geschwindigkeit der maßgebenden Fahrzeugseite; gleichzeitig darf die Initialgeschwindigkeit jedoch eine normative Obergrenze nicht überschreiten. Damit gilt:

$$I = V_i - V_{aq,min} \quad \text{mit} \quad V_i = \min[V_0 ; V_n] \quad (4-1)$$

mit:

- I = Imponderabilität
- V_i = Initial-Geschwindigkeit, km/h
- $V_{aq,min}$ = unterster Wert der Aquaplaning-Geschwindigkeit im Fahrverlauf (maßgebende Fahrzeug-Seite), km/h
- V_0 = durch Aquaplaning-Performance vorgegebene maximale Annäherungsgeschwindigkeit, km/h (ggf. arithm. Mittelwert)
- V_n = normative Höchstgeschwindigkeit, km/h

Folgende Abbildung 4-7 zeigt, wie sich Imponderabilität und unterste Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Regenereignisses und des Fahrzeugs verhalten. Es wurden jeweils die maßgebenden Seiten (links/rechts) der Fahrzeuge zu Grunde gelegt.

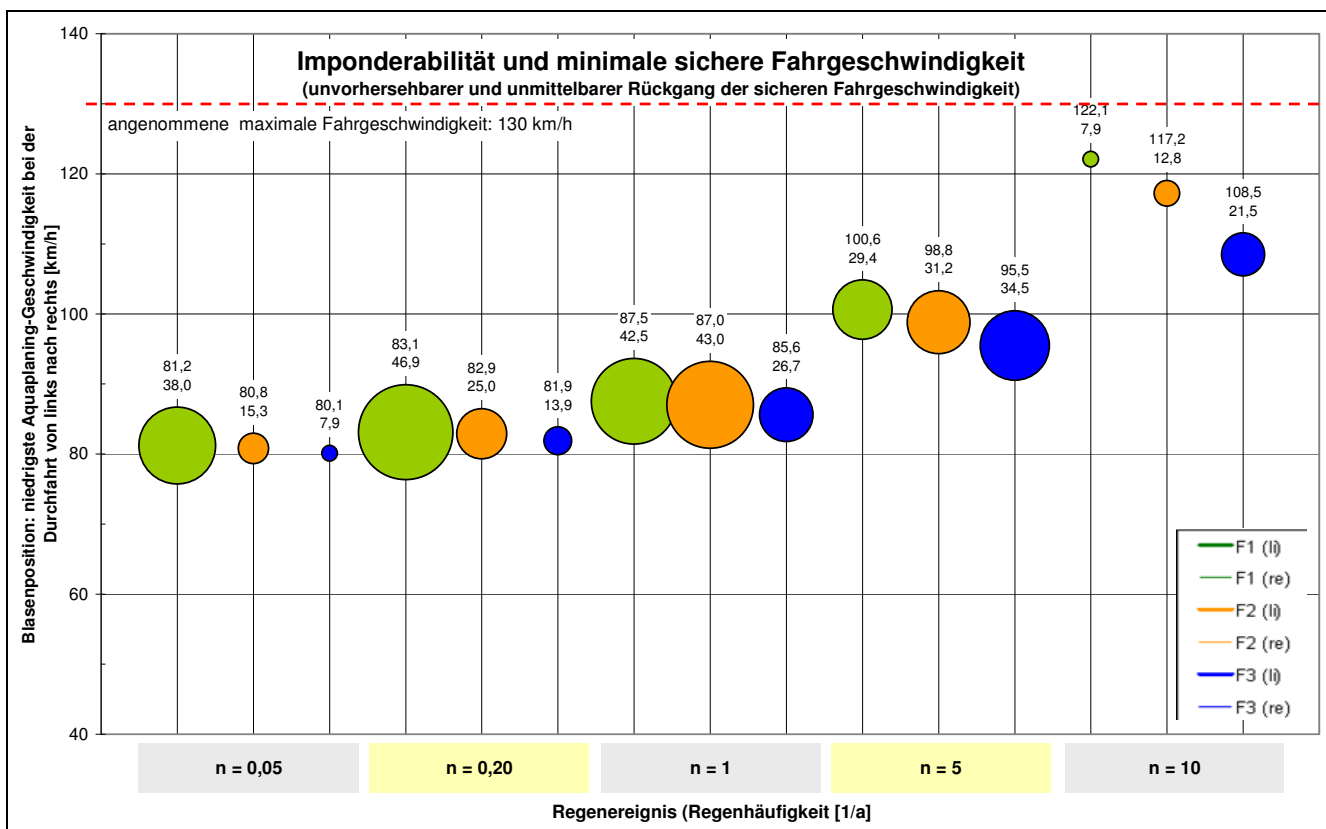


Abbildung 4-7: Imponderabilität für $V_n = 130$ km/h ; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mind.-Aquaplaning-Geschw.

Die Imponderabilität wird als Größe der Blasen dargestellt, die jeweilige Y-Position gibt die niedrigste Aquaplaning-Geschwindigkeit an. Es ist zu erkennen, dass Fahrzeug 1 (linker Fahrstreifen) vor allem für die kritischsten Regenereignisse $n = \{0,05; 0,2\}$ die größte Imponderabilität aufweist. Bei $n = 5$ sind die Effekte zwischen den drei Fahrzeugen in etwa ausgeglichen, bei $n = 10$ kehren sich die Effekte um. Gleichzeitig ist die absolute Größe der Effekte zu beachten (der untere der beiden Beschriftungswerte). Die höchste

Imponderabilität im gesamten Schaubild tritt demnach bei Fahrzeug 1 bei $n = 0,20$ auf ($l = 46,9$ km/h). Deutlich höher als bei $n = 0,20$ werden die beiden Fahrzeuge 2 und 3 bei $n = 1$ bewertet, sodass dieses Regenereignis die insgesamt betrachtbaren (drei) Fahrzeuge ähnlicher zueinander erfasst und der somit der Gesamtsituation besser gerecht wird. Auf der anderen Seite nehmen jedoch gleichzeitig die Absolutwerte ($V_{aq,min}$) zu (oberer Wert der Blasenbeschriftung).

Abbildung 4-8 zeigt die Effekte für $V_n = 100$ km/h, Abbildungen für die Geschwindigkeiten 120 km/h, 110 km/h und 90 km/h sind in App. C.5 aufgeführt. Es ist zu erkennen, wie sich alle Blasen verkleinert haben. Das Regenereignis $n = 0,05$ entspricht nun dem Ereignis $n = 10$ bei 130 km/h. D.h. eine um 30 km/h reduzierte normative Geschwindigkeit bewirkt, dass ein 20-jähriger Regen nunmehr annähernd so schwerwiegend wird, wie zuvor ein Monatsregen.

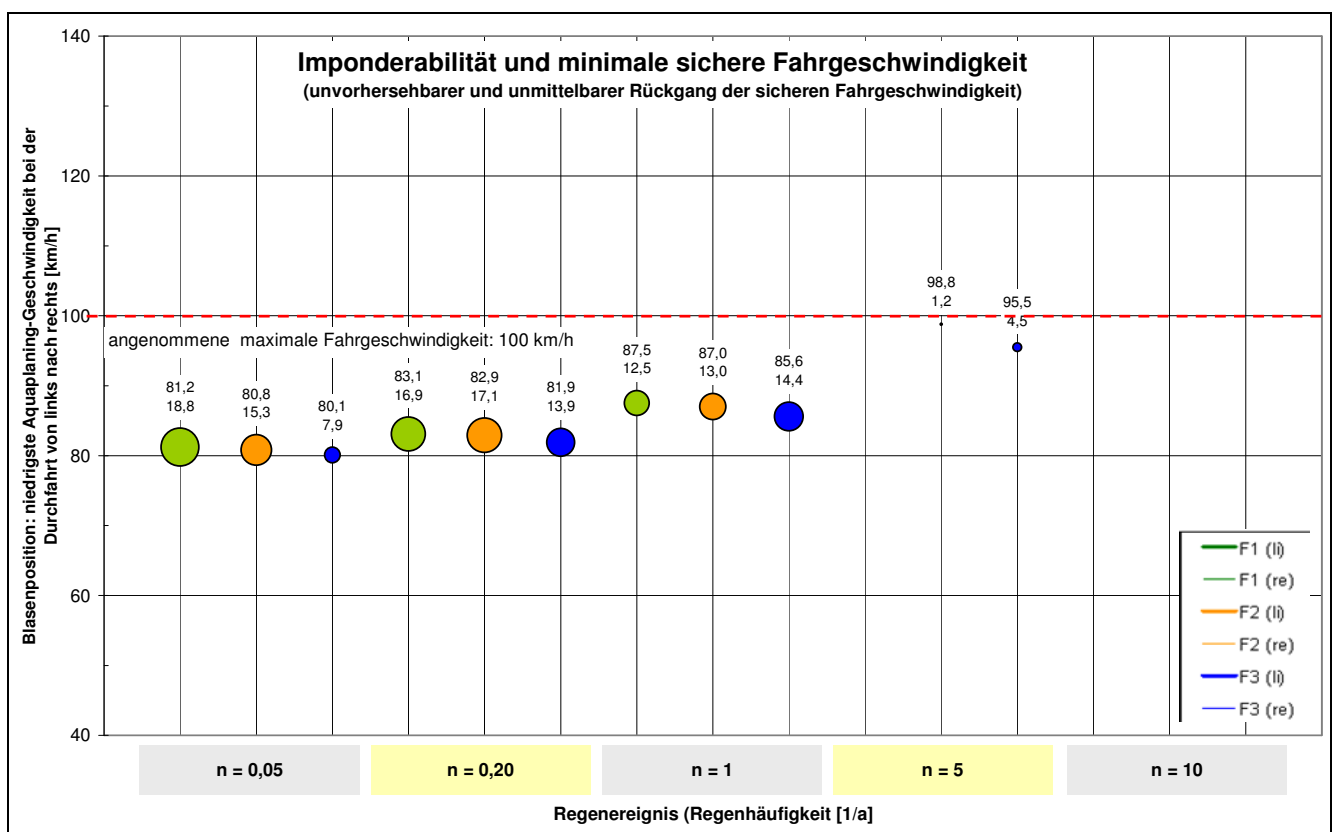


Abbildung 4-8: Imponderabilität für $V_n = 100$ km/h ; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mind.-Aquaplaning-Geschw.

Auf Grund ihrer Aussagekraft sollte die Imponderabilität daher als ergänzende und präzisierende Bewertungsgröße zur Aquaplaning-Geschwindigkeit nicht unberücksichtigt bleiben.

4.3.3 Zusammenfassung

Aus den obigen Betrachtungen zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit kam folgendes Ergebnis zustande:

Regenhäufigkeit n [1/a]	Cluster- und flächenbezogene Betrachtung	Radspurenbezogene Betrachtung
0,05	70	70
0,2	80	70
1	80	80
5	90	90
10	100	110

Tabelle 7: Ergebnisse (zulässige Höchstgeschwindigkeiten [km/h]) aus den Betrachtungen zur maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Lösungsvariante 1)

Die Betrachtungen zu Imponderabilität und zulässiger Höchstgeschwindigkeit haben gezeigt, dass die Wahl des Bemessungs-Regenereignisses von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängt und dass folglich, je nach erlaubter Höchstgeschwindigkeit ein anderes Regenereignis maßgebend ist. Auf Grund der Auswertungen sollte, bei einer unterstellten Höchstgeschwindigkeit von $V_n = 130$ km/h, eine Regenhäufigkeit von $n = 1$ für den Bemessungsregen gewählt werden. Für $V_n = 100$ km/h sollte $n = 0,2$ oder $n = 1$ gewählt werden. Unabhängig davon sollten jedoch dieselben gesamtwirtschaftlichen Bewertungskriterien wie bei anderen entwässerungstechnischen Aufgaben (RAS-Ew 1997, FGSV) zugrunde gelegt um eine endgültige Bemessungs-Regenhäufigkeit zu definieren. In dieser Untersuchung wird fortan $n = 1$ zu Grunde gelegt, wobei die Auswertungen zum Vergleich auch für die anderen Regenhäufigkeiten durchgeführt wurden (teilweise im Appendix dargestellt).

4.4 Lösungsvorschlag 2: Einbau von Entwässerungsrinnen

4.4.1 Auswahl eines Bewertungsverfahrens

Die Rinnenoptimierungen erfolgen mit der Bemessungs-Regenhäufigkeit $n = 1$. Die Positionierung der Rinnen erfolgt letztlich unabhängig vom gewählten Regenereignis; es ist jedoch an die zugrunde gelegte Bewertungsgröße B gekoppelt.

Durch die Vorgabe von unterschiedlichen Bewertungsvarianten ergibt sich die Fragestellung, welche davon am aussagekräftigsten ist. Denn schlussendlich sollte ein Lösungsvorschlag über optimale Rinnenanordnungen nicht an die Art der Bewertungsgröße gekoppelt sein, sondern eine möglichst realistische Einschätzung der Situation bieten. Aus diesem Grunde werden im Folgenden drei Bewertungsvarianten vorgeschlagen, zur Bewertung des Anwendungsbeispiels herangezogen und abschließend auf ihre Aussagefähigkeit untersucht.

Optimierungslauf mit max. 6 Querrinnen, Bewertungsvariante ΔV_i^2

Dadurch, dass alle Δw_i -Werte quadriert werden, werden größere Wertedifferenzen stärker gewichtet. Diese treten meist in unmittelbarer Rinnennähe und dort auf, wo die

Ursprungswerte (Ohne-Fall) am höchsten sind. Daraus ergibt sich, dass sich die Optimierung enger am kritischen Feld orientiert.

Entsprechend der Maximalzahl gleichzeitiger Rinnen wurden 6 Durchläufe à 136 Varianten durchlaufen; insgesamt 828 Anordnungsvarianten.

Der Verlauf der 4 Bewertungskenngrößen ΔV_i^2 , $\Sigma \Delta V_i^1$, $\Sigma \Delta V_i^0$ und max. WFD über den Ablauf kann mit Abbildung 4-9 nachvollzogen werden (Y-Achse), wobei in diesem Fall nur nach ΔV_i^2 optimiert wurde. Die X-Achse ist entsprechend den 6 Durchläufen in 6 Segmente unterteilt. Für jedes Segment wird auf der X-Achse der durchlaufene RR-Bereich abgetragen. Da dieser im Beispiel von 170+322,68 bis 170+182,88 reicht, befindet sich der jeweils linke Segmentrand bei km 170+322,268 und der rechte bei 170+182,88.

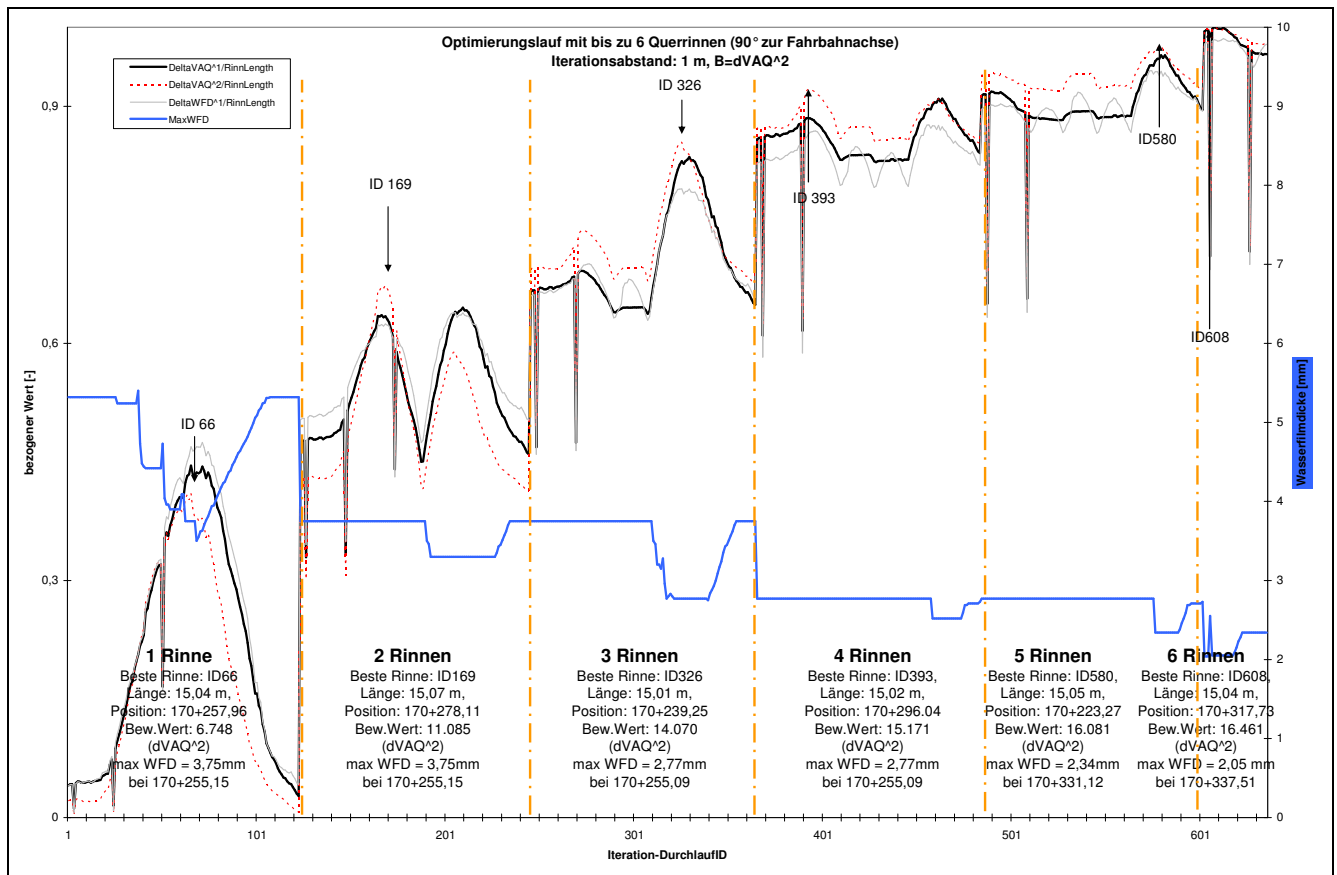


Abbildung 4-9: Optimierungslauf mit Querrinnen (90° z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: ΔV_i^2 ; Verlauf der Bewertungsgrößen B (für $\Sigma \Delta V_i^2$, $\Sigma \Delta V_i^1$, $\Sigma \Delta WFD_i^0$, max. WFD)

Die Rinnen wurden in der folgenden Reihenfolge gesetzt²³ (vgl. Abbildung 4-10):

1. 170+257,96 (+ 8,49 m zum Querneigungswechsel QNW)
2. 170+278,11 (-11,66 m zum QNW)
3. 170+239,25 (+ 27,20 m zum QNW)

4. 170+296,04 (- 29,59 m zum QNW)
5. 170+223,27 (+ 43,18 m zum QNW)
6. 170+317,73 (- 51,28 m zum QNW)

Abbildung 4-10 zeigt auf der Ordinate den Verlauf der sukzessiven Rinnenanordnung. Auf der X-Achse verläuft die Fahrbahnachse. Strichpunktiert sind der Querneigungswechsel, sowie Anfang und Ende der Querneigungsänderung $q_{(-2)}$ und $q_{(2)}$ eingetragen. Die Rinnenpositionen sind daraus erkennbar; darüber hinaus die aus jeder Variante resultierenden Positionen maximaler Wasserfilmdicken.

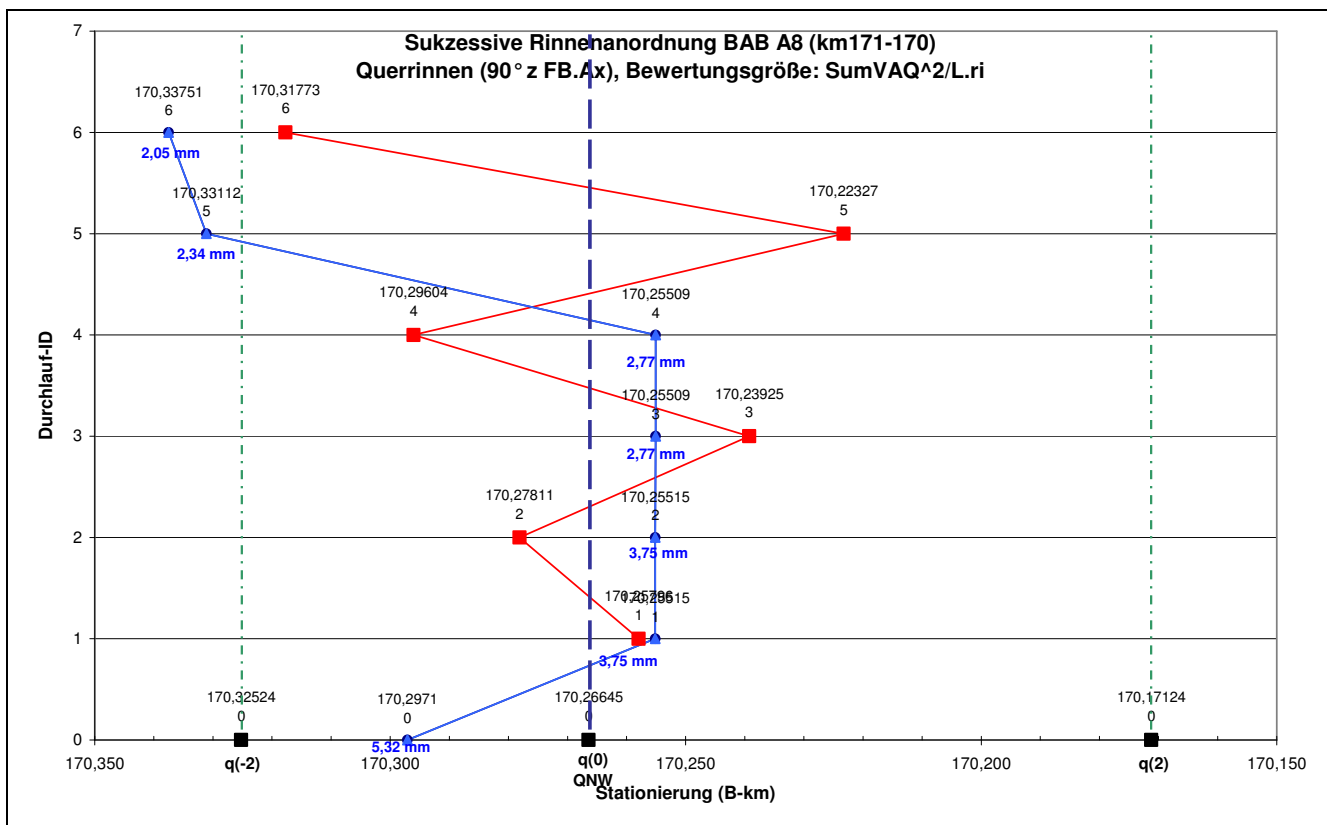


Abbildung 4-10: Sukzessive Rinnenanordnung mit Querrinnen (90° z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: ΔV_i^2

Die Rinnen werden abwechselnd vor bzw. nach dem Querneigungswechsel gesetzt. Die Relativabstände zum Querneigungswechsel nehmen dabei zu.

Der Verlauf der Bewertungsgröße B (Abbildung 4-11) lässt erkennen, dass die Wirkung der Rinnen, gemessen an $B = \Delta V_i^2$, mit jeder zusätzlichen Rinne abnimmt (Linie). Für eine Verdoppelung des B-Werts der ersten Rinne ($B_1 = 6.748$) werden drei Rinnen benötigt ($B_3 = 14.070$); für eine Verdreifachung genügen selbst 6 Rinnen noch nicht ($B_6 = 16.461$).

²³ Relativabstand zum Querneigungswechsel QNW (170+266,45) in Klammern. (+: In Fahrtrichtung folgend; -: in Fahrtrichtung vorangehend)

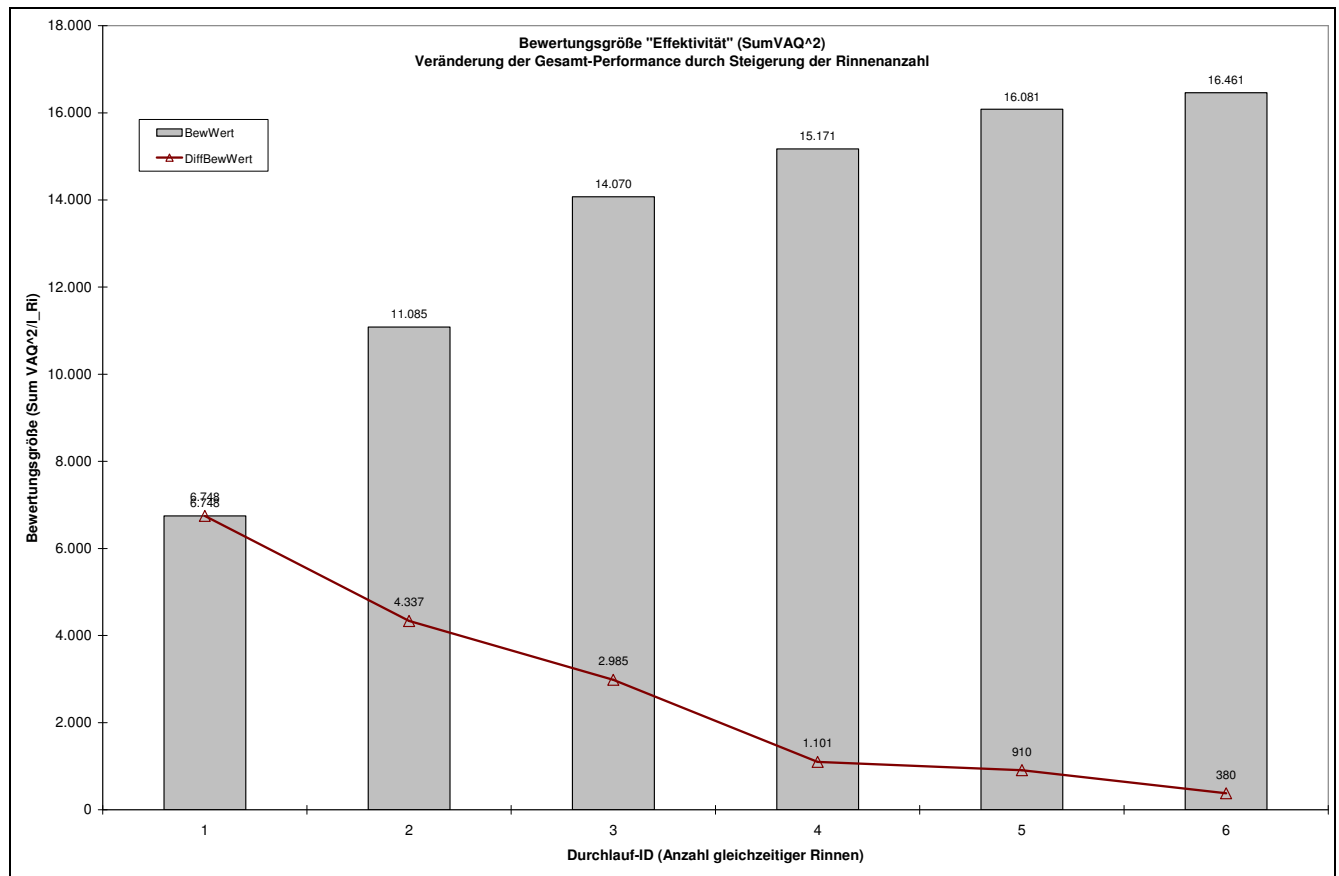


Abbildung 4-11: Verlauf Bewertungsgröße „Leistungsfähigkeit“, Bewertungsmerkmal: ΔV_i^2

Optimierungslauf mit max. 6 Querrinnen, Bewertungsvariante $\sum \Delta V_i^1$

Bedingt durch den Exponenten „1“ geht jeder Differenzwert mit seiner tatsächlichen Ausprägung in B ein. Die Bewertung ist damit weniger auf Rinnennähe und auf Spitzenwerte konzentriert als im vorigen Fall. Großflächige Abminderungsbereiche mit relativ niedrigen Differenzwerten können hohe Spitzenabminderungen noch kompensieren. Daraus ergibt sich, dass bei der Optimierung noch deutlich stärker als bei ΔV_i^2 der Wirkbereich (die Flächigkeit) einer Rinne berücksichtigt wird.

Der gesamte Optimierungslauf ging über insgesamt 827 verschiedene Anordnungsvarianten. Der Verlauf von 4 Bewertungskenngrößen über den Ablauf kann mit Abbildung 4-12 nachvollzogen werden.

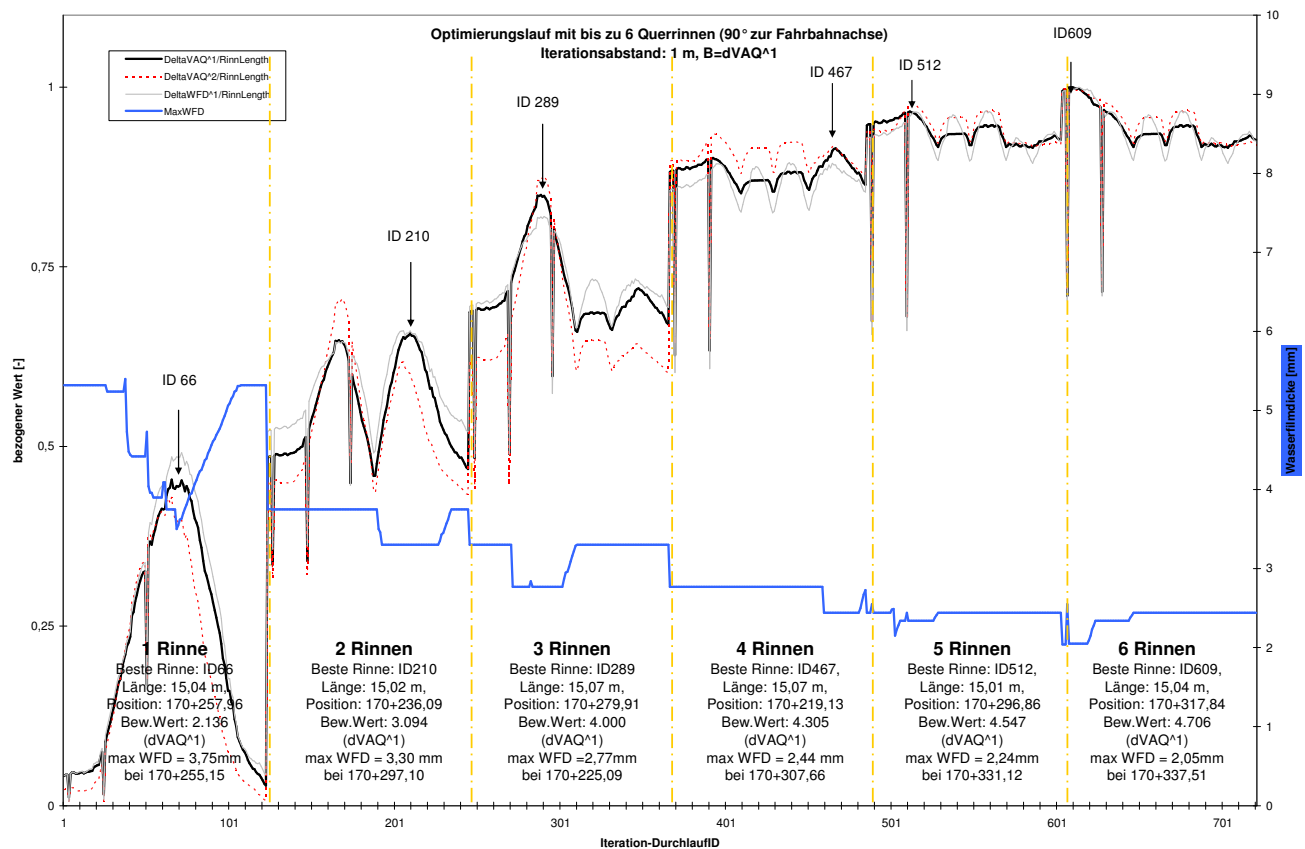


Abbildung 4-12: Optimierungslauf mit Querrinnen (90° zur Fb.Achse), Bewertungsgröße: $\sum \Delta V_i^1$; Verlauf der Bewertungsgrößen B (für $\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, $\sum \Delta WFD_i^0$, max. WFD)

Die 6 Rinnen wurden in der folgenden Reihenfolge gesetzt²⁴ (vgl. Abbildung 4-13):

1. 170+257,96 (+8,49 m zum QNW)
2. 170+236,09 (30,36 m zum QNW)
3. 170+279,91 (-13,46 m zum QNW)
4. 170+219,13 (47,32 m zum QNW)
5. 170+296,86 (-30,41 m zum QNW)
6. 170+317,84 (-51,39 m zum QNW)

Wie Abbildung 4-13 zeigt, alternieren die Rinnenpositionen wie auch bei $\sum \Delta V_i^2$ um den Querneigungswechsel.

²⁴ Iterations-Schrittweite 1 m bei der Iteration. Bewertungsbereich E von 170+200,62 bis 170+130,43, Rinnen-Iteration RR von 170+322,68 bis 170+182,88.

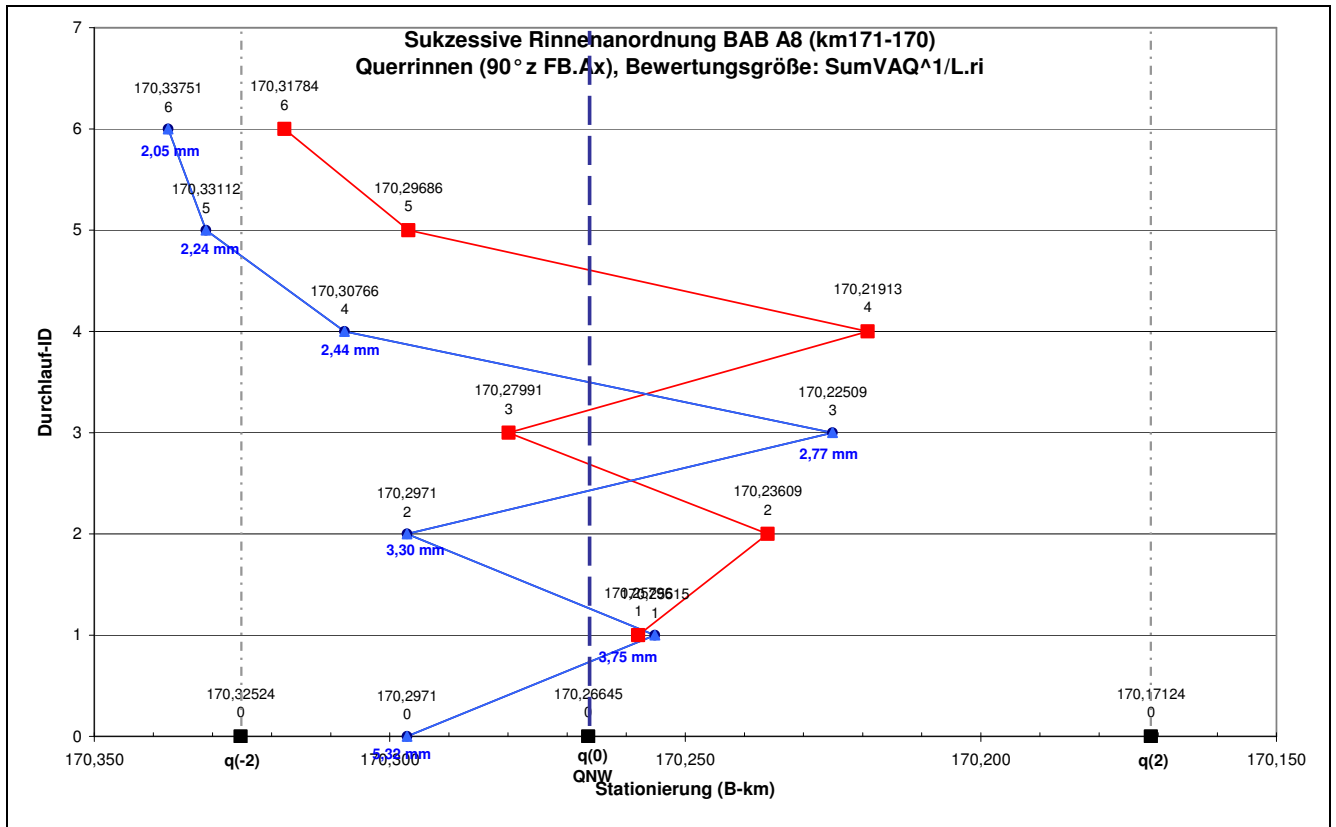


Abbildung 4-13: Sukzessive Rinnenanordnung mit Querrinnen (90° z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: $\sum \Delta w_i^1$

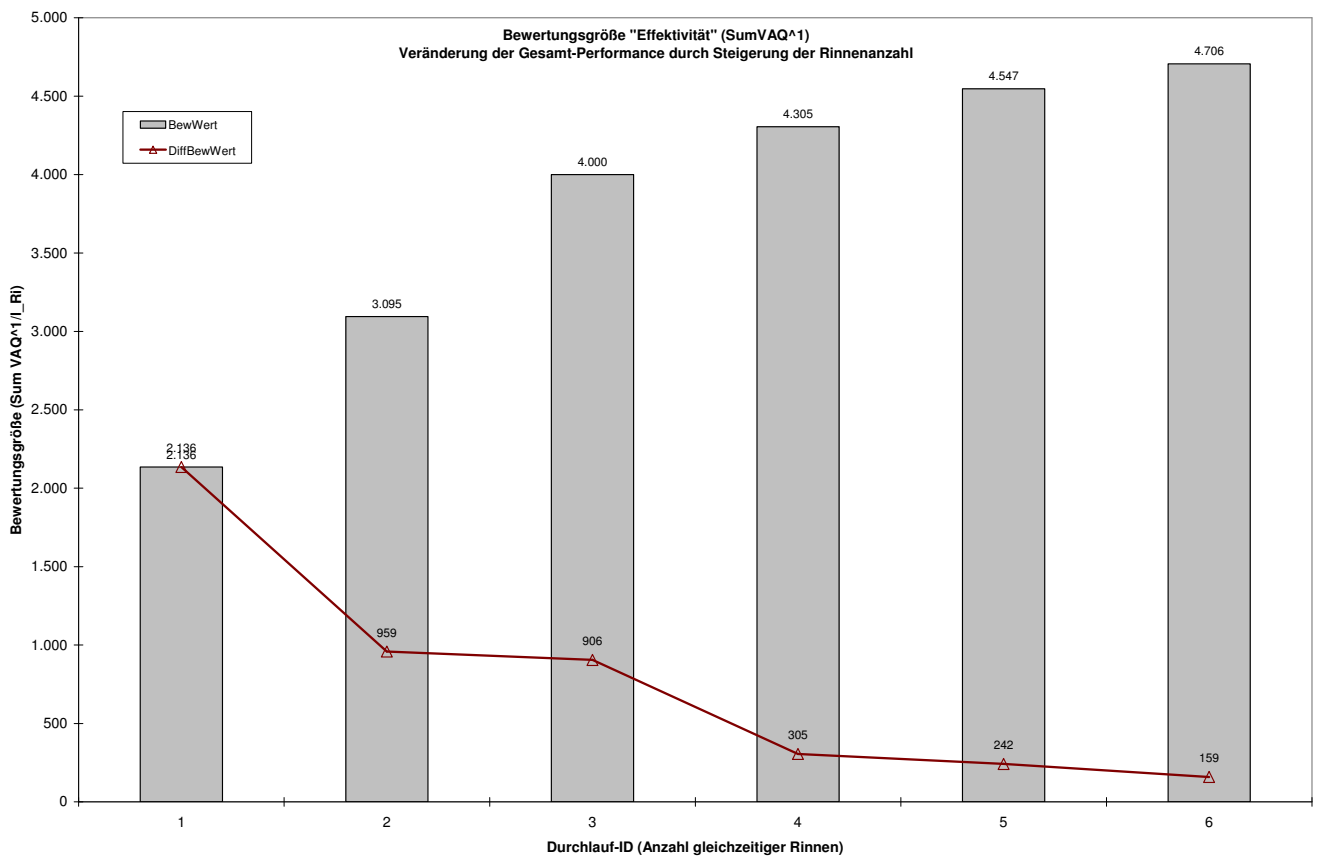


Abbildung 4-14: Verlauf Bewertungsgröße „Leistungsfähigkeit“, Bewertung: $\sum \Delta V_i^1$

Abbildung 4-14 zeigt den Verlauf der Bewertungsgröße B (Säulen) mit zunehmender Anzahl gleichzeitiger Rinnen. Der Wert von B nimmt demnach degressiv zu (Linie).

Allein mit 1 Rinne beträgt $B_1 = 2.136$. Um eine Verdoppelung dieses Wertes zu erzielen, sind jedoch 4 zusätzliche Rinnen erforderlich ($B_5 = 4.305 \approx 4.272$).

Optimierungslauf mit max. 6 Querrinnen, Bewertungsvariante maxWFD

Anders als bei den auf die Leistungsfähigkeit bezogenen Bewertungsvarianten, wurde hier die Rinnenanordnung von einem einzigen Zellwert, der maximalen Wasserfilmdicke orientiert.

Der gesamte Optimierungslauf kann mit Abbildung 4-12 nachvollzogen werden.

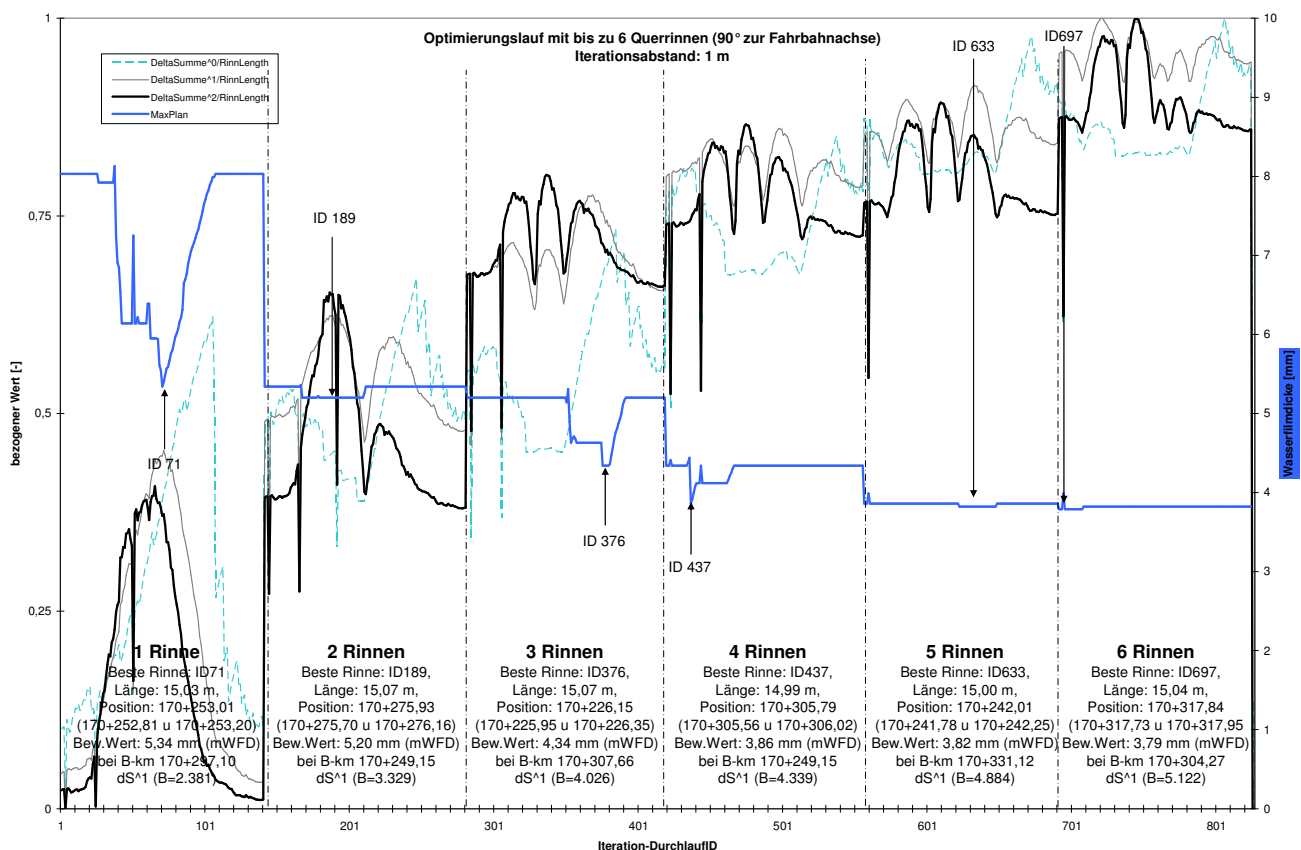


Abbildung 4-15: Optimierungslauf mit Querrinnen (90° zur Fb.Achse), Bewertungsgröße: maxWFD; Verlauf der Bewertungsgrößen B (für $\sum \Delta w_i^2$, $\sum \Delta w_i^1$, $\sum \Delta w_i^0$, max. WFD)

Die 6 Rinnen wurden in der folgenden Reihenfolge gesetzt²⁵ (Abbildung 4-13):

1. 170+251,99 (+ 14,46 m zum QNW)
2. 170+275,93 (- 9,48 m zum QNW)
3. 170+233,09 (+ 33,36 m zum QNW)

²⁵ Iterations-Schrittweite 1 m bei der Iteration. Bewertungsbereich E von 170+200,62 bis 170+130,43, Rinnen-Iteration RR von 170+322,68 bis 170+182,88.

4. 170+291,87 (- 25,42 m zum QNW)
5. 170+264,94 (+ 1,51 m zum QNW)
6. 170+219,13 (+ 47,32 m zum QNW)

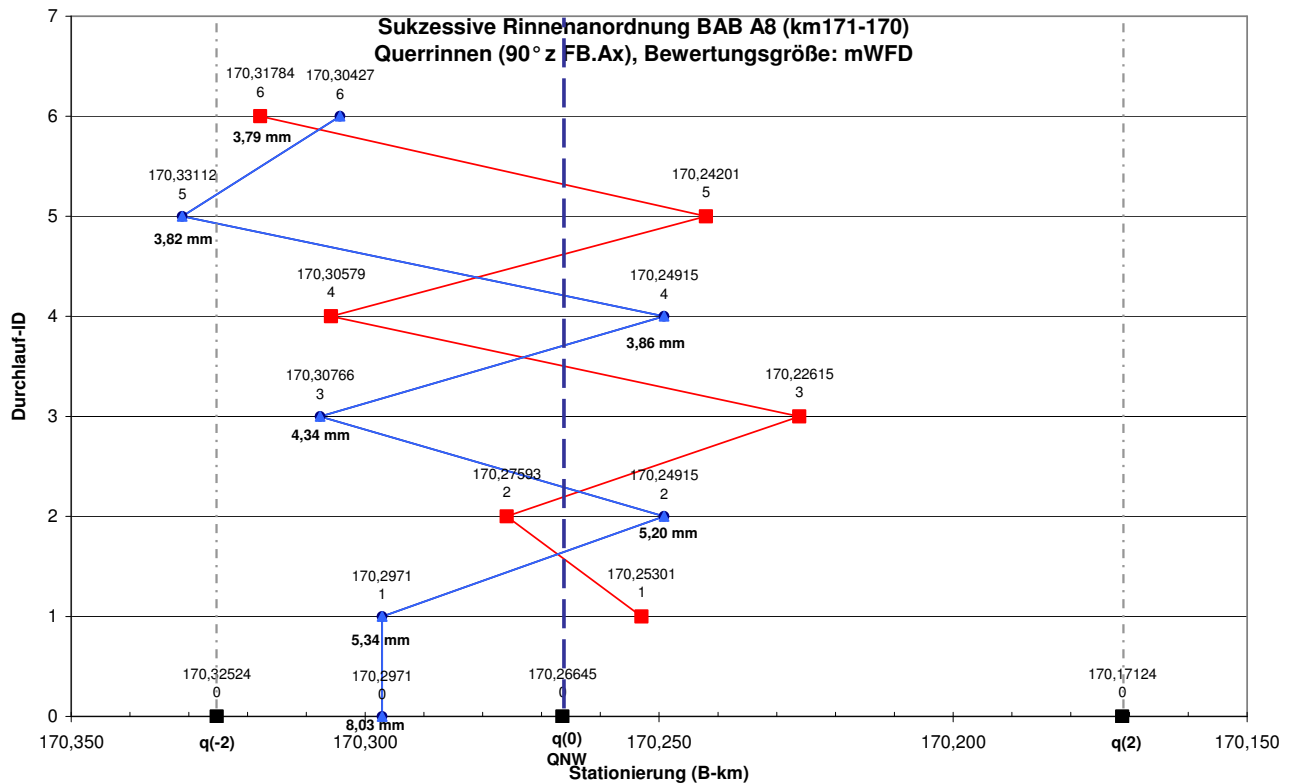


Abbildung 4-16: Sukzessive Rinnenanordnung mit Querrinnen (90° z. Fb.Achse), Bewertungsgröße: mWFD

Wie Abbildung 4-16 zeigt, alternieren die Rinnenpositionen deutlicher als bei den vorigen Bewertungsgrößen um den Querneigungswechsel. Wie bisher, nehmen die Abstände zum Querneigungswechsel tendenziell zu. Außerdem ist zu beobachten, dass die Rinnenpositionen immer in der Nähe der vorausgehenden Position maximaler Wasserfilmdicke gesetzt werden, was nochmals das Bestreben des Algorithmus dokumentiert, den jeweils schlechtesten Wert abzumindern.

Abbildung 4-17 zeigt den Verlauf der Bewertungsgröße B (linke Säulen) mit zunehmender Anzahl gleichzeitiger Rinnen. Der Wert von B nimmt demnach degressiv zu (rechte Säulen).

Allein mit 1 Rinne beträgt $\Delta B_1 = 2,69 \text{ mm}$ ($= 8,03 - 5,34 \text{ mm}$). Selbst mit 6 gleichzeitigen Rinnen ist keine Verdoppelung dieses Werts zu erreichen $\Delta B_6 = 4,24 \text{ mm}$ ($= 8,03 - 3,79 \text{ mm}$)²⁶.

²⁶ Die Absolutwerte der WFD sind höher als bei den B-Bewertungen, da als Regenereignis $n=0,2$ angesetzt wurde.

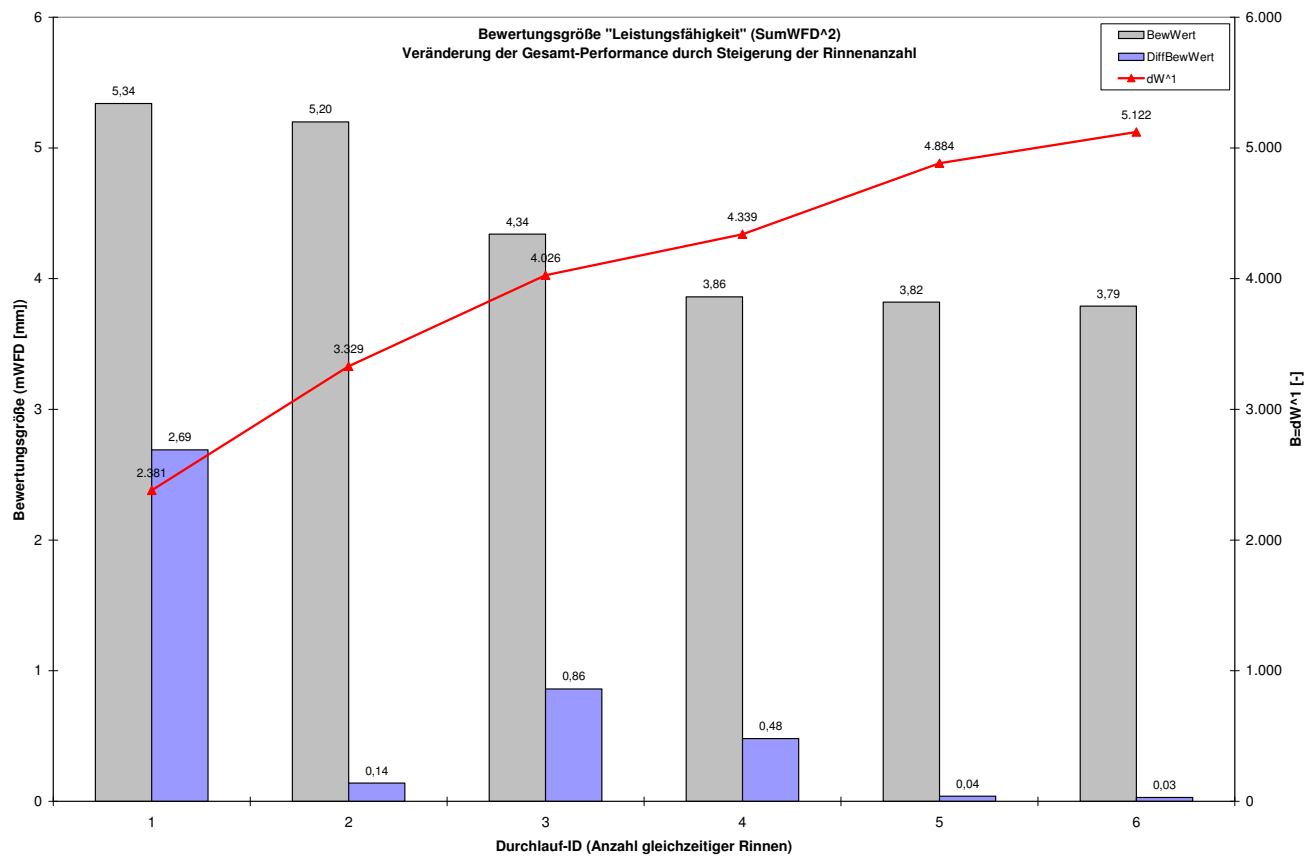


Abbildung 4-17: Verlauf Bewertungsgröße „Leistungsfähigkeit“, Bewertungsmerkmal: mWFD

Zusammenführung der Verfahren

Anhand der optimierten Rinnenpositionen bei den drei untersuchten Bewertungsverfahren des Beispielabschnitts (vgl. Abbildung 4-18) kann für alle Verfahren eine quantitative Übereinstimmung abgeleitet werden. Dazu wurde in der Kurve für $\sum \Delta V_i^1$, die von den anderen Kurven nur scheinbar stark abweicht, der Wert für ID 2 (+ 30,36 m) entfernt. Die anderen Werte rücken auf die Positionen der vorigen IDs nach. ID 5 entfällt dabei beim Vergleich. Hier wird die ursprüngliche Position von ID 2 angesetzt. ID 6 wird wieder kongruent gehandhabt. Diese Verfahrensweise ist zur Beurteilung ist typischen Musters gangbar.

Die qualitativ gleichgerichteten Rinnenpositionen haben z.T. noch unterschiedliche Relativabstände, die jedoch verfahrensbedingt sind. Eine Aggregation über arithmetische Mittelung der Punkte sollte, um die Einflüsse der Verfahren zu eliminieren, zulässig sein, solange keine Begründung zur Auswahl eines spezifischen Verfahrens gegeben ist.

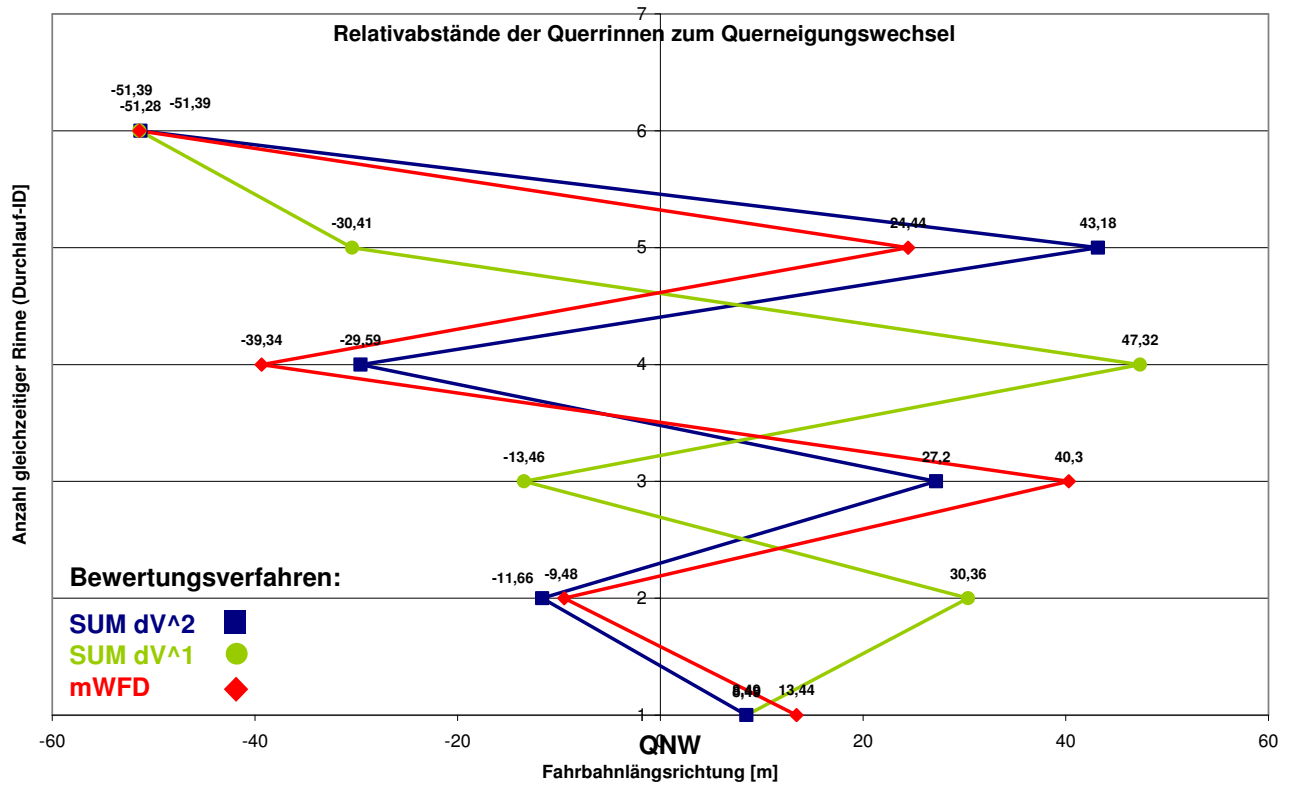


Abbildung 4-18: Relativabstände der Querrinnen; Vergleich der Rinnenpositionen von drei Bewertungsverfahren ($\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, mWFD)

Damit ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 4-19):

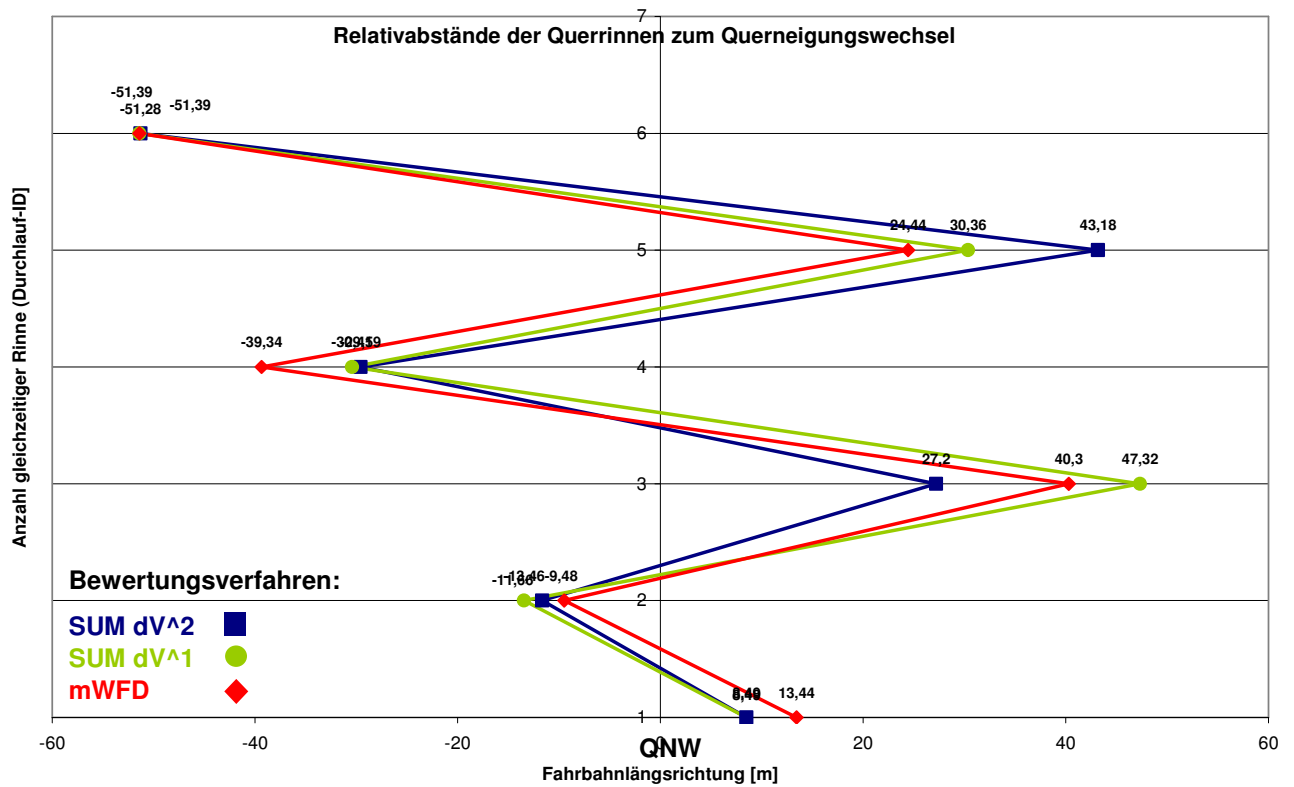


Abbildung 4-19: Relativabstände (bearbeitet) der Querrinnen; Vergleich der Rinnenpositionen von drei Bewertungsverfahren ($\sum \Delta V_i^2$, $\sum \Delta V_i^1$, mWFD)

Einfluss der Längsneigungen s auf die Rinnenpositionierung

Hilfsweise und ergänzend wurde ein parametrisierter Verwindungsbereich mit verschiedenen Längsneigungen s untersucht. Bewertungsparameter war $B = \sum \Delta V_i^1$ (vgl. Abbildung 4-20).

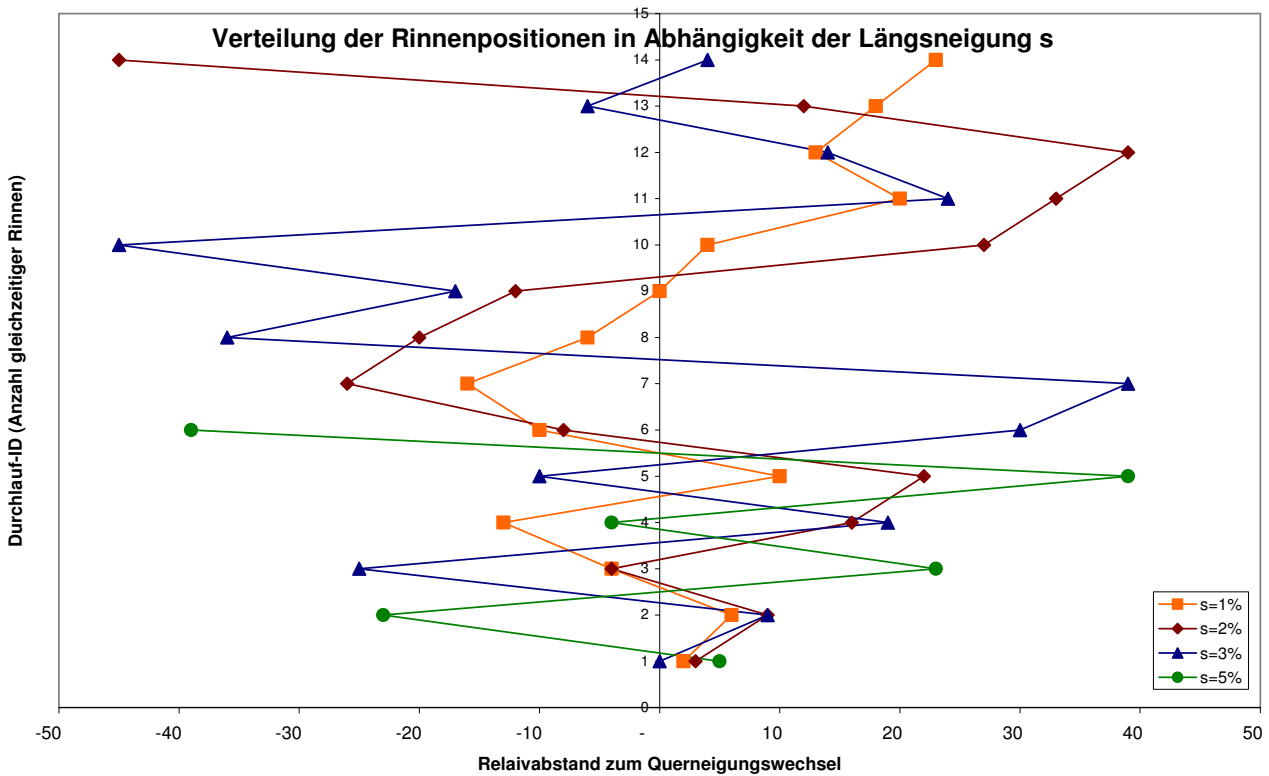


Abbildung 4-20: Verteilung der Rinnenpositionen in Abhängigkeit der Längsneigung s

Selbst bei den hier zu Grunde gelegten Randbedingungen (parametrisierte Topologie, dasselbe Bewertungsverfahren) kann keine Gesetzmäßigkeit, bis auf die bereits thematisierten, gefunden werden. Die Zunahme der Absolutabstände (ohne Berücksichtigung der Richtung) vom Querneigungswechsel mit zunehmender Anzahl gleichzeitiger Rinnen folgt tatsächlich einer relativ engen Gesetzmäßigkeit (vgl. Abbildung 4-21). Der Zusammenhang ist linear, wobei die Geradensteigung mit zunehmender Fahrbahnlängsneigung nicht-linear zunimmt.

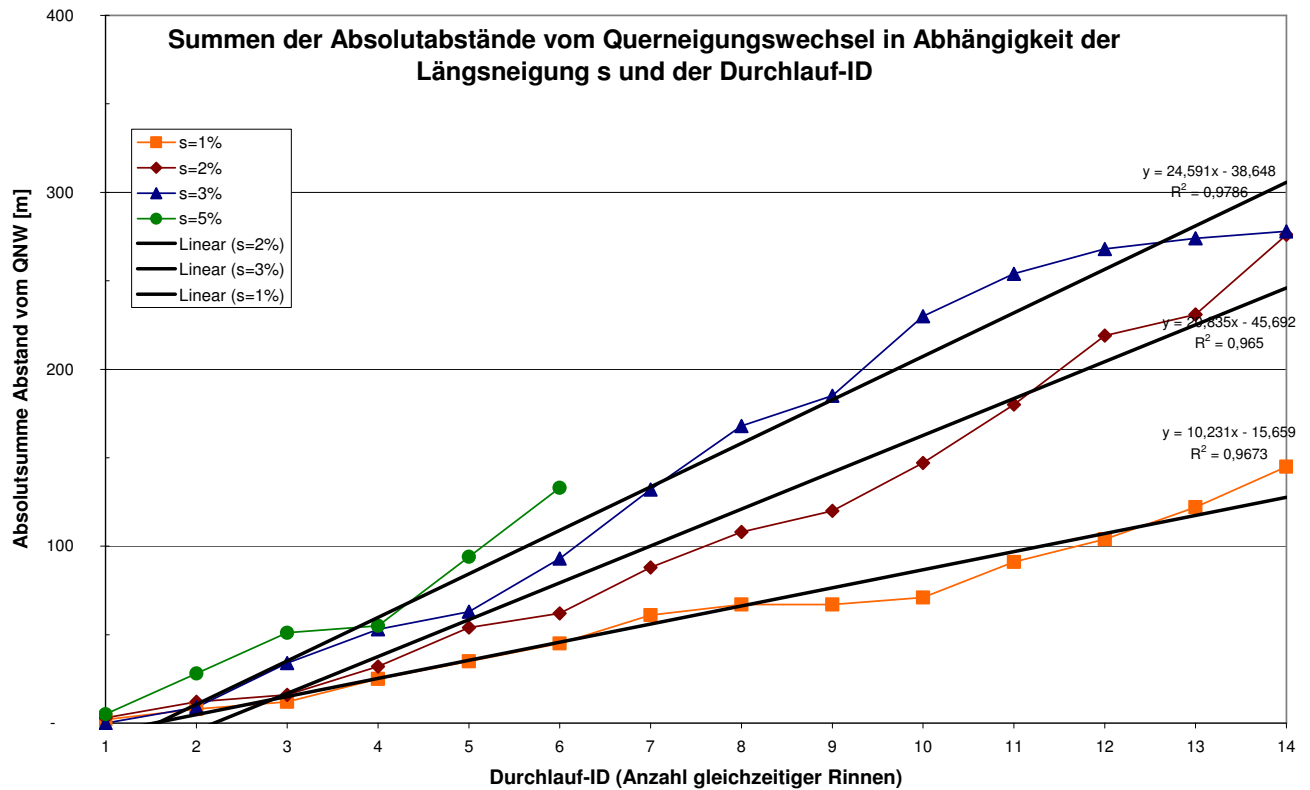


Abbildung 4-21: Summen der Absolutabstände vom Querneigungswechsel in Abhängigkeit der Längsneigung s und der Durchlauf-ID

Während das obige Diagramm die Zunahme der Summe der absoluten Abstände mit zunehmender Rinnenzahl darstellt, werden in Abbildung 4-22 die Richtungen der Abstände berücksichtigt. Das Alternieren der Positionen um den Querneigungswechsel herum ist durch den sinusförmigen Verlauf der Kurven ersichtlich.

Mit zunehmender Rinnen-ID nehmen die Amplituden zu (größere Abstände). Insgesamt tendieren die Kurven jedoch zu positiven Positionen, also entgegen der Steigung der Fahrbahn (positive Längsneigung). Allen Längsneigungen gemeinsam ist der Startpunkt (erste Rinne) in unmittelbarer Nähe des Querneigungswechsels, jedoch leicht in Richtung der Längsneigung verschoben.

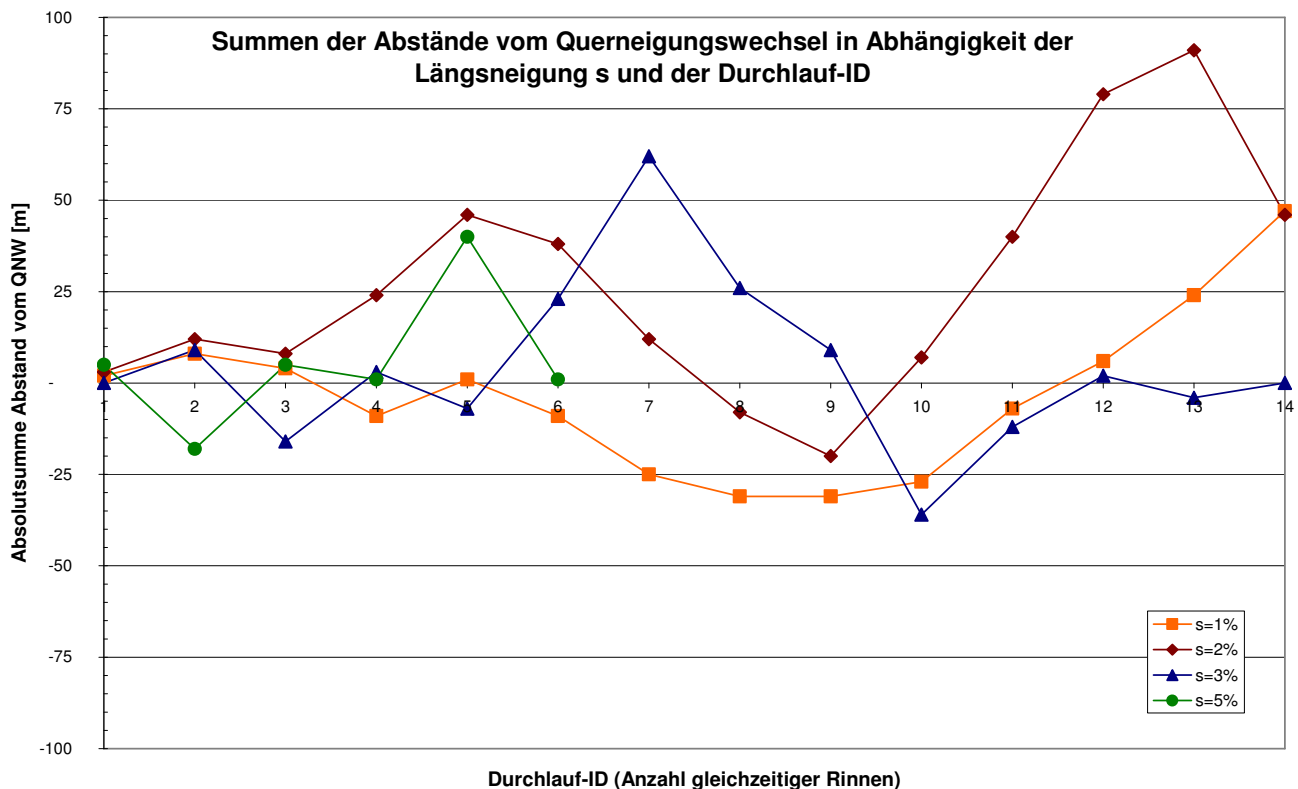


Abbildung 4-22: Summen der Abstände vom Querneigungswechsel in Abhängigkeit der Längsneigung s und der Durchlauf-ID

Zusammenfassung Auswahl Bewertungsverfahren

Allen Bewertungsvarianten gemeinsam ist der degressiv zunehmende Verlauf der jeweiligen Bewertungsgröße B . Mit jeder zusätzlich gesetzten Rinne kann eine weitere Wirkungsverbesserung erzielt werden. Der Abminderungseffekt ist jedoch bei der ersten Rinne deutlich am größten. Um danach dasselbe Quantum zu erreichen, sind mindestens drei (und je nach Optimierungs-Zielgröße bis über sechs) zusätzliche Rinnen erforderlich. Da der Einbauaufwand (Herstellungskosten) für die Rinnen dagegen annähernd linear zunehmen dürfte, bleibt damit wirtschaftlich abzuwägen, bis zu welcher Rinnenanzahl ein Einbau erfolgen soll.

4.4.2 Rinnenoptimierung

Bei der hilfsweise durchgeführten Rinnenoptimierung in Abhängigkeit der Längsneigung konnten zudem folgende Gesetzmäßigkeiten gefunden werden:

- Die absoluten Abstände vom Querneigungswechsel nehmen mit zunehmender Rinnenanzahl zu. Der Anstieg erfolgt linear und ist direkt mit der Längsneigung zu erklären.
- Die tatsächlichen Relativabstände alternieren um den Querneigungswechsel; ihre Summen ergeben sinusförmige Kurven mit zunehmenden Amplituden.

- Die erste Rinnenposition liegt in unmittelbarer Nähe des Querneigungswechsel mit leichter Verschiebung in Richtung der Fahrbahnsteigung.

Andere Gesetzmäßigkeiten ließen sich jedoch aus dieser ersten Betrachtung nicht ableiten. Es bleibt die Empfehlung, die optimalen Rinnenpositionen in jedem Einzelfall mit PLANUS zu ermitteln. Zudem sollte bei jeglichen Untersuchungen Kenntnis über die Auswirkungen des gewählten Bewertungsverfahrens bestehen.

Die Effektivitätsbewertungen könnten verfeinert werden, indem eine querschnittsbezogene Betrachtung durchgeführt werden würde (z.B. durch Außerachtlassung der Werte für den Standstreifen). Mit dem raumbezogenen Modell konnte diese Betrachtung aus modelltechnischen Gründen jedoch nicht durchgeführt werden.

Für den untersuchten Verwindungsbereich lassen sich folgende Hinweise ableiten:

1. Die erste Rinne sollte ca. 10 m versetzt in Richtung der Tangentensteigung positioniert werden.
2. Die weiteren Rinnen befinden sich jeweils alternierend um den Querneigungswechsel mit zunehmendem Abstand.
3. Der Effektivitätszuwachs lässt mit jeder zusätzlichen Rinne nach. Im Umkehrschluss lässt sich bereits mit einer einzelnen Rinne ein vergleichsweise gutes Ergebnis erzielen.
4. Schrägrinnen werden nicht empfohlen. In einem Optimierungslauf wurden die Winkel {45°, 135°, 60°, 120°} evaluiert. Gegenüber Querrinnen führen diese zu wesentlich schlechteren Ergebnissen. Dabei wurde noch nicht der erhöhte Fertigungsaufwand, sondern lediglich die Rinnenlänge als Bezugsgröße gewählt.

Die empfohlenen Positionen der Querrinnen ergeben sich im Einzelnen zu (Angaben bezogen auf Fahrtrichtung; Absolutpositionen gerundet auf ganze 1 m-Positionen²⁷):

1. 10,1 m nach QNW (B-km 170+256)
2. 11,5 m vor QNW (B-km 170+278)
3. 38,3 m nach QNW (B-km 170+228)
4. 33,1 m vor QNW (B-km 170+300)
5. 33,8 m nach QNW (B-km 170+233)
6. 51,4 m vor QNW (B-km 170+318)

²⁷ Entspricht der Genauigkeit der Berechnungen bei den Rinnenoptimierungen (Rinnenabstände = 1,0 m)

4.5 Lösungsvorschlag 3: Grooving

4.5.1 Effektivität des vorhandenen Grooving-Bereichs

Grooving (das Fräsen von Rillen in den Fahrbahnbelag, vgl. RESSEL/HERRMANN 2006A bzw. RESSEL/HERRMANN 2006B) ist eine weitere erprobte Maßnahme, um die Aquaplaning-Gefahr zu verringern. In Kapitel 3.4.7 wurde erläutert, wie Grooving als künstliche Makrotextur bzw. als Mikrokanalsystem modelliert werden kann. Wegen der nicht-achsbezogenen Modellierungsdaten wird Grooving in diesem Anwendungsbeispiel als künstliche Makrotextur modelliert.

Die BAB A 8 verfügt bereits über einen mit Grooving versehenen Abschnitt (km 170+360 bis km 170+183), der mit seinen Eigenschaften auch in das Texturmodell aufgenommen wurde. Wie die Ohnefall-Auswertungen zeigten (insbesondere zu den Radspuren (s. Kap. 4.3.2 bzw. App. C.3), wurde der Abschnitt prinzipiell richtig gewählt.

Abbildung 4-23 stellt für $n = 0,2$ gegenüber, wie sich Wasserfilmdicken und Aquaplaning-Geschwindigkeiten verhalten würden, wenn dieser Bereich ohne Grooving-Maßnahme wäre („hypothetischer Ohne-Fall“).

Erwartungsgemäß wären die Wasserfilmdicken geringer, da der Fließwiderstand geringer ist und somit das Wasser schneller abfließen kann. Der gegenläufige Effekt ist ein Anheben des Bezugsniveaus für die bezogenen Wasserfilmdicken. Der Effekt ist aber schwächer, sodass sich insgesamt eine leichte Zunahme ergibt.

Bei den Aquaplaning-Geschwindigkeiten kehrt sich der Effekt um, da nun keine Rillen mehr als Drainage- und Retentionsraum für das beim Überrollen verdrängte Oberflächenwasser zur Verfügung stehen.

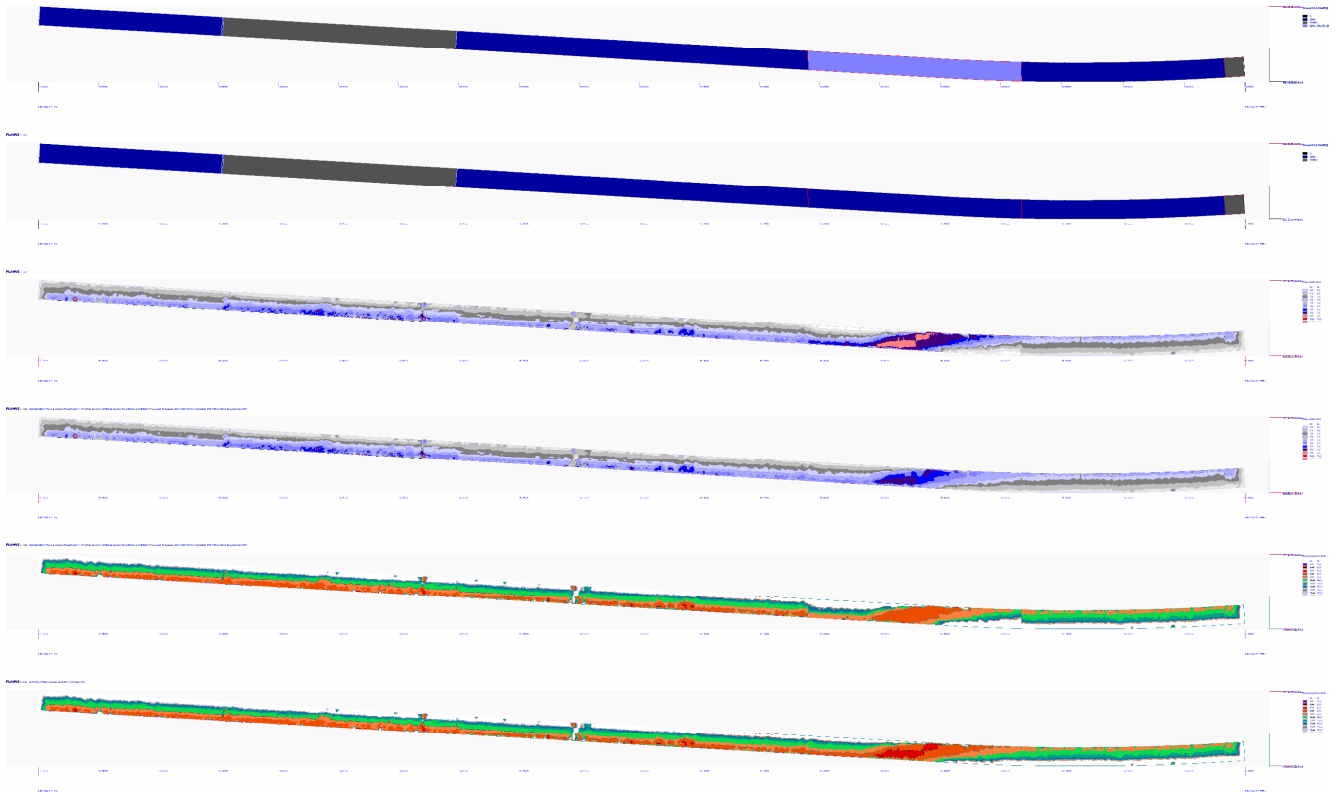


Abbildung 4-23: Texturmodell, Wasserfilmdicken und Aquaplaning-Geschwindigkeiten (für $t = 1,60\text{mm}$); $n=0,2$; jeweils für Ohne-Fall (oben) und hypothetischer Ohne-Fall (ohne Grooving) (unten)

Nun gibt es einen kleinen Bereich (bei km 170+290) mit $V_{\text{aq}} < 70\text{ km/h}$ (kleinster V_{aq} -Wert: 65,1 km/h), d.h. es müsste eine Geschwindigkeitsvorgabe 60 km/h gesetzt werden.

Die Radspuren-Diagramme (Abbildung 4-24) zeigen ein Absinken der absoluten Mindestgeschwindigkeit (maßgebend ist wieder Fahrzeug 3) von 78,8 km/h auf 70,9 km/h, d.h. nach dieser Betrachtung würde bei $n = 0,2$ nach wie vor 70 km/h als Höchstgeschwindigkeit vorzugeben sein.

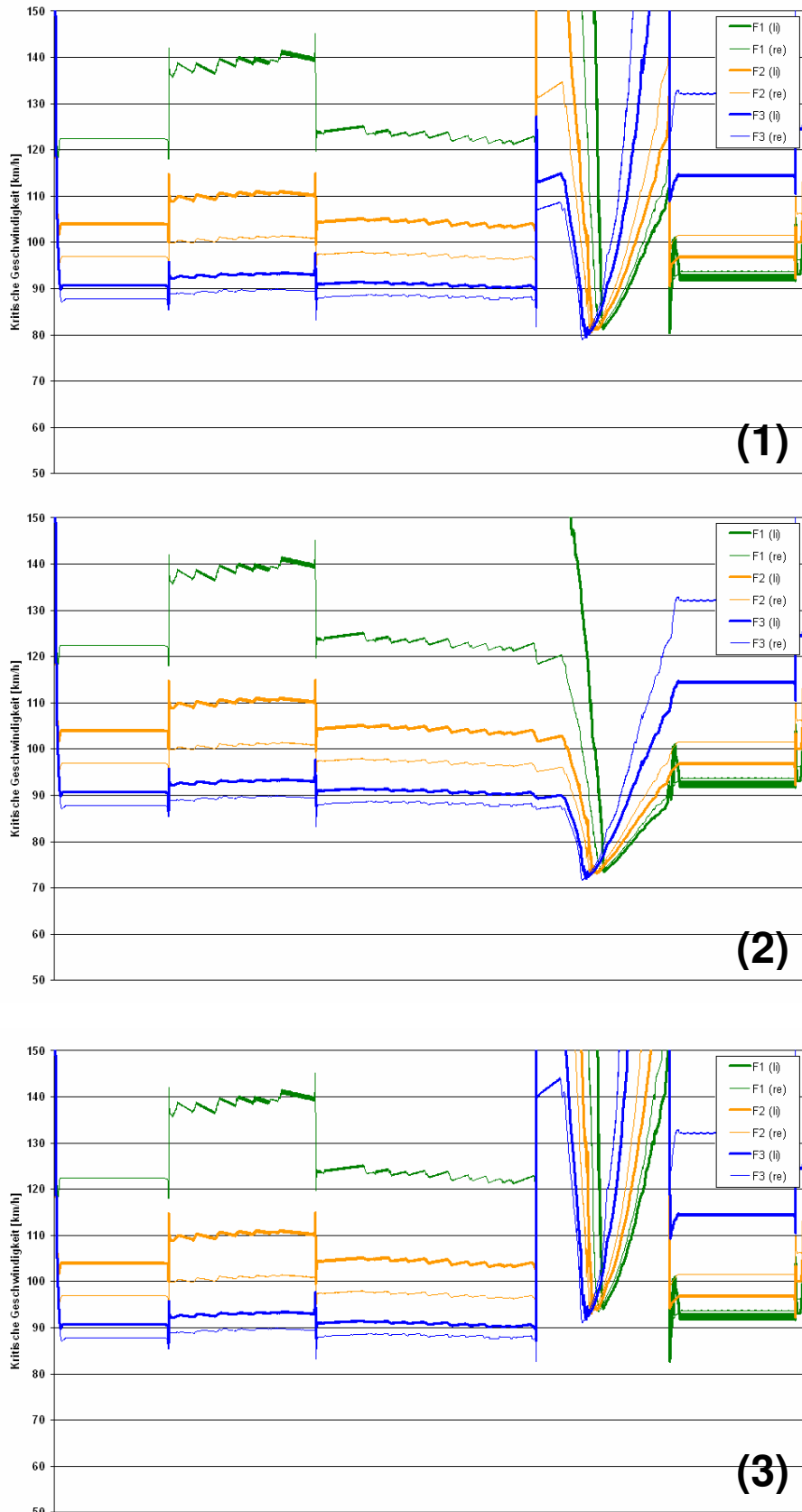


Abbildung 4-24: V_{aq} - Radspuren (für $t = 1,60\text{mm}$); $n=0,2$; jeweils für Ohne-Fall (1), hypothetischer Ohne-Fall (ohne Grooving) (2), Grooving 10/10/30 (3) und Ohne-Fall mit veränderten Grenzen (4)

Tabelle 11 zeigt die Wirksamkeit der vorhandenen Grooving-Maßnahme im Vergleich mit dem hypothetischen Ohne-Fall (ohne Grooving) für verschiedene Regenhäufigkeiten. Der

Sicherheitsgewinn liegt – je nach Regenereignis – bei ca. 10 km/h. Allgemein gilt: je geringer die Regenintensität, desto höher ist der Sicherheitsgewinn.

4.5.2 Optimierung Grooving-Bereich

Der vorhandene Grooving-Bereich (Ohne-Fall) erstreckt sich von km 170+360 bis km 170+183. Bezogen auf den Querneigungswechsel (bei km 170+266,45) bedeutet dies, dass (in Fahrtrichtung) 93,55 m davor und 83,45 m danach Grooving angewendet wurde (vgl. Abbildung 4-25).

Neben dem positiven Effekt der besseren Drainage und Aquaplaning-Performance sind mit jeder Grooving-Maßnahme auch negative Wirkungen verbunden. Dies sind v.a.:

- Herstellungskosten der Maßnahme
- Abminderung der strukturellen Kohäsion der Decke (Dauerhaftigkeit, Nutzungsdauer herabgesetzt, höherer Erhaltungsaufwand)
- Erhöhung der Lärmemissionen aus Reifen-Fahrbahn-Überrollvorgang (größere Geräuschestehung bei Grooving)
- Abminderung der Griffigkeit (Abminderung der im Nicht-Aquaplaning-Fall, insbesondere bei trockenem Fahrbahnzustand für die Kraftübertragung Reifen-Fahrbahn effektiv zur Verfügung stehenden Kontaktfläche)
- Verkehrssicherheit (i. siehe Griffigkeit; ii. Erschwerung der Befahrbarkeit, v.a. für 1-spurige Fahrzeuge (Motorräder))

Daraus folgend sollte die Länge des Grooving-Abschnitts – unter den postulierten und erreichbaren Ansprüchen - minimiert werden.

Mit den Ausgabedaten von PLANUS ist dies, nach weiterer Aufbereitung der Daten, möglich. Die Vorgehensweise wird im Folgenden exemplarisch für das vorhandene Pattern 7/7/31 und für das Pattern 10/10/30 vorgestellt.

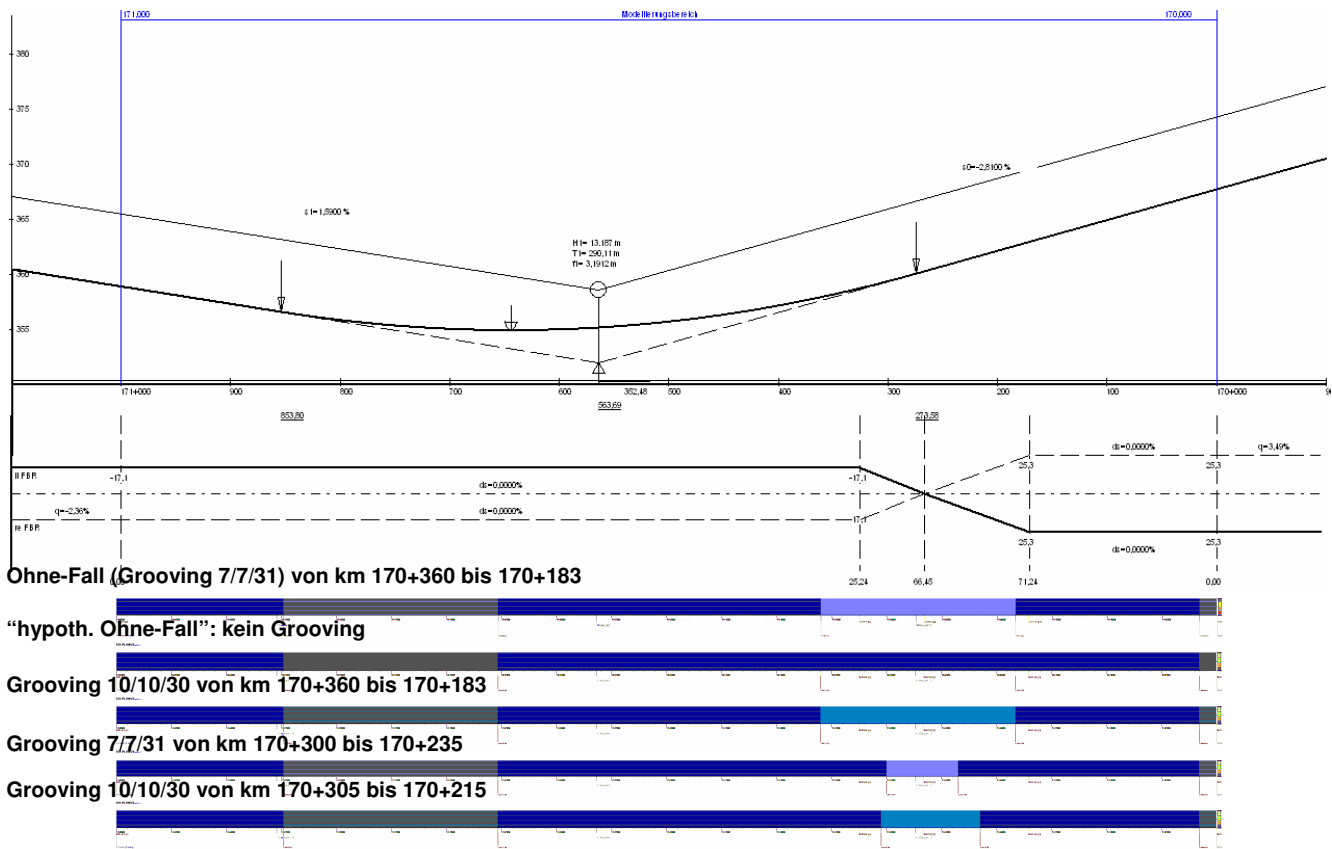


Abbildung 4-25: Höhenplan, Querneigungsband BAB A8 (km 171-170); mit Texturmodellen 1-5

Wie Abbildung 4-26 am Radspurenband für den Ohne-Fall ($n = 0,2$) zeigt, könnte der Grooving-Bereich – ohne Abminderung der Performance - theoretisch kürzer gefasst werden als er im Ohne-Fall ist, da die angrenzenden Bereiche die untere kritische Geschwindigkeit bereits vorgeben.

Die kürzeste Länge eines Grooving-Anschnitts (ohne Performance-Abminderung) kann ermittelt werden, indem der niedrigste sich ergebende V_{aq} - Wert bei Anwendung eines Grooving-Patterns als Schranken (links und rechts) für den Vergleichsfall ohne Grooving verwendet werden. Die X-Stellen dieser Schranken ergeben Anfang und Ende des Grooving-Abschnitts.

Für das Pattern 7/7/31 und $n = 0,2$ ist $V_{aq,min} = 95,8$ km/h (Fahrzeug 3 rechts).

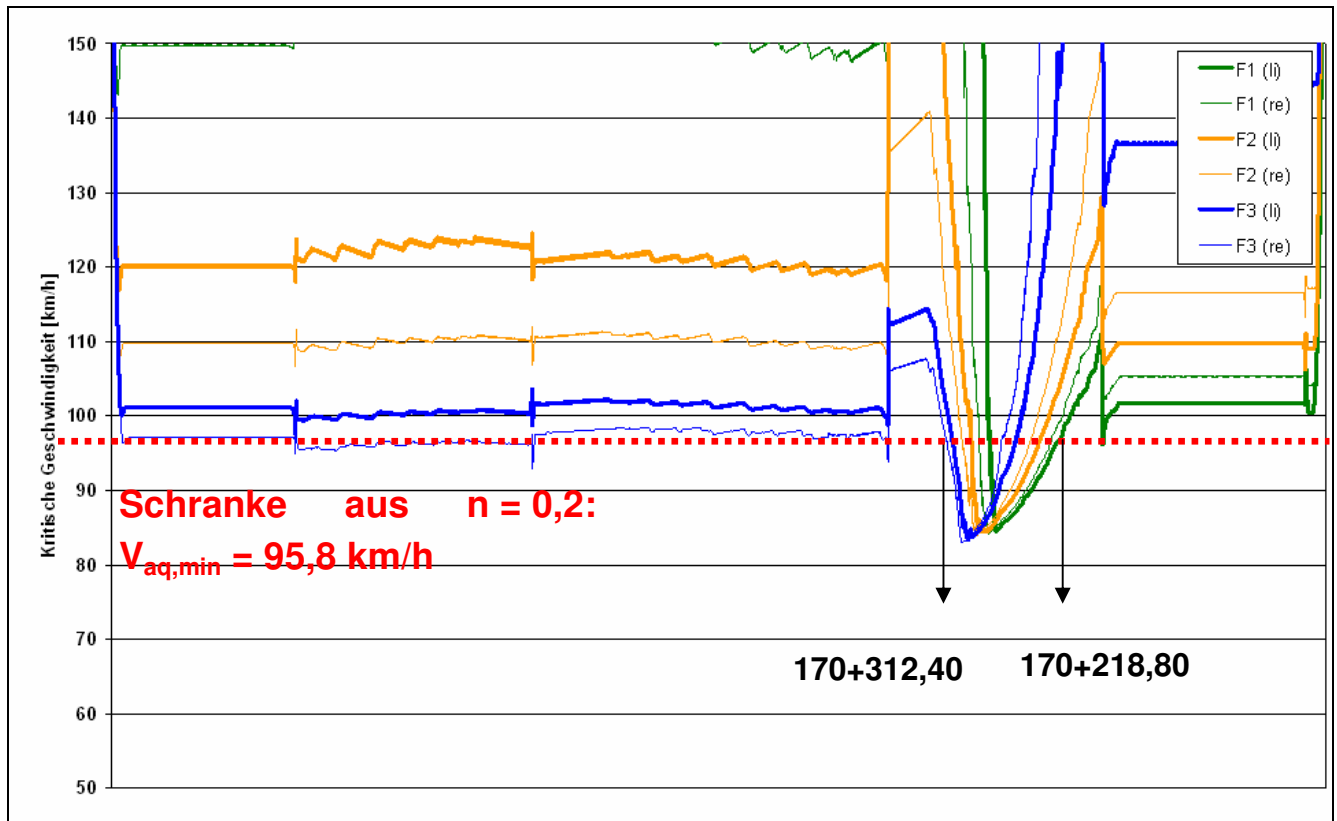


Abbildung 4-26: Höhenplan, Querneigungsband BAB A8 (km 171-170); mit Texturmodellen 1-4

Für andere Regenereignisse ergeben sich sehr ähnliche Werte (Tabelle 8):

Regenhäufigkeit n [1/a]	Annäherungs- geschwindigkeit V ₀ [km/h]	Länge Grooving [m]	linke Grenze [B- km]	rechte Grenze [B- km]
VORH	-	177,00	170+360,00	170+183,00
0,05	88,0	86,20	170+310,60	170+224,40
0,2	95,8	93,60	170+312,40	170+218,80
1	112,3	83,20	170+309,80	170+226,60
5	159,4	62,60	170+304,60	170+242,00

Tabelle 8: Grenzen des Grooving-Abschnittes im Verwindungsbereich für Pattern 7/7/31 und für versch. Regenereignisse

Dieselbe Prozedur angewandt auf das Pattern 10/10/30 ergibt (Tabelle 9):

Regenhäufigkeit n [1/a]	Annäherungs- geschwindigkeit V ₀ [km/h]	Länge Grooving [m]	linke Grenze [B- km]	rechte Grenze [B- km]
VORH	-	177,00	170+360,00	170+183,00
0,05	88,0	65,40	170+305,20	170+239,80
0,2	95,8	69,20	170+305,80	170+236,60
1	112,3	60,20	170+304,20	170+244,00
5	159,4	39,20	170+303,40	170+264,20

Tabelle 9: Grenzen des Grooving-Abschnittes im Verwindungsbereich für Pattern 10/10/30 und für versch. Regenereignisse

Die Längen der zu groovenden Abschnitte sind im Fall 10/10/30 kürzer als im Fall 7/7/31.

Die linken Grenzen sind je nach untersuchtem Fall relativ gleichmäßig verteilt; sie unterscheiden sich nur um wenige Meter. Die rechten Grenzen unterscheiden sich bei beiden Fällen um bis zu 25 m, was daran liegt, dass nach der Annäherungsgeschwindigkeit von links kommend optimiert wurde.

Aus den untersuchten Fällen lässt sich keine verallgemeinerbare Gesetzmäßigkeit ableiten. Es ist weder eine Abhängigkeit der Grooving-Abschnittslängen noch der linken oder rechten Grenzen vom zu Grunde gelegten Regenereignis festzustellen.

Die Resultate scheinen rein zufallsbedingt zu sein. Dies bedeutet, dass bei einer Optimierung der Grooving-Abschnittslänge nach dieser Methode auf jeden Fall ein großzügiger Sicherheitsbetrag zu den gefundenen Grenzen links und rechts hinzugenommen werden sollte.

Da ca. 25 m die maximale Grenzenabweichung (in Abhängigkeit des Regenereignisses) war, die auftrat, wird vorläufig (an diesem Beispiel BAB A 8) empfohlen je ca. 25 m als Sicherheitsbetrag hinzu zu nehmen.

Wäre mit $n = 1$ dimensioniert worden, wären demnach folgende Abschnittsgrenzen zu wählen:

Groove-Pattern	Länge Grooving-Abschnitt [m]	linke Grenze [B-km]	rechte Grenze [B-km]
7/7/31	135,00	170+335,00	170+200,00
10/10/30	110,00	170+330,00	170+220,00

Tabelle 10: Grenzen des Grooving-Abschnittes im Verwindungsbereich für Pattern 7/7/31 und für versch. Regenereignisse

Trotz des großzügigen Sicherheitsbetrags könnte im Beispiel 7/7/31 gegenüber dem Ist-Zustand eine Grooving-Länge von $177-135 \text{ m} = 42 \text{ m}$ eingespart werden (bei gleichbleibender Verkehrssicherheit).

4.5.3 Optimierung Grooving-Pattern

Das vorhandene Pattern ist 7/7/31 (Rillenbreite/Rillentiefe/Rillenabstand) (vgl. Kap. 2.2 und Kap. 3.4.7). Allgemein gilt, dass eine Vergrößerung des Grooving-Negativprofils, also des Drainagevolumens einen zusätzlichen Nutzen bringt. Eine Vergrößerung kann erfolgen durch:

1. Erhöhung der Rillentiefe
2. Erhöhung der Rillenbreite
3. Verkleinerung der Stegbreite

Einer alleinigen Optimierung des Grooving-Patterns nach Aquaplaning-Gesichtspunkten sind daher Grenzen gesetzt, die sich aus den bereits im vorigen Kapitel beschriebenen Wirkungen ergeben.

Solange zu den obigen Wirkungszusammenhängen keine genauen Erkenntnisse vorliegen, kann eine einseitige Optimierung stets nur unter Vorbehalt erfolgen.

Als Pattern, welches unter den erwähnten Randbedingungen vermutlich zum Maximum des Möglichen und Sinnvollen gehört, wird 10/10/30 untersucht (s. Tabelle 11 und Abbildung 4-27).

Regenhäufigkeit n [1/a]	Ohnefall vorhandenes Grooving- Pattern 7/7/31	„hypothetischer Ohnefall“ kein Grooving	Grooving 10/10/30
0,05	70	70	70
0,2	80	70	80
1	80	70	80
5	90	80	90
10	100	90	100
20	120	110	120

Tabelle 11: Ergebnisse (zulässige Höchstgeschwindigkeiten [km/h]) aus den cluster-/flächenbezogenen Betrachtungen zur maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit

Abbildung 4-27 stellt die Effektivität von Grooving-Maßnahmen anhand der untersten Radspur-Werte der Aquaplaning-Geschwindigkeit dar²⁸. Im vorliegenden Beispiel ist damit die rechte Seite des Fahrzeugs 3 maßgebend. Die 3 durchgezogenen Kurven zeigen die jeweiligen Absolutwerte, während die 2 gestrichelten Kurven die Differenzwerte der beiden Grooving-Fälle zum Fall ohne Grooving zeigen.

²⁸ Die Angaben gelten abschnittsunabhängig, wenn der Abschnitt mindestens nach der erläuterten Dimensionierung gewählt wird, da nur der jeweils schlechteste Wert (unterste kritische Geschwindigkeit $V_{aq,min}$ auf allen Radspuren) maßgebend ist.

Das auf der BAB A8 vorhandene Grooving-Pattern 7/7/31 liegt gut 10 km/h über dem Non-Grooving-Fall. Je geringer die Regenintensität (je höher die Regenhäufigkeit), desto größer wird der Unterschied (bis max. 60 km/h bei $n = 20$).

Das Pattern 10/10/30 zeigt für $n \leq 0,5$ keinen Unterschied mit ebenfalls ca. 10 km/h Differenz zum Non-Grooving-Fall. Ab $n \geq 1$ macht sich erst der größere Drainage-Raum bemerkbar, indem die Differenz zum Non-Grooving-Fall deutlich steiler zunimmt.

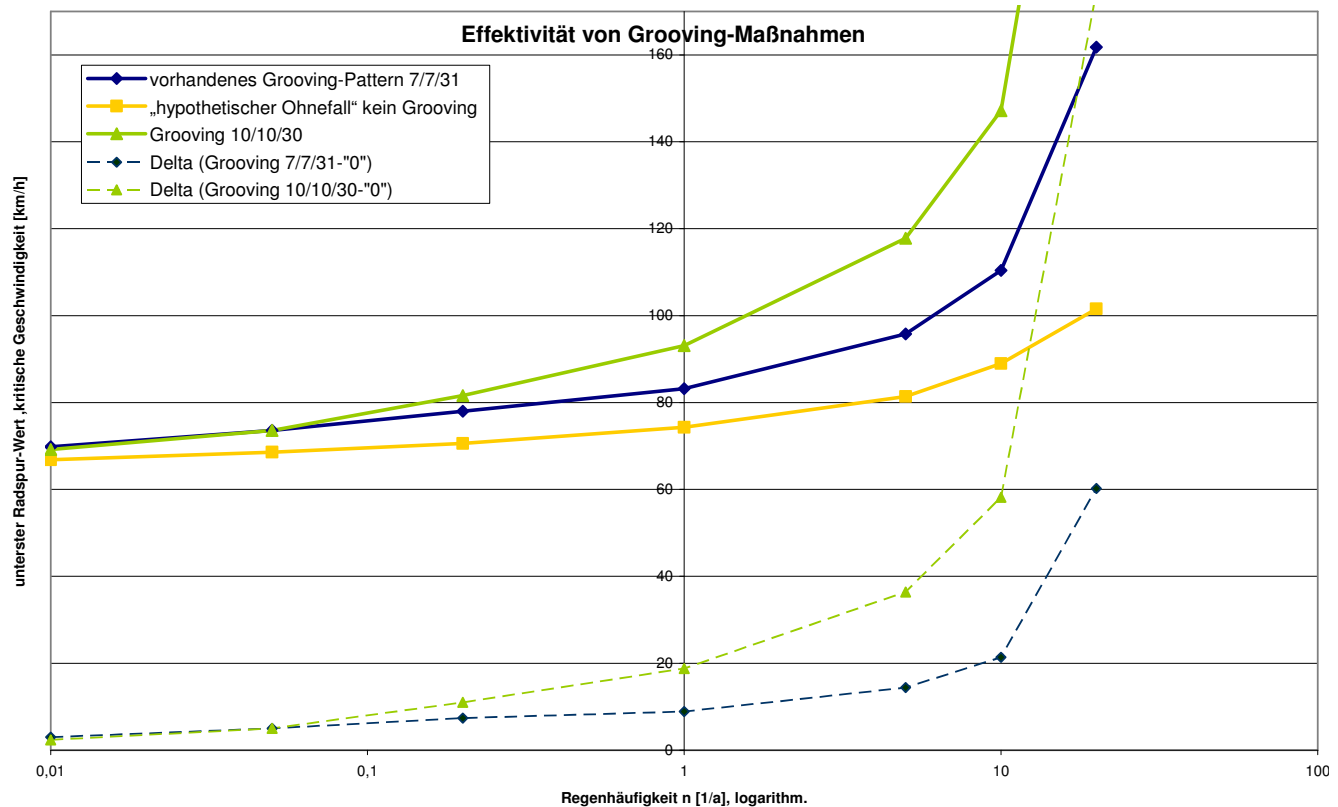


Abbildung 4-27: Effektivität von Grooving-Maßnahmen; unterste Radspur-Werte der Aquaplaning-Geschwindigkeit für Ohne-Fall (Grooving 7/7/31, hypothetischer Ohne-Fall (kein Grooving), Grooving 10/10/30

Daraus lässt sich ableiten, dass sich eine beliebige Vergrößerung des Retentions- und Drainagesystems „Grooving“ nicht unbedingt in einer Verbesserung der Aquaplaning-Performance auswirkt.

Verantwortlich dafür ist der gegenläufige Effekt beim Vergrößern der künstlichen Makrotextur: die Zunahme des Abflusswiderstands und somit die Verzögerung des Abflusses. Dieser Effekt egalisiert besonders bei hohen Regenintensitäten ($n \leq 1$) den Performance-Gewinn durch das Retentions- und Drainagesystem.

4.5.4 Zusammenfassung

Mit Grooving kann eine Abminderung der Aquaplaning-Geschwindigkeit erreicht werden.

Die Abminderung wirkt sich besonders bei „schwächeren“ Regenereignissen ($n \geq 5$) sehr deutlich aus. Auch bei den Bemessungs-Regenhäufigkeiten $n = 0,2$ und $n = 1$ ist eine

Verbesserung um ca. 10 km/h bzw. max. 20 km/h zu erzielen. Der Betrag hängt deutlich vom Rinnenmuster ab, wobei eine Obergrenze durch die konkurrierenden Randbedingungen vorgegeben wird.

Beim Grooving ist grundsätzlich darauf zu achten, dass der Bereich sinnvoll eingegrenzt wird. Ein unmotiviert großer Bereich sollte wegen besagter Randbedingungen vermieden werden, ein zu kleiner oder falsch positionierter Bereich kann die erwünschte Wirkung verfehlen.

Für das untersuchte Beispiel konnte für das bereits vorhandene Pattern 7/7/31 der Bereich eingegrenzt werden, der ohne Performance-Verlust ausreichend wäre.

Zum Vergleich wurde das Pattern 10/10/30 modelliert, das auf Grund größerer Querschnitte der Mikrokanäle eine insgesamt bessere Performance aufweist als das Pattern 7/7/31. Auf die sich ergebenden Wechselwirkungen wurde hingewiesen; eine exakte Erörterung ist jedoch erst nach genauerer Untersuchung sämtlicher involvierten Effekte (Dauerhaftigkeit Belag, Griffigkeit trockene Fahrbahn, Lärm...) möglich.

Auch für das Pattern 10/10/30 konnte der zweckmäßige Abschnitt eingegrenzt werden.

4.6 Lösungsvorschlag 4: Änderung des Querneigungsbands

Als letzter Vorschlag wurden verschiedene Varianten zur Änderung des Querneigungsbands ausgearbeitet.

Nachträgliche Änderungen des Querneigungsbands sind vom fertigungstechnischen Aufwand keine geringfügigen Eingriffe. Anhebungen bzw. Absenkungen wären über mehrere hundert Meter in Dicken von mehreren Zentimetern (je nach Maßnahme) durchzuführen.

Nicht nur die Deckschicht wäre von dem Eingriff betroffen. Ein Teil der untersuchten Lösungsvarianten ist daher mehr als „was wäre wenn“-Betrachtung denn als praxisrelevante Maßnahme zu sehen, da für eine praktische Durchführung zu aufwändig.

Um diese Berechnungen überhaupt erst durchführen zu können, mussten zunächst aus den MOSES-Messpunkten die ursprünglichen Trassierungsparameter zurückgerechnet werden, damit nicht ein Vergleich eines parametrisierten Modells mit einem raumbezogenen Modell die Ergebnisse (Vergleichsbetrachtungen) verfälschen könnte. Da also nur Einflüsse der Trassierung miteinander verglichen werden sollen, müssen die Einflüsse der Fahrhahnenheiten etc. eliminiert werden.

Für das Rückrechnen aus raumbezogenen Daten wurde die PLANUS-Routine zur automatischen Fahrhahnenquerschnitt-Generierung verwendet. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Darüber hinaus war eine Querschnittseinteilung vorzunehmen, da aus den Daten nur die Gesamtbreite von 15,35 m zurückgerechnet werden konnte. Wie bereits in Kap. 2.2.2 erwähnt, spricht die Breite für einen Regelquerschnitt RQ 35,5 (FGSV, 1996). Die Inaugenscheinnahme vor Ort ergab ebenfalls eine Einteilung mit 3 Fahrstreifen mit Standstreifen. Aufgrund der Gesamtbreite wurde daher ein RQ 35,5 zu Grunde gelegt,

dessen Bestandteile wie folgt modifiziert wurden: jeder Fahrstreifen: + 0,25 m; linker Randstreifen: + 0,10 m (=0,85 m = 15,35 m - 14,50 m).

Die Drehachsenanordnung wurde als mittig angenommen (DAA = 0,500).

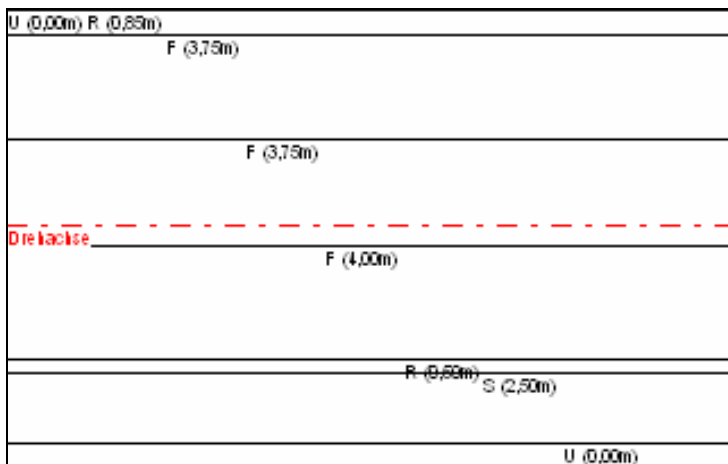


Abbildung 4-28: modifizierter Fahrbahnquerschnitt RQ35,5* für Untersuchungsabschnitt BAB A8 [Ausgabe PLANUS Parametrisierung-Editor]

Die untersuchten Varianten waren:

- Alt. 1: Geteilte Verwindung
 - mit $\min \Delta s = 0,1 \cdot a$
 - mit $\min \Delta s = 0,2 \cdot a$
- Alt. 2: Schrägverwindung
- Alt. 3: Veränderte Gradientenlage im Querschnitt
 - Drehachsenanordnung 0,00 (linker Fahrbahnrand)
 - Drehachsenanordnung 1,00 (rechter Fahrbahnrand)
- Alt. 4: Veränderte Gradientenlage und geteilte Verwindung (mit $\min \Delta s = 0,1 \cdot a$)
 - Drehachsenanordnung 0,00 (linker Fahrbahnrand)
 - Drehachsenanordnung 1,00 (rechter Fahrbahnrand)
- Alt. 5: Querneigung zur Kurvenaußenseite
 - linker Fahrbahnrand oben
 - rechter Fahrbahnrand oben

4.6.1 Ohne-Fall

Da sämtliche Trassierungsalternativen auf parametrisierten Oberflächen beruhen, musste auch der Vergleichsfall mit den Parametrisierungsdaten gerechnet werden. Wie aus nachfolgender Abbildung 4-29 qualitativ erkennbar ist, sind die Daten/Ergebnisse für das

raumbezogene Modell des BAB A 8-Abschnitts und dem Modell aus den parametrisierten Daten gut miteinander vergleichbar.

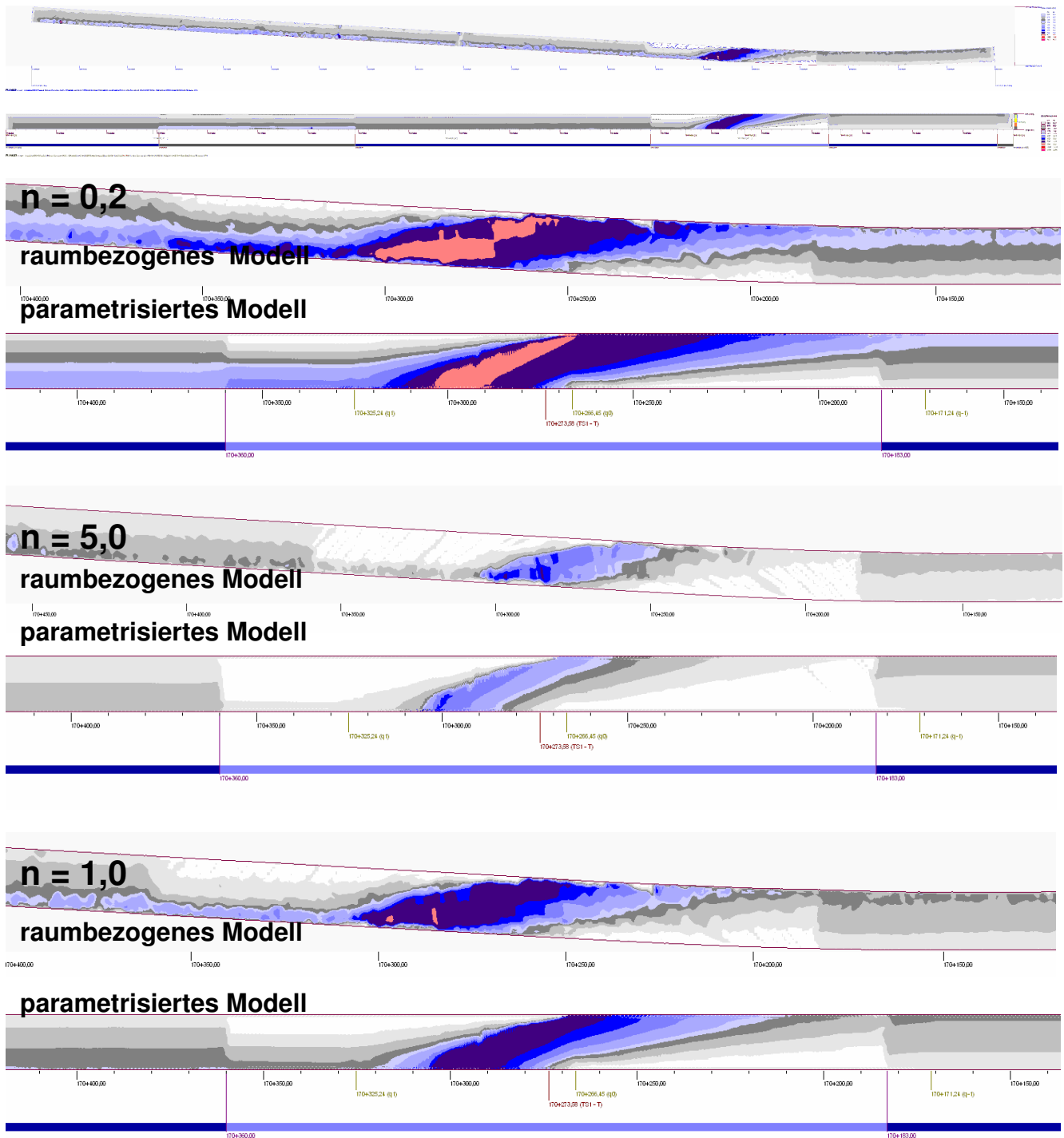


Abbildung 4-29: Qualitative Gegenüberstellung der Wasserfilmdickenverteilungen von raumbezogenen und parametrisierten Modellierungsbereich-Oberflächen

Ein quantitativer Vergleich der Verteilungen der interpolierten Wasserfilmdicken (App. F.1c) lässt erkennen, dass die Kurven der Wasserfilmdicken-Summenhäufigkeiten für die beiden Fälle sehr angepasst verlaufen.

Nur in einem bestimmten Wertebereich gibt es größere Abweichungen (z.B. im Bereich $1,0 \text{ mm} < \text{WFD} \leq 1,5 \text{ mm}$ für das Regenereignis $n = 1$).

Das Auftreten der Abweichungen in einem sehr eng gefassten Wertebereich lässt darauf schließen, dass die Unterschiede zwischen den beiden Modellen durch Irregularitäten im Raummodell gegenüber dem parametrisierten Modell mit einer ideal-ebenen Oberfläche, zurückzuführen sind.

Diese Irregularitäten wiederum bilden die Einflüsse von Verkehr (Spurrinnen), reliefartige Fahrbahnmarkierungen und/oder Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Fahrbohnoberfläche gegenüber der optimal analytischen Form (parametrisiertes Modell) ab. Sie äußern sich in einer Verlängerung der Fließwege der 1-dimensionalen Falllinien).

Folglich kann die Menge der im Raummodell nach oben abweichenden Punktwerte als direkter Effekt dieser Irregularitäten betrachtet werden und somit der Einfluss von Spurrinnen auf das Abflussverhalten quantifiziert werden.

Es ist interessant, dass diese Irregularitäten im hier untersuchten Anwendungsbeispiel nicht die Spitzenwerte beeinflussen, sondern eher die Wertegruppe im Mittelfeld. Folglich ist eindeutig und (nahezu) ausschließlich der Verwindungsbereich für die maßgebende Spitzengruppe der Werte verantwortlich und stellt damit die Hauptquelle der Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit und der Hauptansatzpunkt von Verbesserungsmaßnahmen dar²⁹.

4.6.2 Alternative 1: Geteilte Verwindung

Wie sich aus den zurückgerechneten Querneigungen (vgl. Abbildung 2-9) bestimmen lässt, ist im Verwindungsbereich eine durchgehende, d.h. nicht-geteilte Anrampungsneigung vorhanden. Diese beträgt:

$$\Delta s = 0,0379 \cdot a \quad (4-2)$$

mit:

a = Abstand des Fahrbohnrandes von der Drehachse, m

Nach RAS-L (FGSV, 1995) ist jedoch im Bereich von + min q durch 0 bis - min q mit $|\min q| = 2,5\%$ mit $\min \Delta s = 0,1 \cdot a$ anzurampen.

Eine mögliche Änderung des heutigen Grenzwertes der Querneigung von $|\min q| = 2,5\%$ wurde in RESSEL/HERRMANN (2006A) untersucht. Der geltende Mindestwert konnte nach Modellrechnungen unter Variation dieses Parameters – unter Aquaplaning-Gesichtspunkten – bestätigt werden (vgl. Abbildung 4-30).

²⁹ Die anderen Einflüsse dürfen selbstverständlich nicht als nebensächlich angesehen werden. Eine Verbesserung der Verkehrssicherheit, die sich auf die kritischen Spitzenwerte (WFD wie V_{aq}) fokussiert, muss jedoch primär im Verwindungsbereich ansetzen.

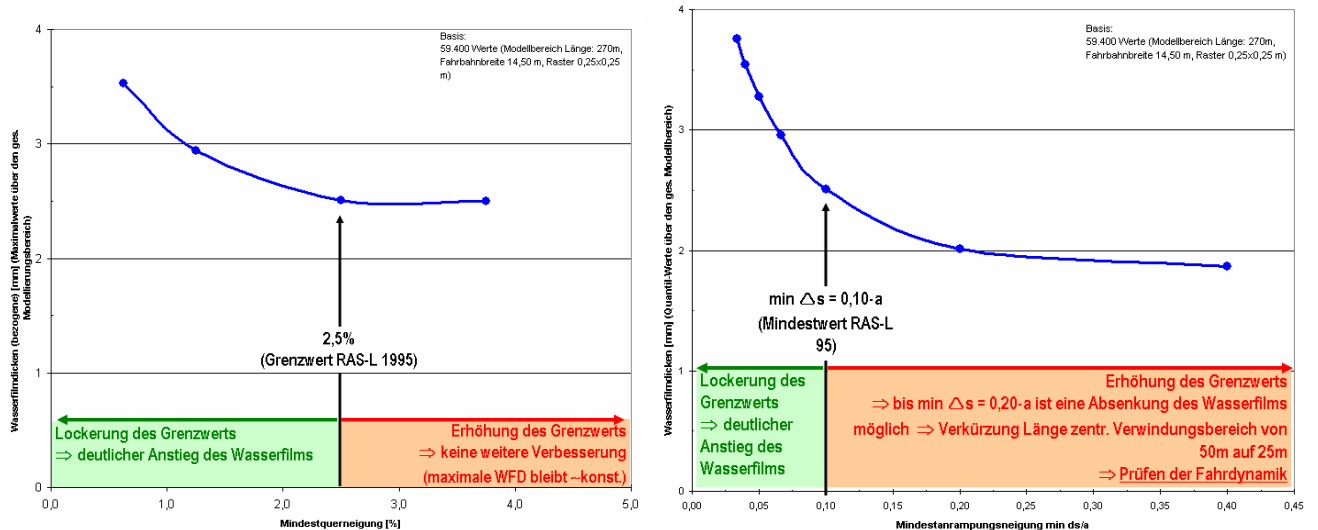


Abbildung 4-30: Höchste Wasserfilmdicken in einem Standard-Verwindungsbereich in Abhängigkeit von der Mindestquerneigung (links) und von der Mindestanrampungsneigung (rechts)

Bei einer Variation der Mindestanrampungsneigung zeigte sich eine Verbesserung bei einer Erhöhung des Grenzwerts bis zu ca. $\min \Delta s = 0,2 \cdot a$ (RESSEL/HERRMANN, 2006A)

Eine Lockerung der Grenzwerte führte in beiden Fällen zu einem deutlichen Anstieg der Wasserfilmdicken.

Damit werden für die Alternative 1 (geteilte Verwindung) zwei Fälle untersucht:

1. $\min \Delta s = 0,1 \cdot a$ und $|\min q| = 2,5\%$
→ Länge des zentralen Verwindungsbereichs: 50 m
(Trassierung nach RAS-L-Vorgaben)
2. $\min \Delta s = 0,2 \cdot a$ und $|\min q| = 2,5\%$
→ Länge des zentralen Verwindungsbereichs: 25 m

Schwächere Werte als die Regelwerte nach RAS-L würden die Wasserfilmdicken nur unbegründet erhöhen, Grenzwertverletzungen brächten nur im oberen Fall 2 einen Gewinn.

Geteilte Verwindung mit $\min \Delta s = 0,1 \cdot a$

Nach Richtlinie ergibt sich die Länge des zentralen Verwindungsbereichs zu 50 m³⁰. Er wird derart in die Trassierung eingepasst, dass die Position des Querneigungswechsels unverändert bleibt. Das geänderte Querneigungsband und die sich hieraus ergebende Topologie sind in Abbildung 4-31 (resp. App. F.2) dargestellt.

³⁰ Hier ergibt sich die Länge zu 48,6 m (=23,6 m +25 m), da sich die Verwindung bei 170+290,05 nur bis $q = 2,36\%$ erstreckt.

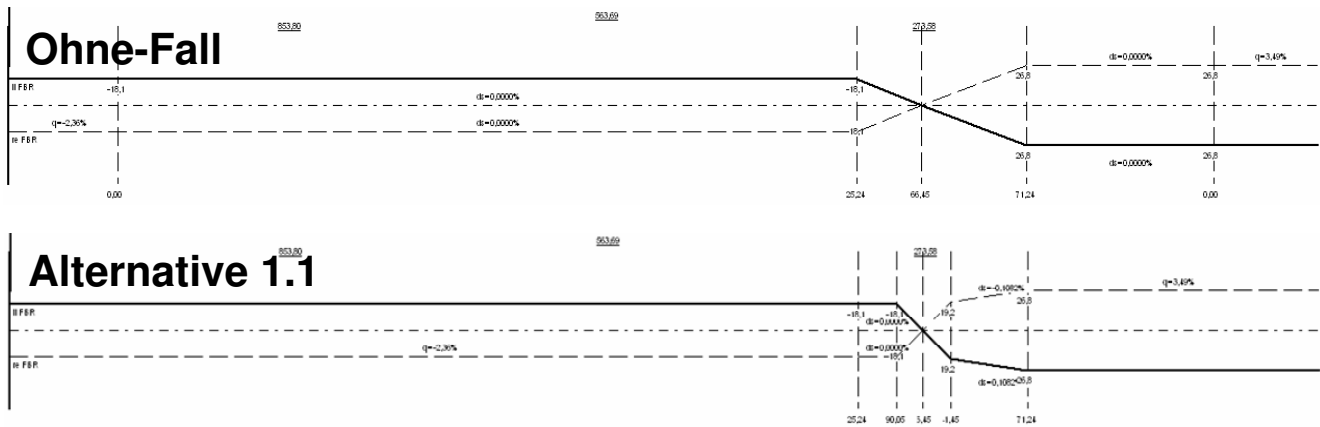


Abbildung 4-31: Querneigungsbänder von Ohne-Fall und Alternative 1.1 (geteilte Verwindung mit $\min \Delta s = 0,10 \cdot a$)

Wie die Modellierungsergebnisse zeigen (App. F.2), ergibt sich eine sehr großflächige Verbesserung im gesamten Verwindungsbereich. Die größte Differenz der Abminderungen befindet sich bei ca. km 170+300 am rechten Fahrbahnrand. Dies ist die Stelle, an der die längste Falllinie endet. Ihre Länge beträgt nunmehr 60,54 m anstatt, wie im Ohne-Fall 93,11 m. Die Aquaplaning-Geschwindigkeit steigt von 85,6 km/h (für $n = 1$) im Ohne-Fall auf 91,4 km/h an. Die Länge der längsten Falllinie bleibt mit 60,5 m deutlich unter der im Ohne-Fall mit 93,1 m. Wie aus App. F.5 zu sehen ist, ergibt sich eine Abminderung gegenüber dem Ohne-Fall für alle Wasserfilmdicken-Klassen. Im Wertebereich $WFD \leq 1$ mm befinden sich bei der geteilten Verwindung knapp 4% mehr Punkte als im Ohne-Fall. Während im Ohne-Fall immer noch 0,25% der Punkte über $WFD = 4,0$ mm liegen, sind in Variante 1.1 fast 100% aller Punkte unter dieser Schwelle.

Wie der Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren der Fahrzeuge zeigt (s. Abbildung 4-32 bzw. App. F.2c), gibt es direkt im Querneigungswechsel einen kurzen Ausschlag aller 6 Kurvenverläufe nach unten. Dieser ist aber relativ kurz, vor allem im Vergleich zu den Wirkungsstrecken im Ohne-Fall. Dies lässt, unabhängig von betragsmäßigen Betrachtungen, wie z.B. bei den Kriterien $B = \Delta w^k$ oder $B = \min V_{aq}$, vermuten, dass sich ein hier aufschwimmendes Fahrzeug aus dem Bereich entfernen kann, noch bevor ein hazardöser Zustand eintritt.

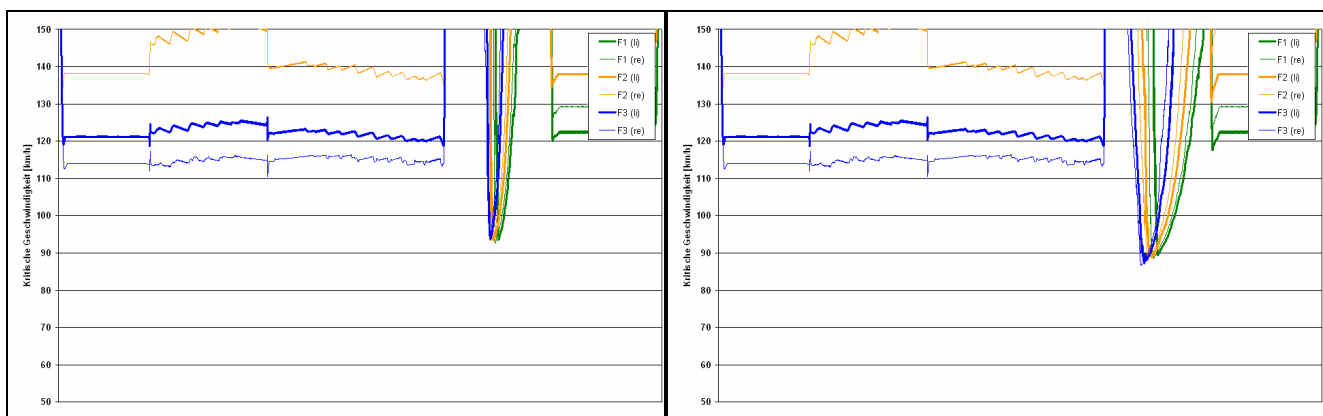


Abbildung 4-32: Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Fahrspuren, $t = 1,60$ mm) für $n = 1$, geteilte Verwindung (links: Alternative 1.1; rechts: Ohne-Fall)

Geteilte Verwindung mit $\min \Delta s = 0,2 \cdot a$

Dieser Fall basiert, wie oben erläutert, auf den Erkenntnissen aus RESSEL/HERRMANN (2006A); er widerspricht gängigen Trassierungsvorgaben, da die Verwindung von $q = -2,5\%$ auf $+2,5\%$ auf nur 25 m, anstatt 50 m Länge erfolgt, was eine fahrdynamische Verschlechterung mit sich bringt. Wie die fahrdynamischen und entwässerungstechnischen Auswirkungen in gegenseitiger Abwägung zu bewerten sind, kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Dies kann nur auf Basis von Fahrversuchen in breitem Umfang erfolgen.

Das Querneigungsband mit dem auf 25 m^{31} verkürzten zentrischen Verwindungsbereich ergibt sich wie in Abbildung 4-33 (resp. App. F.3) dargestellt.

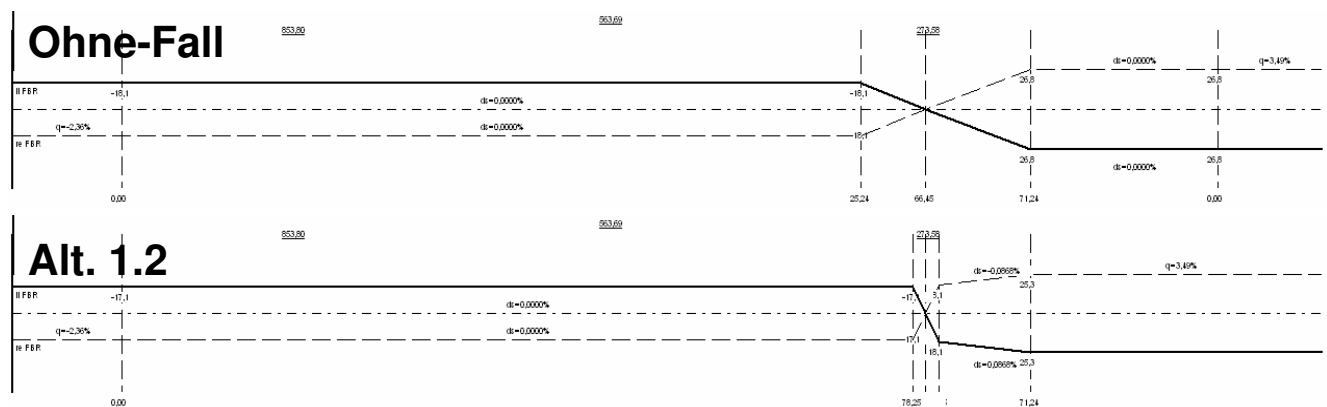


Abbildung 4-33: Querneigungsbander von Ohne-Fall und Alternative 1.2 (geteilte Verwindung mit $\min \Delta s = 0,20 \cdot a$)

Die Trassierung mit einem noch kürzeren zentrischen Verwindungsbereich bewirkt eine deutliche Abnahme der Falllinienlänge. So ergibt sich bspw. die Länge der längsten Falllinie zu 48,9 m anstatt 60,5 m wie beim 50 m langen zentrischen Verwindungsbereich und anstatt 93,1 m wie im Ohnefall.

Ein Vergleich der Wasserfilmdicken-Summenhäufigkeitslinie (s. App. F.5) mit der des Ohne-Falls zeigt, dass sich – ähnlich wie bei Variante 1.1 – die Abminderung über alle Bereiche zieht. Im Bereich $\text{WFD} \leq 1,00 \text{ mm}$ sind z.B. 5% mehr Punkte als im Ohne-Fall. Wie bei Variante 1.1 sind auch fast 100% aller Punkte unterhalb von 4 mm WFD.

Während nun die betragsmäßige Verteilung der Wasserfilmdicken der von Variante 1.1 sehr ähnlich ist, zeigt die Verteilung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren der Fahrzeuge erst deutlicher den Unterschied zwischen den beiden Varianten (s. Abbildung 4-34). Der Ausschlag nach unten ist demnach nicht nur betragsmäßig weniger ausgeprägt als bei Variante 1.1, sondern vor allem ist er noch kürzer, was wiederum die Einwirkungslänge beeinflusst.

³¹ Hier ergibt sich die Länge zu 24,3 m (=11,8 m +12,5 m), da sich die Verwindung bei 170+278,25 nur bis $q = 2,36\%$ erstreckt.

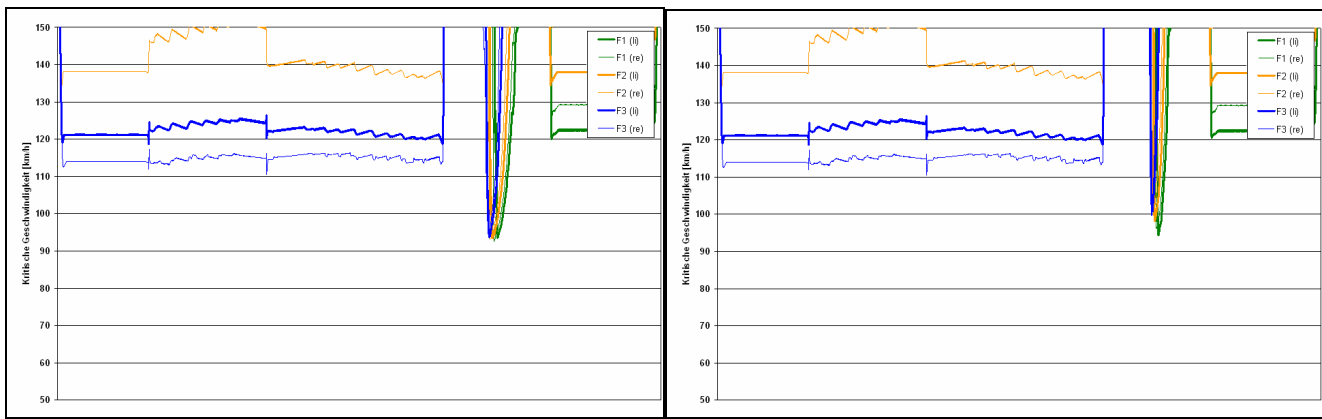


Abbildung 4-34: Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Fahrspuren, $t = 1,60 \text{ mm}$ für $n = 1$, geteilte Verwindung (links: Alternative 1.1; rechts: Alternative 1.2)

4.6.3 Alternative 2: Schrägverwindung

Als weitere Möglichkeit zur Vermeidung abflussschwacher Zonen im Bereich von $+ \min q$ durch 0 bis $- \min q$ gibt die Entwurfsrichtlinie RAS-L (FGSV, 1995) die Schrägverwindung an. Ungeachtet der mit der Schrägverwindung verbundenen Nachteile, z.B. der bautechnisch aufwändigen Herstellung oder der fahrdynamischen Schwachstellen (Ruck beim Überfahren des wandernden Grates) (s. z.B. GNADLER, 1980), wird diese Möglichkeit als zweite Lösungsalternative untersucht.

Nach RAS-L beträgt die Länge der Schrägverwindung L_V aus fahrdynamischen Gründen:

$$L_V = 0,1 \cdot B \cdot V_e \quad (4-3)$$

mit:

- L_V = Länge der Schrägverwindungsstrecke, m
- B = Fahrbahnbreite, m
- V_e = Entwurfsgeschwindigkeit, km/h

Mit $B = 15,35 \text{ m}$ und $V_e = 120 \text{ km/h}$ (Annahme) ergibt sich damit L_V zu $184,20 \text{ m}^{32}$. Die Schrägverwindung wird dabei derart in die Trassierung eingepasst, dass die Position des Querneigungsübergangs unverändert bleibt. Das geänderte Querneigungsband und die sich hieraus ergebende Topologie sind in Abbildung 4-35 (resp. App. F.4) dargestellt.

³² Hier ergibt sich die Länge zu $176,83 \text{ m}$ ($=84,73 \text{ m} + 92,10 \text{ m}$), da sich die Verwindung bei $170+351,18$ nur bis $q = 2,36\%$ erstreckt.

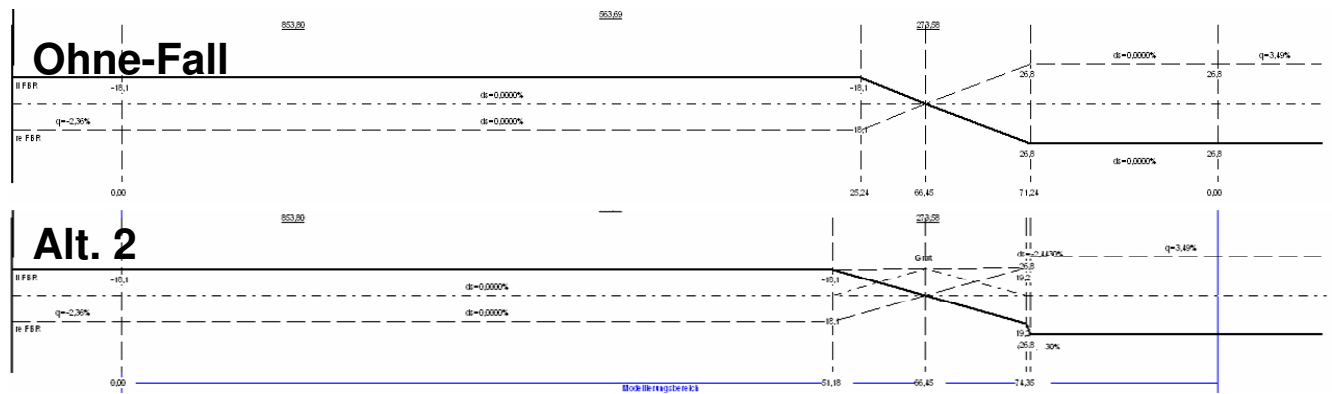


Abbildung 4-35: Querneigungsbänder von Ohne-Fall und Alternative 2 (Schrägverwindung)

Wie die Summenhäufigkeitsverteilung der interpolierten Wasserfilmdicken (App. F.5) zeigt, gibt es eine deutliche Verschiebung der Bandbreite. 36,7% aller Punkte befinden sich unter $WFD = 0,5\%$, anstatt wie im Ohne-Fall nur 27,9%. Bei der Schrägverwindung sind bereits bei $WFD \leq 1,5$ mm 99,93% aller Punkte enthalten, d.h. nur 0,07% der Punkte haben höhere Wasserfilmdicken, während es im Ohne-Fall über 5% sind.

Auch die Betrachtung der Verteilungen der Wasserfilmdicken und Aquaplaning-Geschwindigkeiten erweist, dass es im Schrägverwindungsbereich durch den wandernden Grat quasi nicht mehr zu Aquaplaning kommen kann und wenn, dann ist die Gefahr außerhalb des Verwindungsbereichs höher (s. Abbildung 4-36 resp. App. F.4).

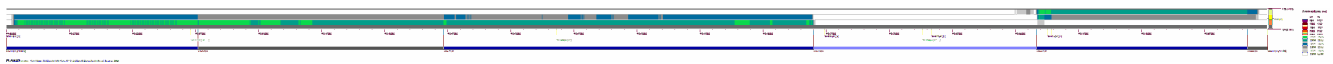


Abbildung 4-36: Verteilung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten (fahrstreifenbezogen, $t = 1,60$ mm) für $n = 1$, Schrägverwindung (Alternative 2)

Der Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren zeigt dies noch deutlicher (App. F.4c). Hier müsste nun eher die durch die Richtung der Querneigung bedingte Änderung der Aquaplaning-Geschwindigkeit Sorgen bereiten, als die durch den Verwindungsbereich. So gibt es für Fahrzeug 1 eine Abnahme von ca. 120 km/h vor der Einfahrt in den Verwindungsbereich auf ca. 90 km/h nach dem Passieren des Verwindungsbereichs. Im Hinblick auf Imponderabilitäts-Betrachtungen dürfte dies ein nicht zu vernachlässigender Aspekt sein.

4.6.4 Alternative 3: Veränderte Gradientenlage im Querschnitt

Im Ohne-Fall wurde die Gradientenlage in Fahrbahnmitte angenommen. Als Alternative 3 soll untersucht werden, wie sich eine Verschiebung der Gradienten auswirkt und zwar an den linken Rand (Drehachsenanordnung $DAA = 0,00$) und an den rechten Fahrbahnrand ($DAA = 1,00$). Die nicht-geteilte Verwindung wird beibehalten wie im Ohne-Fall.

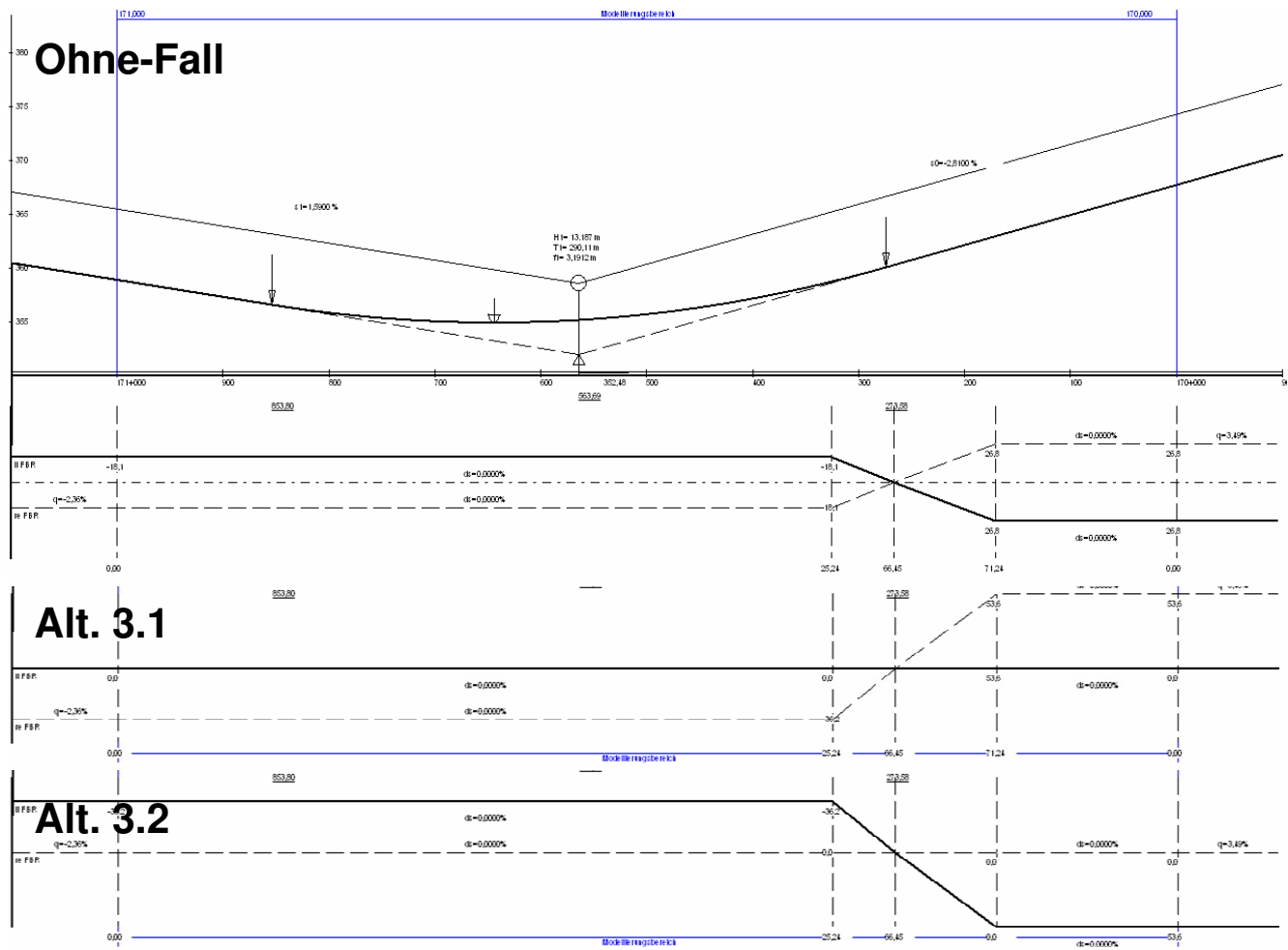


Abbildung 4-37: Höhenplan und Querneigungsband von Ohne-Fall und Alternative 3 (Veränderte Gradientenlage im Querschnitt), DAA = 0,00 (oberes Bild; DAA = 1,00 (unteres Bild)

Wie Abbildung 4-38 (resp. App. F.6a und App. F.7a) zeigt, wirkt sich diese Maßnahme nur sehr verhalten aus. In manchen Bereichen werden die Wasserfilmdicken schwach abgemindert, in anderen dafür leicht angehoben. Diese Bereiche sind für die beiden Fällen DAA = 0,00 und DA = 1,00 annähernd entgegengesetzt.

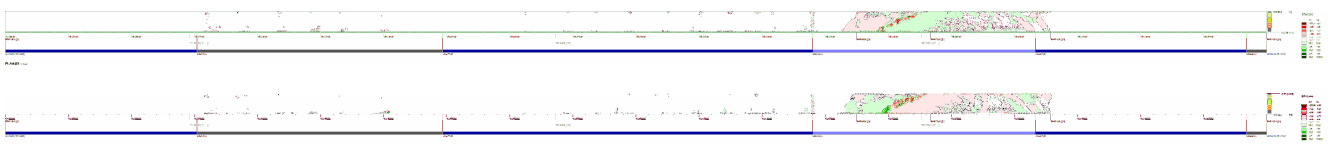


Abbildung 4-38: Differenzen der Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$) für DAA = 0,00 (oberes Bild) bzw. DAA = 1,00 unteres Bild

Die Längen der längsten Falllinie betragen für Alt. 3.1 (Gradiente linker FBR) 96,33 m und für Alt. 3.2 88,72 m (gegenüber 93,11 m im Ohne-Fall).

Die Summenhäufigkeitslinien der Wasserfilmdicken (vgl. App. F.6a und App. F.7a) weisen in der Summe fast keine Unterschiede zum Ohne-Fall auf.

Die Bewertung nach der Effektivität $B = \sum \Delta w_i^k$ zeichnet für beide Maßnahmen äußerst schwache Änderungen aus (positiver und z.T. sogar negativer Art). Auf dem insgesamt niedrigem Niveau betrachtet, ergibt sich für DAA = 1,00 die bessere Leistung als DA = 0,00 (je nach k). Dies entspricht den Effekten aus den Falllinienlängen.

Die Minimalwerte der Aquaplaning-Geschwindigkeiten nehmen geringfügig zu für $DA = 0,00$ (\rightarrow Verbesserung) und ebenso geringfügig ab für $DA = 1,00$ (\rightarrow Verschlechterung). Somit sind die beiden Bewertungsgrößen in ihrer Wirkungsrichtung entgegengesetzt.

Diese Maßnahme ist für eine Aquaplaning-Optimierung des untersuchten Anwendungsbeispiels nicht geeignet.

4.6.5 Alternative 4: Kombination „Veränderte Gradientenlage“ und „geteilte Verwindung (zVWB = 50m)“

Nun wird die veränderte Gradientenlage aus Alternative 3 (Kap. 4.6.4) mit der geteilten Verwindung mit einem 50 m langen zentrischen Verwindungsbereich wie in Alternative 1.1 (Kap. 4.6.2) kombiniert.

Die Effekte, die nun auftreten, sind fast ausschließlich auf die geteilte Verwindung zurückzuführen. Eine Gradientenlage am linken Fahrbahnrand ($DAA = 0,00$) führt zu einer Abschwächung der Effektivität $B = \sum \Delta w_i^k$ gegenüber Alternative 1.1. Eine Gradientenlage am rechten Fahrbahnrand ($DAA = 1,00$) führt zu einer Verbesserung gegenüber Alternative 1.1.

Dabei ist die längste Falllinie in Alternative 4.1 (linker FBR) mit 67,79 m deutlich länger als in Alternative 4.2 (rechter FBR) mit 56,80 m (zum Vergleich: im Ohne-Fall: 93,11 m und bei der geteilten Verwindung mit Drehachsenlage in Fahrbahnmitte (Variante 1.1) 60,54 m. Dies entspricht damit der Effektivitätsbewertung (längere Falllinie \rightarrow Verschlechterung, kürzere Falllinie \rightarrow Verbesserung) und auch der Falllinienlängen in Alternative 3.

Die Minimalwerte der Aquaplaning-Geschwindigkeiten nehmen bei beiden Kombinationen 4.1 und 4.2 gegenüber Alternative 1.1, der geteilten Verwindung mit $DAA = 0,500$, ab. Beide Bewertungsgrößen, $B = \sum \Delta w^k$ und $\min V_{aq}$ ergeben also ein widersprüchliches Bild.

Wie bereits in Kap. 4.6.4, kann auch hier festgehalten werden, dass eine veränderte Gradientenlage, auch in Kombination mit anderen Veränderungen, keine Aquaplaning-Lösung darstellt.

4.6.6 Alternative 5: Einseitige Querneigung zur Kurvenaußenseite

Die Querneigung zur Kurvenaußenseite ist zwar aus fahrdynamischen Gründen in der Regel zu vermeiden, im Einzelfall kann sie jedoch zur Vermeidung von abflussschwachen Zonen zugelassen werden. Nach RAS-L beträgt sie für Fahrbahnen aus Asphalt 2,5%; für Fahrbahnen aus Zementbeton ist 2,0% ausreichend (FGSV, 1995).

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel sind verschiedene Fahrbahnbeläge eingebaut, von denen der Asphalt für die Wahl einer einseitigen Querneigung zur Kurvenaußenseite maßgebend wäre. Da die kleinere der beiden gemessenen Querneigungen im Ohne-Fall bei 2,36% liegt (vgl. Kap. 2.2.2), wird dieser Betrag aus Vergleichbarkeitsgründen hier auch verwendet.

Die Querneigung zur Kurvenaußenseite ist, nach der Schrägverwindung, die stärkste Lösung von allen Lösungsvarianten. Dies betrifft ungeschränkt die Bewertungsgrößen $B = \sum \Delta wfd^k$ der Effektivität, wie auch die untersten Werte der Aquaplaning-Geschwindigkeiten.

Im Prinzip ergeben sich für beide Varianten ähnliche Effektivitäten (s. Abbildung 4-39 bzw. App. F.10 für linker FBR oben, App. F.11 für rechter FBR oben). Die Berücksichtigung der Fahrbahneinteilung (Standstreifen rechts) führt jedoch dazu, dass diejenige Variante besser ist, bei der die größten Wasserfilmdicken am rechten Rand auftreten (linker Fahrbandrand oben). Im Längsschnitt (x-Achse) sind bei der einseitigen Querneigung nur noch Textur und Gradiente für die Maximalposition der Wasserfilmdicken maßgebend. Diese befindet sich nun nicht mehr im Verwindungsbereich sondern in der Nähe des Wannentiefpunkts.

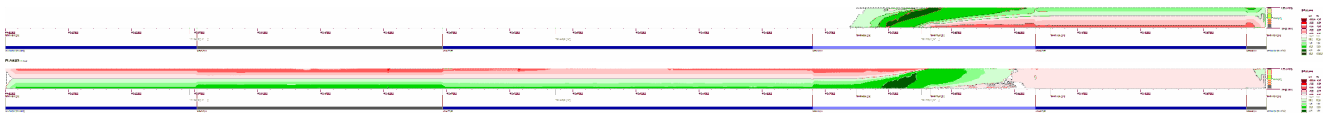


Abbildung 4-39: Differenzen der Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$) für Querneigung zur Kurvenaußenseite. Li. FBR oben (oberes Bild) bzw. re. FBR oben (unteres Bild).

Die Variante 5, einseitige Querneigung, wurde nicht als praxisrelevantes Sanierungskonzept gewählt, sondern um die theoretischen Effekte aufzuzeigen.

Um weitergehend abschätzen zu können, ob die Variante grundsätzlich durchführbar ist oder Sinn macht, müssten die Anschlussstrassierungen über den 1 km langen Modellierungsbereich hinaus ermittelt werden. Selbst bei prinzipieller Machbarkeit wird der sich ergebende Aufwand enorm sein.

Im Vergleich mit dem Ohne-Fall zeigt sich, dass die Auswirkungen der Wanne auf Wasserverteilungen und Aquaplaning-Geschwindigkeit gegenüber dem Verwindungsbereich vernachlässigbar sind (ausreichende Querneigung vorausgesetzt).

4.6.7 Weitere mögliche trassierungstechnische Maßnahmen

Die weiteren trassierungstechnischen Maßnahmen, die zur Verbesserung des Aquaplaning-Verhaltens führen könnten, sind:

Veränderung der Längsneigung im Verwindungsbereich

Im Verwindungsbereich des Beispiels BAB A 8 beträgt die Längsneigung auf 102,34 m Länge (von 170+273,58 bis 170+171,24) konstant 2,81%; auf 51,66 m Länge wird sie von der Wanne überlagert, die mit $H = 13.187$ m (rechnerisch) ausgerundet wurde. Nach:

$$s(x) = s_1 + \frac{x}{H} \cdot 100 \quad (4-4)$$

nimmt die Längsneigung (als Ableitung des als quadratischer Parabel parametrisierten Ausrundungsbogen) linear ab. Hier also um 0,39% auf $s = 2,42\%$. Nach RAS-L soll die

Längsneigung (in Fahrbahnmitte) mindestens 0,7% höher sein als die Anrampungsneigung (FGSV, 1995):

$$s - \Delta s \geq 0,7\% \quad (4-5)$$

Mit den rechnerischen Anrampungsneigungen $\Delta s_0 = 0,2813\%$ und $\Delta s_1 = 0,3081\%$ ergibt sich somit $s \geq 1\%$. Diese Forderung ist bei weitem eingehalten.

Eine Abminderung der Längsneigung wäre kontraproduktiv, sie würde mit niedrigeren Sohlneigungen (Schrägneigungen) den Wasserabfluss verlangsamen und damit die Wasserfilmdicken erhöhen. Eine Zunahme würde das Gegenteil bewirken, gleichzeitig aber die Falllinien „auseinanderziehen“ und somit die Falllinienlängen und vor allem die Einflussbereiche vergrößern.

Eine Veränderung der Gradienten ist zudem bei einer vorhandenen Trasse schlichtweg unmöglich.

Um die Effekte dennoch aufzuzeigen, wird eine hypothetische Betrachtung in zwei zusätzlichen Alternativen 6.1 und 6.2 durchgeführt. Zum Einen wird, bei sonst gleichen Randbedingungen, die Längsneigung um 1,80% gesenkt (auf den nach RAS-L möglichen Mindestwert 1,00%) (App. F.13). Im anderen Fall wird die Längsneigung um den gleichen Betrag 1,80% erhöht (auf $s = 4,60\%$) (App. F.12) (zum Vergleich: max $s = 4,50\%$ bei $V_e = 100 \text{ km/h}$, Kat. A, RAS-L (FGSV, 1995)).

Die ohnehin vernachlässigbaren Effekte des Anteils der Wannenausrundung wurde dabei vernachlässigt ($s = \text{konst.}$).

Abbildung 4-40 (resp. F.12a und F.13a) zeigt die Wasserfilmdicken-Differenzenverteilungen für die beiden Fälle auf. Die Zu- und Abnahmen sind fast invers zueinander. Die Bereiche mit konstanter Querneigung (außerhalb des Verwindungsbereichs) nehmen bei $s = -4,60\%$ zu, was an den längeren Falllinien liegt (durch höhere Schrägneigung). Aus demselben Grund nehmen sie in der unteren Darstellung zu. Im Verwindungsbereich gibt es einen Bereich (in der Nähe des Querneigungswechsels), in dem die Differenzen betragsmäßig am höchsten sind. Maximale Zu- und Abnahmen liegen direkt nebeneinander.

Angesichts der Zu- und Abnahmen in jedem Fall lässt sich aus diesen Abbildungen kein eindeutiges Bild ableiten.

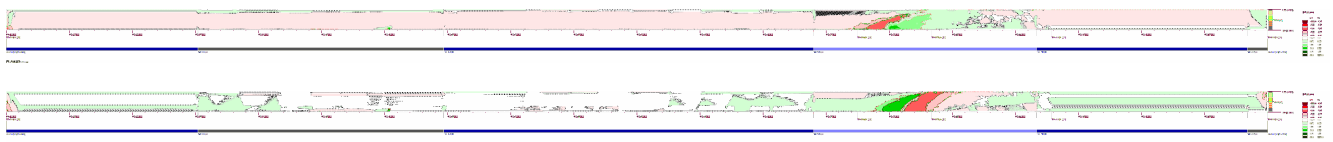


Abbildung 4-40: Differenzen der Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$) für Änderung der Längsneigung. Anhebung auf $s = -4,60\%$ (oberes Bild) bzw. Absenkung auf $s = -1,00\%$ (unteres Bild).

Abbildung 4-41 zeigt dazu die Verläufe der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Radspuren. Hieraus lässt sich deutlicher erkennen, wie sich die Längsneigungs-Änderung auswirkt. Bei hoher Längsneigung ($s = -4,60\%$) ziehen sich die Falllinien mehr in die Länge. Dadurch nimmt auch der Bereich hoher Wasserfilmdicken flächenmäßig zu. Damit nehmen

die Durchfahrungsängen für die Fahrzeuge zu (\rightarrow Verschlechterung). Gleichzeitig nehmen jedoch die minimalen Aquaplaning-Geschwindigkeiten leicht zu (s. auch Abbildung 4-42), was aus der Zunahme der Sohlneigung insgesamt zu erklären ist (\rightarrow Verbesserung).

Die Abbildung 4-41 (Mitte) ($s = -1,00\%$) zeigt genau den gegenteiligen Effekt zum Ohne-Fall mit denselben Begründungen.

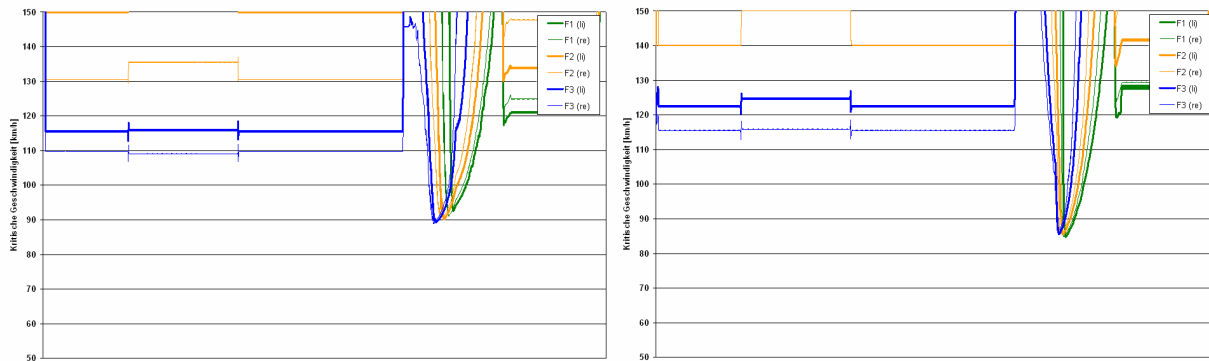


Abbildung 4-41: Verlauf der Aquaplaning-Geschwindigkeiten unter den Fahrspuren, $t = 1,60 \text{ mm}$ für $n = 1$, für Änderung der Längsneigung. (links: Anhebung auf $s = -4,60\%$; rechts; Absenkung auf $s = -1,00\%$)

Verschiebung des Verwindungsnullpunkts

Zur Berücksichtigung der Entwässerung wird in der RAS-L (FGSV, 1995) eine Verschiebung des Querneigungsnullpunkts um die Länge $L = 0,1 \cdot A$ zugelassen (A : Klotoidenparameter), falls anderweitig keine ausreichende Längsneigung sichergestellt werden kann.

Dies ist in besagter Situation ein recht effektives Werkzeug, im vorliegenden Beispiel kann sich die Situation dadurch nur verschlechtern (Verschiebung nach links in Richtung Wannentiefpunkt \rightarrow Abnahme der Längsneigung). Eine Verschiebung aus dem Wannenausrundungsbereich heraus um 51,66 m nach rechts würde, wenn überhaupt, so marginale Verbesserungen bringen, dass dieser Fall nicht untersucht wird.

4.6.8 Zusammenfassung der Lösungsvarianten „Änderung des Querneigungsbands“

In der Maßnahmengruppe 4, „Änderung des Querneigungsbands“, wurden 6 grundsätzlich unterschiedliche Alternativen mit teilweise 2 ähnlichen Untervarianten untersucht. Die Bewertung wurde nach der fahrstreifenbezogenen, minimalen Aquaplaning-Geschwindigkeit (Abbildung 4-42), bzw. nach den Bewertungsgrößen der Effektivität $B = \sum \Delta w f d_i^1$ (Abbildung 4-43) und $B = \sum \Delta V a q_i^1$ (Abbildung 4-44) durchgeführt.

Die geteilte Verwindung (Alternative 1) ist heute der Standardfall bei der Neuplanung von Straßen. Üblicherweise ist der zentrische Bereich 50 m lang; was eine Kompromisslösung darstellt aus den Erfordernissen der Straßenentwässerung und der Fahrdynamik. So

schneidet die Sonderlösung mit 25 m anstatt 50 m Länge erwartungsgemäß in den untersuchten Bereichen besser ab. Die fahrdynamischen Nachteile sind dagegen abzuwägen.

Am besten, was die Effektivitäts-Bewertungen angeht, und am zweitbesten nach der Einseitneigung von links nach rechts (Alt. 5.2), stellt sich die Schrägverwindung (Alt. 2) dar. Leider hat auch dieser Typ fahrdynamische (und darüber hinaus besonders schwerwiegende fertigungstechnische) Nachteile.

Die veränderte Gradientenlage (Alternative 3) bringt marginale Verbesserungen an manchen Stellen, die aber durch ebenso marginale Verschlechterungen an anderer Stelle kompensiert werden. Unter Aquaplaning-Gesichtspunkten spielt die Gradientenlage wohl keine Rolle.

Die Verschiebung der Gradienten im Querschnitt in Kombination mit einer geteilten Verwindung (hier mit $L_{zVBW} = 50$ m) (Alternative 4) bewirkt eine (deutliche) Erhöhung der Effektivität der Effektivitäts – Bewertungen, dabei aber eine (deutliche) Abminderung der $B_{\min} V_{aq}$ -Bewertungen. Auf Grund der gegenläufigen Effekte kann keine Empfehlung ausgesprochen werden.

Als Alternative 5 wurde die Querneigung zur Kurvenaußenseite (konstant $q = 2,36\%$) untersucht. Charakteristisch bei der Einseitquerneigung fällt auf, dass die drei Fahrstreifen sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Der Fahrstreifen, der am weitesten vom angehobenen Fahrbahnrand entfernt ist, hat demnach die niedrigste Aquaplaning-Geschwindigkeit, da die Abflusslänge hierhin am höchsten ist. Der Fahrstreifen, der zu Beginn des Fließwegs liegt, hat ein deutlich geringeres Aquaplaning-Risiko.

Die Effekte dieser Alternative sind äußerst stark. Bei den Effektivitäts-Bewertungen liegt die Alternative 5.1 an zweiter Position nach der Schrägverwindung, bei der $\min V_{aq}$ -Bewertung liegt sie sogar an erster Stelle.

Die Alternative 5.2 liegt bei den Effektivitäts-Bewertungen weiter hinten, nimmt jedoch immer noch eine gute Position unter den Maßnahmen ein.

Dies spricht, beim vorhandenen Fahrbahnquerschnitt für die Alternative 5.1, da die Stellen höchster Wasserfilmdicken im Standstreifen liegen. Im umgekehrten Fall (Alternative 5.2) liegen die Stellen höchster Wasserfilmdicken im linken Fahrstreifen; kritischerweise also in dem Fahrstreifen, in dem die höchsten Geschwindigkeiten gefahren werden. Wie Abbildung 4-42 zeigt, ist dies der niedrigste Wert aller ermittelten $\min V_{aq}$ -Werte.

Die Querneigung zur Kurvenaußenseite kann als Alternative 5.1 empfohlen werden, wenn die nachteilig wirkenden fahrdynamischen Effekte in Kauf genommen werden können.

Die Untersuchung der Variation der Längsneigung der Gradienten (Alt. 6) ergibt entgegengesetzt gerichtete Wirkungen bei den einzelnen Indikatoren. Einer Verbesserung der $\min V_{aq}$ -Bewertung steht eine Verschlechterung bei den Effektivitätsbewertungen gegenüber (s. Alt. 6.1, $s = -4,60\%$). Der umgekehrte Effekt ist bei Alt. 6.2 ($s = -1,00\%$) festzustellen.

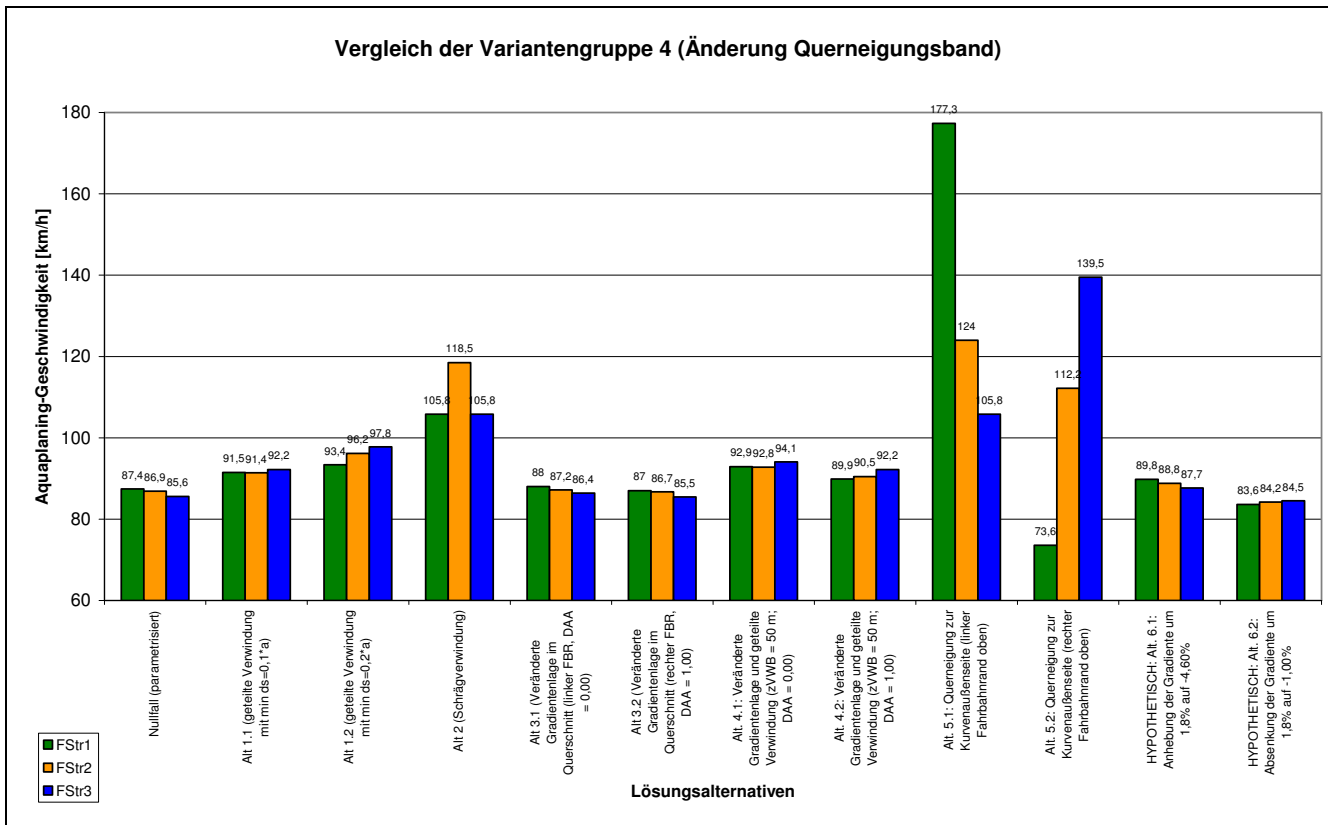


Abbildung 4-42: Bewertung der Varianten der Maßnahmengruppe 4 „Änderung des Querneigungsbands“ anhand der Bewertungsgröße „fahrstreifenbezogene Mindest-Aquaplaning-Geschwindigkeit“

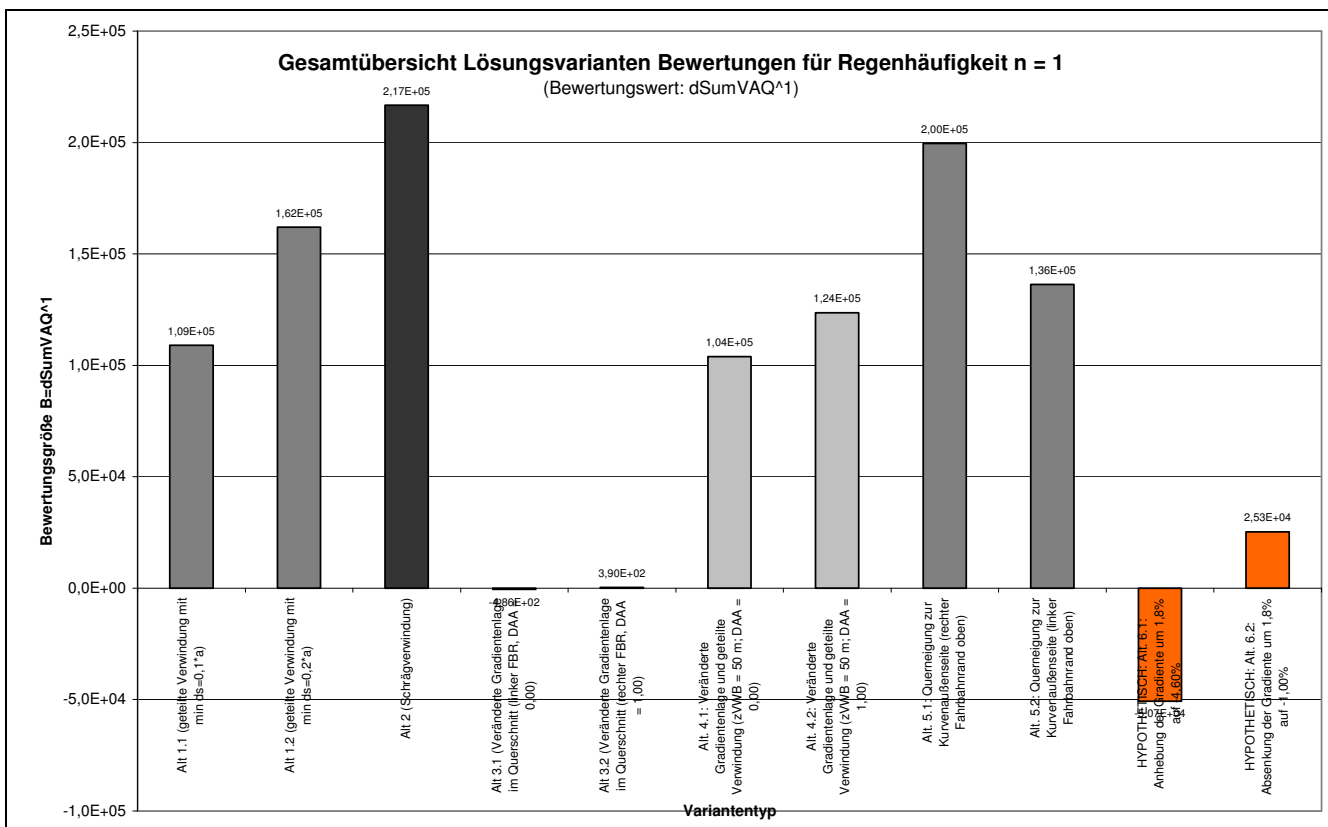


Abbildung 4-43: Bewertung der Varianten der Maßnahmengruppe 4 „Änderung des Querneigungsbands“ anhand der Bewertungsgröße $B = \Delta V_{aq}^1$

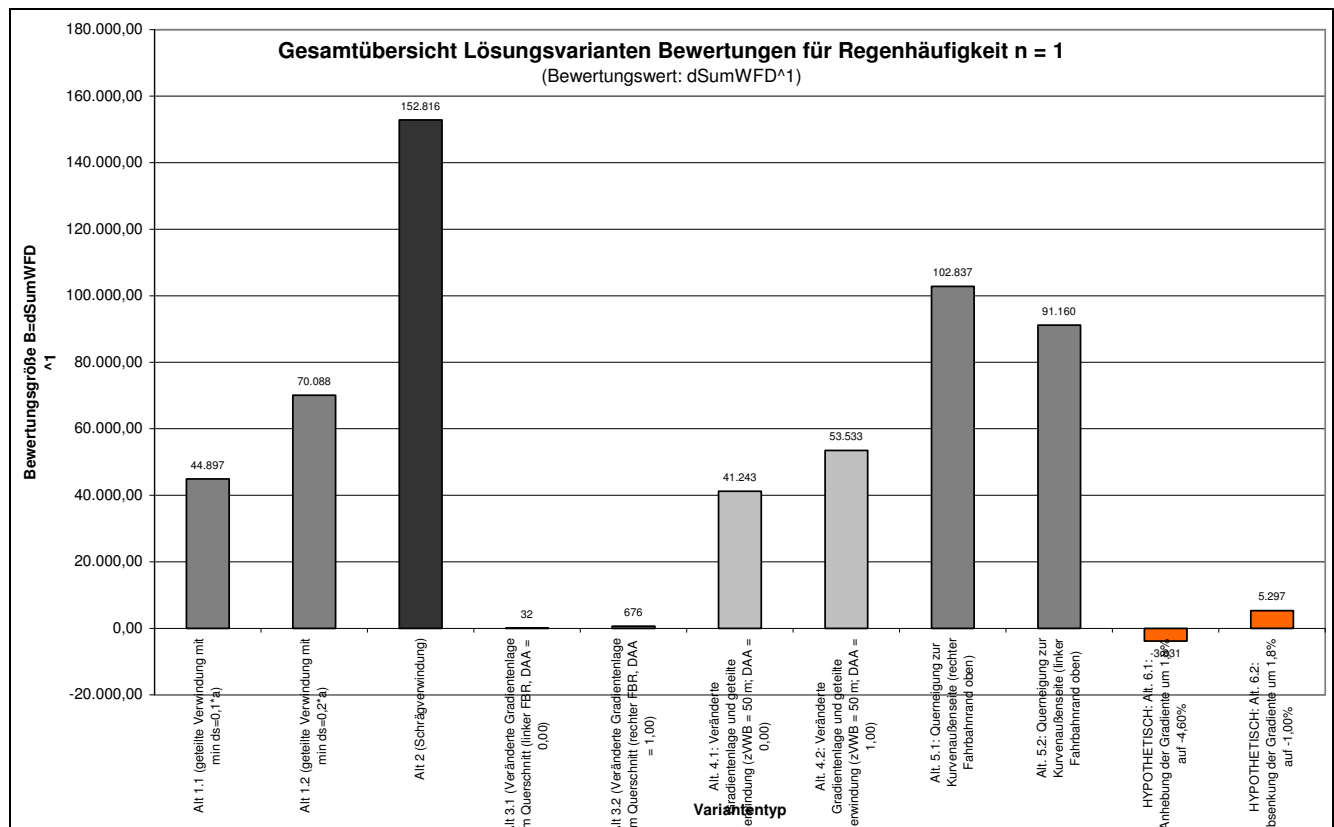


Abbildung 4-44: Bewertung der Varianten der Maßnahmengruppe 4 „Änderung des Querneigungsbands“ anhand der Bewertungsgröße $B=\Delta wfd^1$

Die effektivsten Maßnahmen Alternative 2 und Alternative 5 haben als gemeinsamen Nachteil die fahrdynamisch ungünstigen Eigenschaften. Bei der Schrägverwindung (Alt. 2) kommt noch der sehr aufwändige Herstellungsprozess dazu. Für die geteilte Verwindung nach Alternative 1.2 sind die fahrdynamischen Auswirkungen noch nicht vollständig abzusehen. Sollte ein auf 25 m verkürzter zentrischer Verwindungsbereich fahrdynamisch vertretbar sein, so kann die Alt. 1.2 empfohlen werden. Ansonsten ist die geteilte Verwindung mit einem 50 m langen, zentrischen Verwindungsbereich (Alt. 1.1) die vorteilhafteste Maßnahme, die ohne fahrdynamische Schwachstellen zu verwirklichen wäre.

4.7 Zusammenfassung und Vergleich aller vier Lösungsvorschläge

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit wurden vier verschiedene Maßnahmen untersucht:

1. Vorgabe einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei Nässe,
2. Einbau von Entwässerungsrinnen,
3. Grooving (Rillen fräsen),
4. Änderung des Querneigungsbands.

Für jede Maßnahme wurden verschiedene Varianten untersucht und optimiert.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Maßnahmen wurde über die Bewertungsgröße B durchgeführt. Wie Abbildung 4-45 für $n = 1$ und $B = \sum \Delta w_i^1$ zeigt, hat die Schrägverwindung (Alternative 2) die mit Abstand höchste Wirkung. Alle anderen Maßnahmen werden bei Relativvergleichen auf deren Bewertungsgröße bezogen (% v. Alt.2)

Wo eine Schrägverwindung vorgesehen wird, verschwindet die Aquaplaning-Gefahr fast völlig (Problemstellen verbleiben außerhalb des Verwindungsbereichs). Nichtsdestotrotz ist dieser Verwindungstypus wegen bautechnischer Herstellungsprobleme und der fahrdynamischen Schwächen umstritten und hat in der Praxis nur eine untergeordnete Bedeutung.

Auch die Unterteilung des Verwindungsbereichs als geteilte Verwindung (Alternative 1) zeigt eine vergleichsweise hohe Wirkung. Bei richtlinienkonformer Mindestanrampungsneigung (Alternative 1.1) ist die Wirkung mit 29,4% des bei Alternative 2 erzielbaren Ergebnisses niedriger als bei der Alternative 1.2 mit kürzerem zentrischen Verwindungsbereich ($\min \Delta s = 0,2 \cdot a$) und mit 45,9% des bei Alternative 2 erzielbaren Ergebnisses.

Die Entwässerung bei Querneigung zur Kurvenaußenseite (Alternative 5) entspricht derjenigen bei konstanter Schrägneigung (Nicht-Verwindungsstrecken). Dementsprechend sind die verzeichneten Verbesserungen sehr hoch. Wie bereits bei der Schrägverwindung müssen fahrdynamische Abstriche in Kauf genommen werden. Die Bewertung dieser Maßnahmenvarianten zeigt auch den generellen Unterschied zwischen Verwindungsbereich und übrigen Streckenabschnitten auf.

Weiterhin wurde die Veränderung der Gradientenlage im Querschnitt untersucht (Alternative 3) sowie deren Kombination mit einer RAS-L-konformen geteilten Verwindung (Alternative 1.1). Diese Maßnahme hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die Wasserfilmdickenverteilungen oder Aquaplaning-Performance. In Kombination mit Alternative 1.1 ist der fast ausschließliche Einfluss von Alternative 1.1 erkennbar.

Eine (hypothetische) Veränderung der Längsneigung im Verwindungsbereich (Alt. 6) bringt hinsichtlich der Effektivitätsparameter nur geringe Veränderungen. Mit einer Vergrößerung der Gradientensteigung (Alternative 6.1) einher geht die Vergrößerung des betroffenen Gebiets (längere Falllinien), gleichzeitig eine Abminderung der Maximalwerte durch höhere Sohlneigungen. Da beide Wirkungen entgegengesetzt zueinander gerichtet sind, heben sie sich annähernd auf.

In der Wirkung als nächstes folgen die Entwässerungsrinnen. Mit ca. 4 gleichzeitigen Rinnen darf ungefähr die gleiche Wirkung auf die Effektivität der Wasserfilmdicken-Abminderung erwartet werden wie bei einer geteilten Verwindung nach RAS-L 1995. Bei den $\sum \Delta V_i^k$ -Bewertungen ist jedoch die Wertung der trassierungstechnischen Lösungen höher. Hier kann auch mit 6 gleichzeitigen Rinnen nicht der Effekt der geteilten Verwindung erreicht werden (s. Abbildung 4-46).

Es zeigt sich nochmals, dass mit jeder zusätzlich gesetzten Rinne der Wirkungszuwachs abnimmt. Auf der anderen Seite bedeutet dies, dass bereits mit einer einzigen Entwässerungsrinne eine nicht zu vernachlässigende Wirkung erzielt werden kann.

Die Grooving-Maßnahmen sind sehr schwach in ihrer Auswirkung auf die Effektivität bei der Regenhäufigkeit $n = 1$. Dies liegt daran, dass dieses Regeneignis zu hoch angesetzt ist,

um Wirksamkeit von Grooving nachzuweisen. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, sprechen die Grooving-Maßnahmen vor allem bei Regenereignissen mit Häufigkeiten $n \geq 5$ gut an. Niederschläge geringerer Stärke, die aber groß genug sind, um dennoch, v.a. bei etwas höheren Fahrgeschwindigkeiten, Aquaplaning hervorrufen zu können, werden daher mit Grooving gut abgefangen. Für deutlich stärkere Regenfälle ($n \leq 1$) ist Grooving im vorliegenden Beispiel nicht ausreichend.

Zudem lässt sich erkennen, dass Grooving nicht nur positive Effekte hat, sondern dass durch die Zunahme der fiktiven Makrotextur auch der den Abfluss verlangsamende Sohlwiderstand und somit gleichzeitig die Wasserfilmdicke zunimmt.

Es zeigt sich, dass mit Zunahme des Exponenten k die kleinräumig wirksamen Maßnahmen mit insgesamt jedoch deutlichen Abminderungen der Einzelwerte (z.B. für $k = 9$ siehe Abbildung 4-48) an Bedeutung gewinnen. Die Bewertung mit $k = 0$ ergibt ein vollkommen verschiedenes Bild.

In diesem Falle wird jedoch nur die Anzahl der betroffenen Zellen (die Flächigkeit der Maßnahme) bewertet und nicht die Effektivität hinsichtlich der Abminderungsleistung. Im Vergleich zwischen $k = 1$ (Abbildung 4-47) und $k = 9$ (Abbildung 4-48) lassen sich keine gravierenden Unterschiede feststellen, sodass die höheren k -Bewertungen ($k > 2$) wohl eher zu einer Redundanz der Bewertungsgrößen führen, als zu einer Mehrinformation.

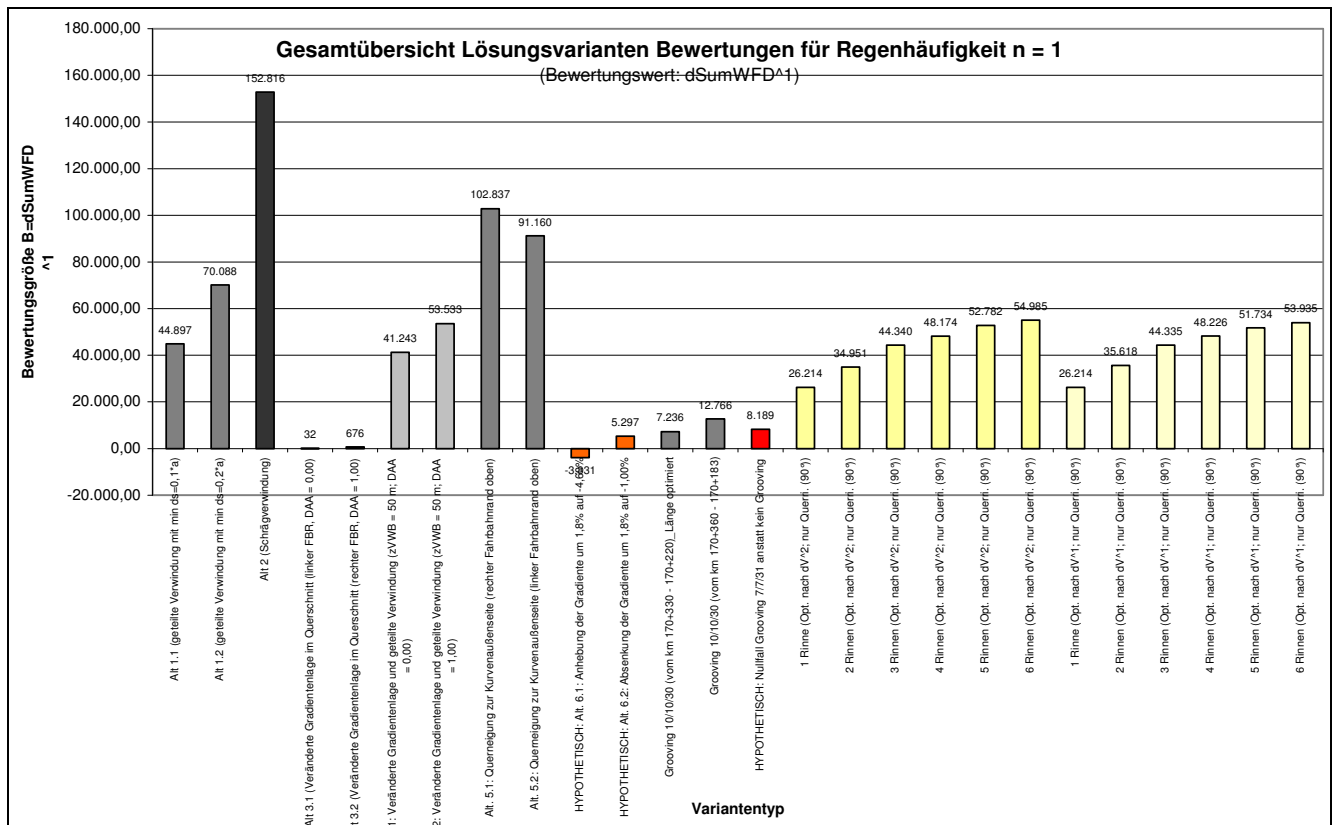


Abbildung 4-45: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1; \sum \Delta w_i^1$

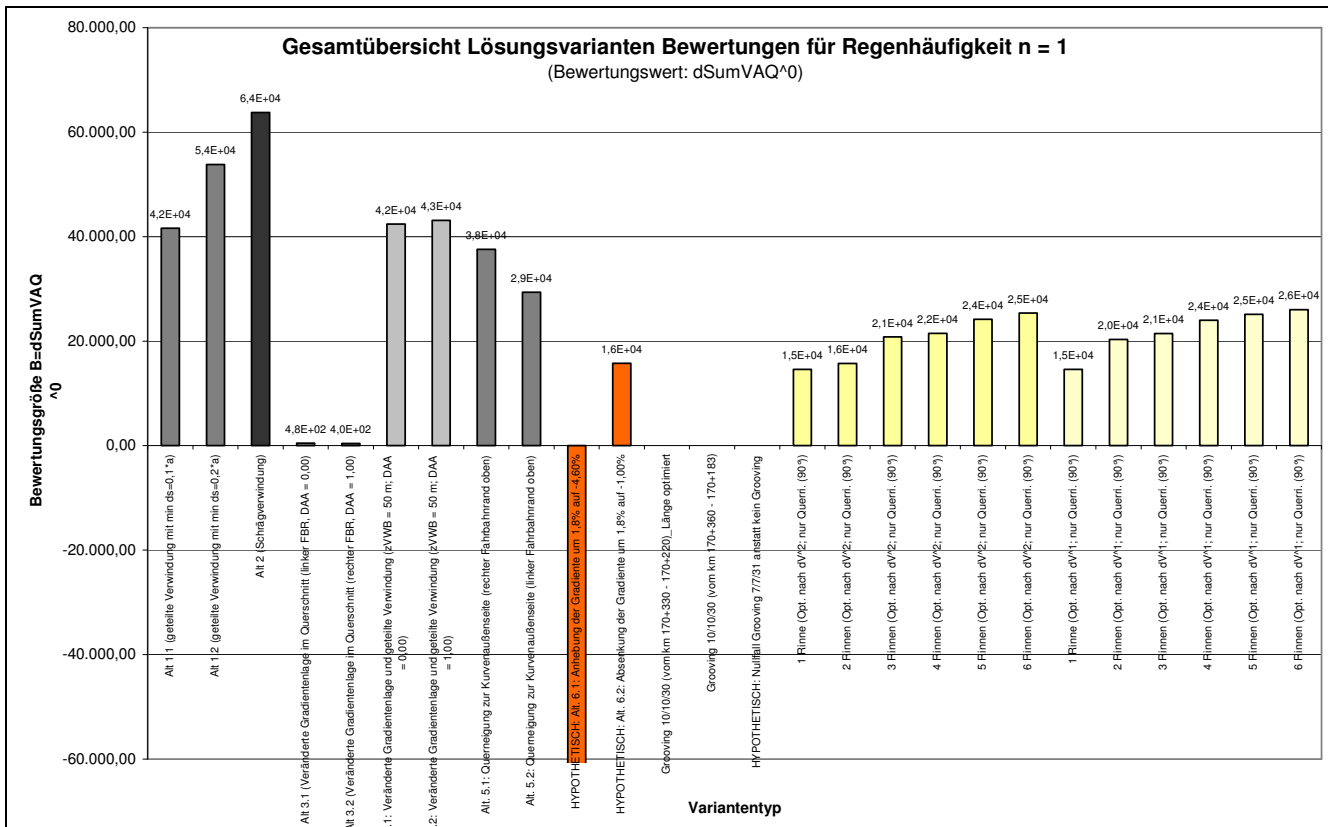


Abbildung 4-46: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit n = 1; $\sum \Delta V_i^0$

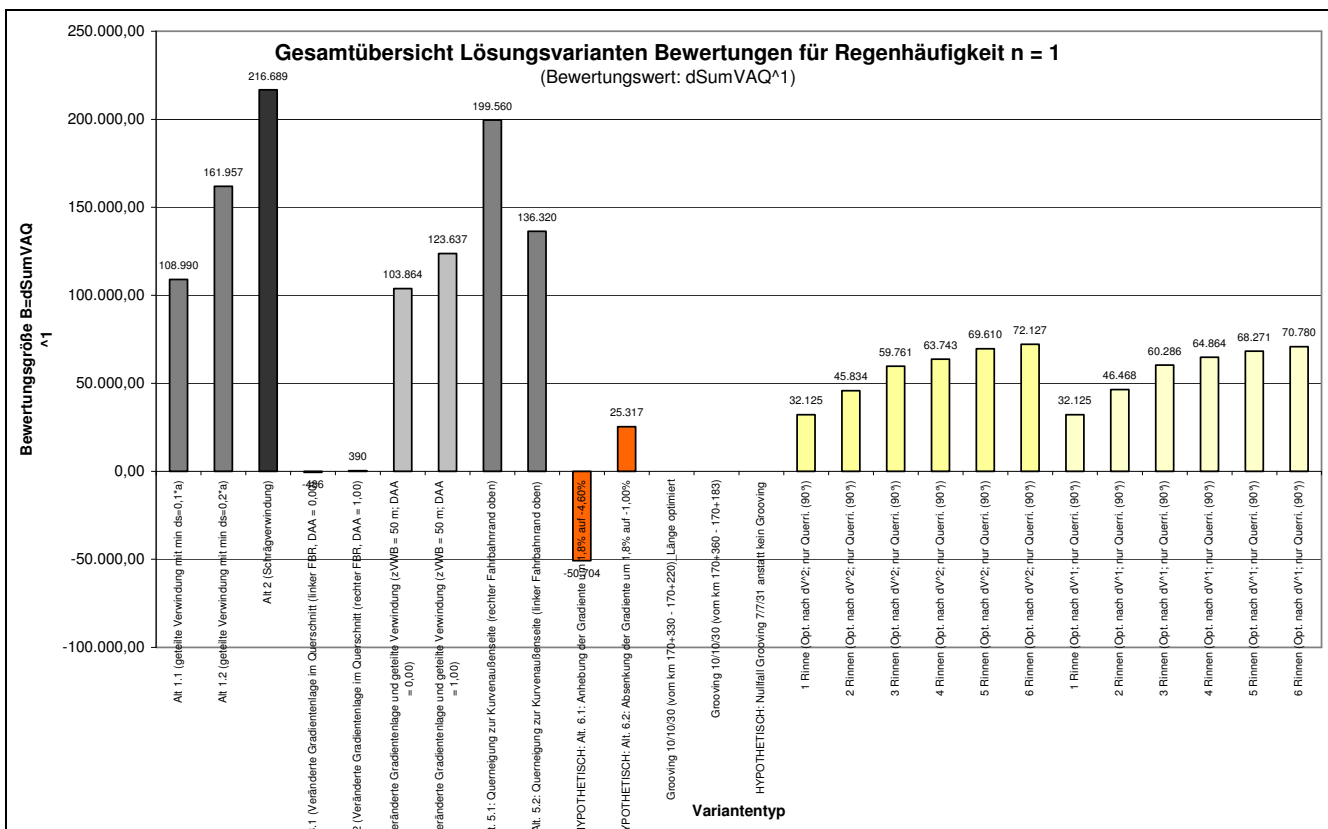


Abbildung 4-47: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit n = 1; $\sum \Delta V_i^1$

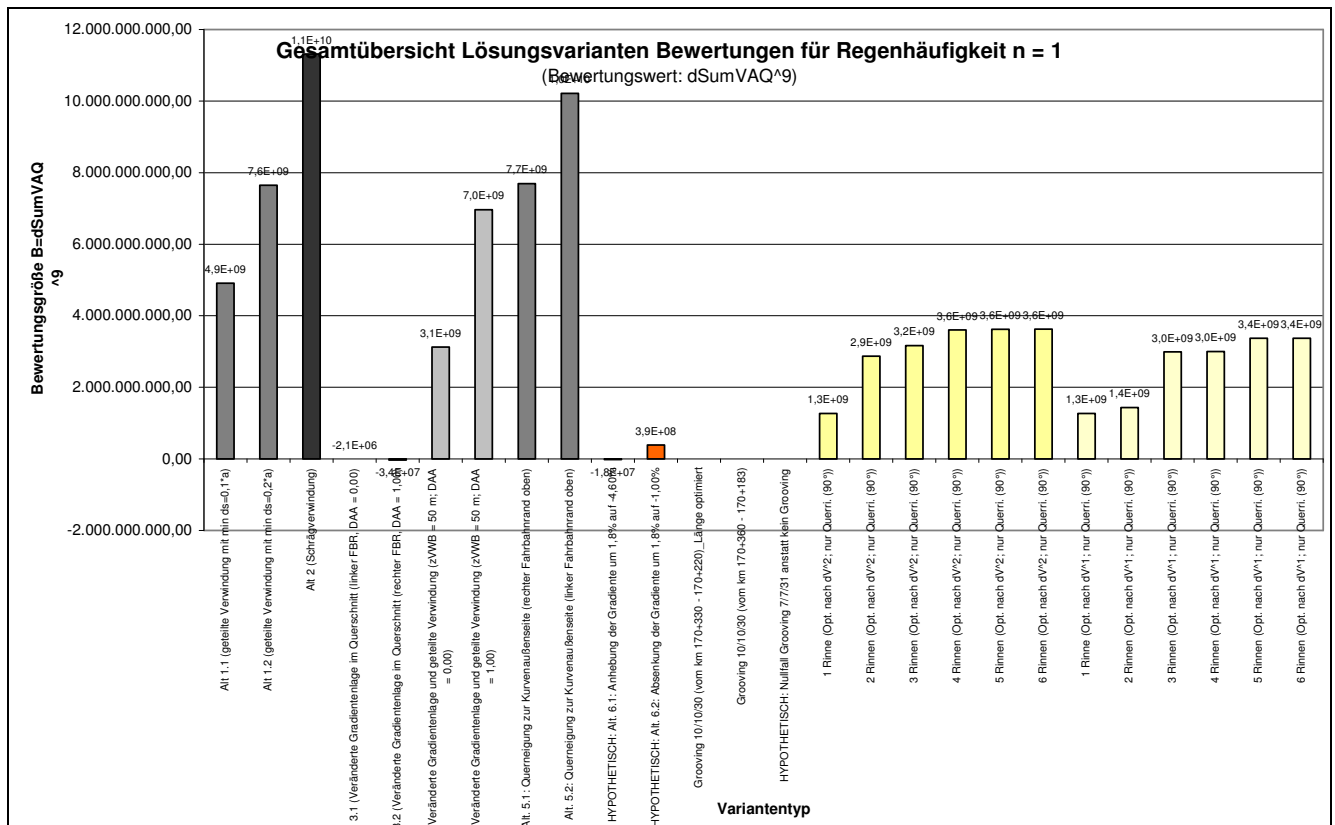


Abbildung 4-48: Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = 1$; $\sum \Delta V_i^9$

Unabhängig von der Wahl des Exponenten bei den oben gezeigten Varianten sind Lösungen mit Änderung des Querneigungsbands die effektivsten. Gleichzeitig wird der hierfür erforderliche (Kosten-)Aufwand im Sanierungsfall am höchsten eingeschätzt.

Gleichwohl ist im Falle eines Neubaus die Herstellung einer geteilten Verwindung unter Kostengesichtspunkten neutral zu bewerten. Im Falle eines Neubaus von Straßen hat die geteilte Verwindung damit absolute Priorität als Maßnahme zur Abminderung des Aquaplaning-Risikos.

Die sehr guten Ergebnisse der Schrägverwindung und auch der geteilten Verwindung mit $\min \Delta s = 0,2 \cdot a$ müssen zusammen mit den fahrdynamischen Nachteilen bewertet werden; daher kann eine Empfehlung zu diesen Varianten nur unter Vorbehalt einer vorausgehenden Abwägung ausgesprochen werden.

Anders als die obigen Lösungen sind der Einbau von Rinnen und auch das Fräsen von Rillen eher gangbare Lösungen für den Sanierungsfall. Der Aufwand wird vermutlich erheblich niedriger sein. Gleichwohl sind auch die Wirkungen schwächer. Durch die guten „Anfangs“-Wirkungen der ersten (und auch noch der zweiten) eingebauten Rinne, kann eine Sanierung durchaus auch mit wenigen Rinnen in Betracht gezogen werden. Der Zusatznutzen durch weitere Rinnen nimmt mit jeder weiteren Rinne ab.

Für den exemplarisch gerechneten Verwindungsbereich „BAB A 8 (km 171 - 170)“ wurden die optimierten Positionen für die ersten 6 Rinnen angegeben. Der Versuch, auf Grund von Änderungen der Längsneigungen eine Gesetzmäßigkeit in den empfohlenen Rinnenpositionen auffinden zu können, war nur teilweise erfolgreich. Eine Prognose der Position-

ierung mittels abgeleiteter Zusammenhangsfunktionen ist deshalb nicht möglich, wenngleich gewisse Charakteristika isoliert und beschrieben werden konnten. Eine Festlegung optimaler Rinnenpositionen sollte daher stets im Einzelfall erfolgen.

Die kritische Fahrgeschwindigkeit im untersuchten Streckenabschnitt der A 8 lässt sich durch Rinnen und durch Änderungen des Querneigungsbands nicht deutlich verringern, da auch außerhalb des Verwindungsbereich noch kritische Stellen vorhanden sind (Abbildung 4-49). Diese erstrecken sich am rechten Fahrbahnrand ungefähr von B-km 170+550 bis 170+450. Im exemplarischen Streckenabschnitt liegen sie zum größten Teil im Standstreifen und sind daher nicht kritisch. Teilweise erstrecken sie sich auch auf den rechten Fahrstreifen. Daher wird für den rechten Fahrstreifen das Grooving von Längsrillen empfohlen, um eine großflächige Abminderung zu erreichen (Abbildung 4-50).

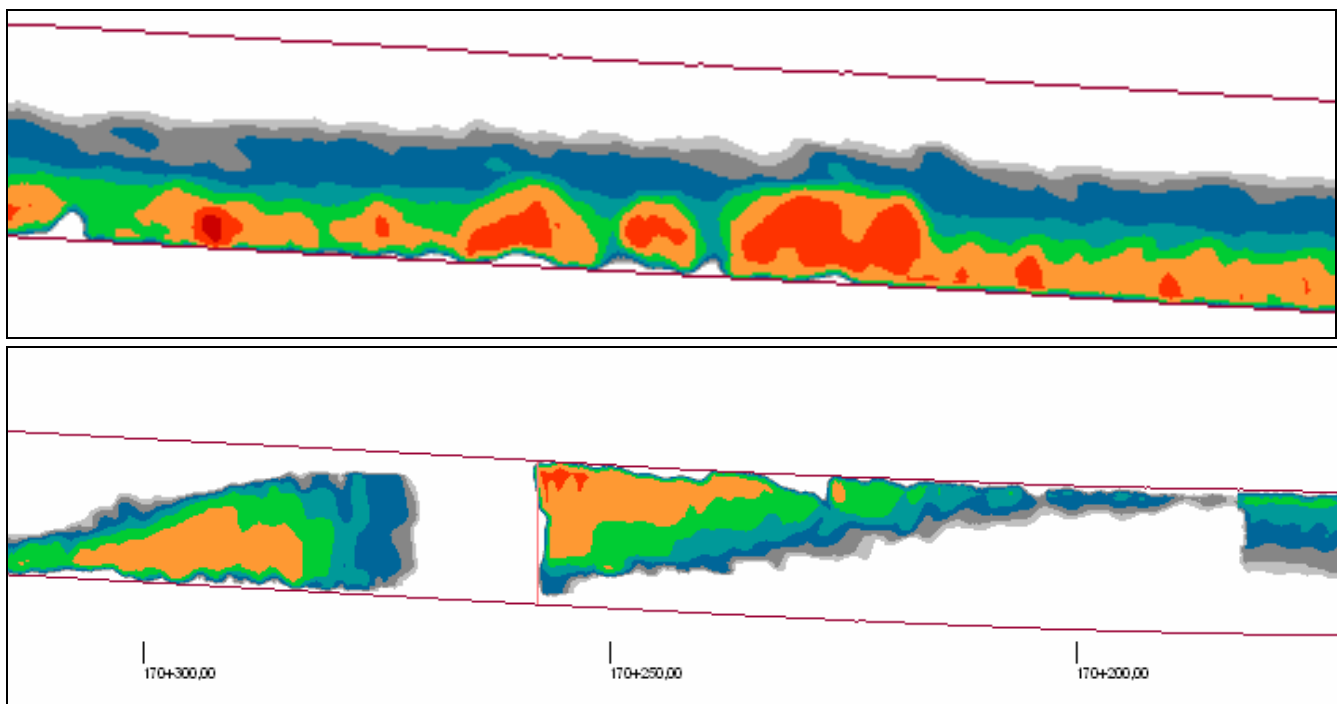


Abbildung 4-49: Aquaplaning-Geschwindigkeiten für $n = 1$ im Verwindungsbereich mit 1 Rinne (unten) und außerhalb des Verwindungsbereichs

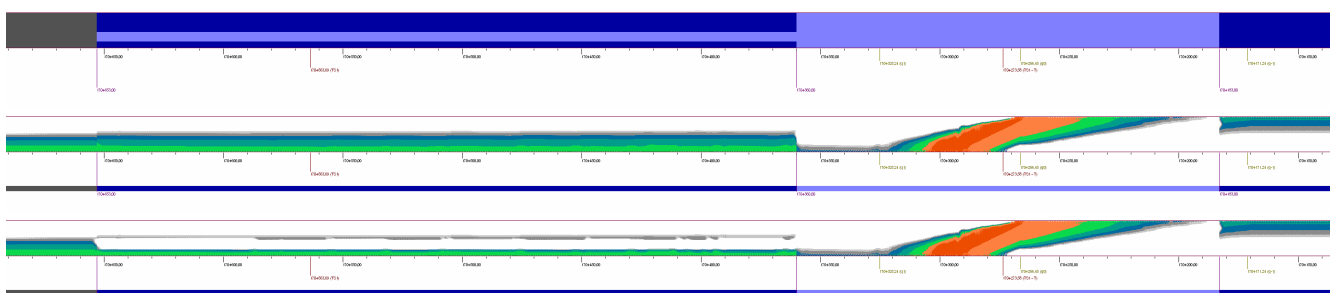


Abbildung 4-50: rechter Fahrstreifen mit Grooving von 170+653 bis 17+360 (Texturmodell (oben) und Verteilung der Aquaplaning-Geschwindigkeiten, ohne Grooving (mitte) und mit Grooving (unten))

Angenommen, dass diese Grooving- oder eine ähnliche Maßnahme durchgeführt würde, dann würden sich für die unterschiedlichen Lösungsvarianten die folgenden Differenzen der Fahrgeschwindigkeiten gegenüber dem Ohne-Fall ergeben ($\Delta V_{aq} = V_{aq,1} - V_{aq,0}$; für $n = 1$) (s.

Abbildung 4-51). Die berechneten Werte wurden auf ganze Dekameter abgerundet. Das Bild entspricht damit in der Tendenz den Effektivitäts-Bewertungsgrößen. Beide geteilten Verwindungen (Alternative 1) haben hier mit nur 10 km/h Differenz zum Ohne-Fall ein vergleichsweise schlechtes Ergebnis. Dasselbe gilt für die mit geteilten Verwindungen kombinierten Alternativen 3. Die Bewertung der Rinnen ist vergleichsweise gut. Durch den Sprung von $\Delta V_1 = 10$ km/h auf $\Delta V_2 = 20$ km/h von der ersten zur zweiten simultanen Entwässerungsrinne gewinnt der Einbau einer zweiten Rinne an Bedeutung. Sämtliche weiteren Rinnen genügen jedoch nicht zum Sprung auf die nächstniedrigere 10 km/h-Klasse.

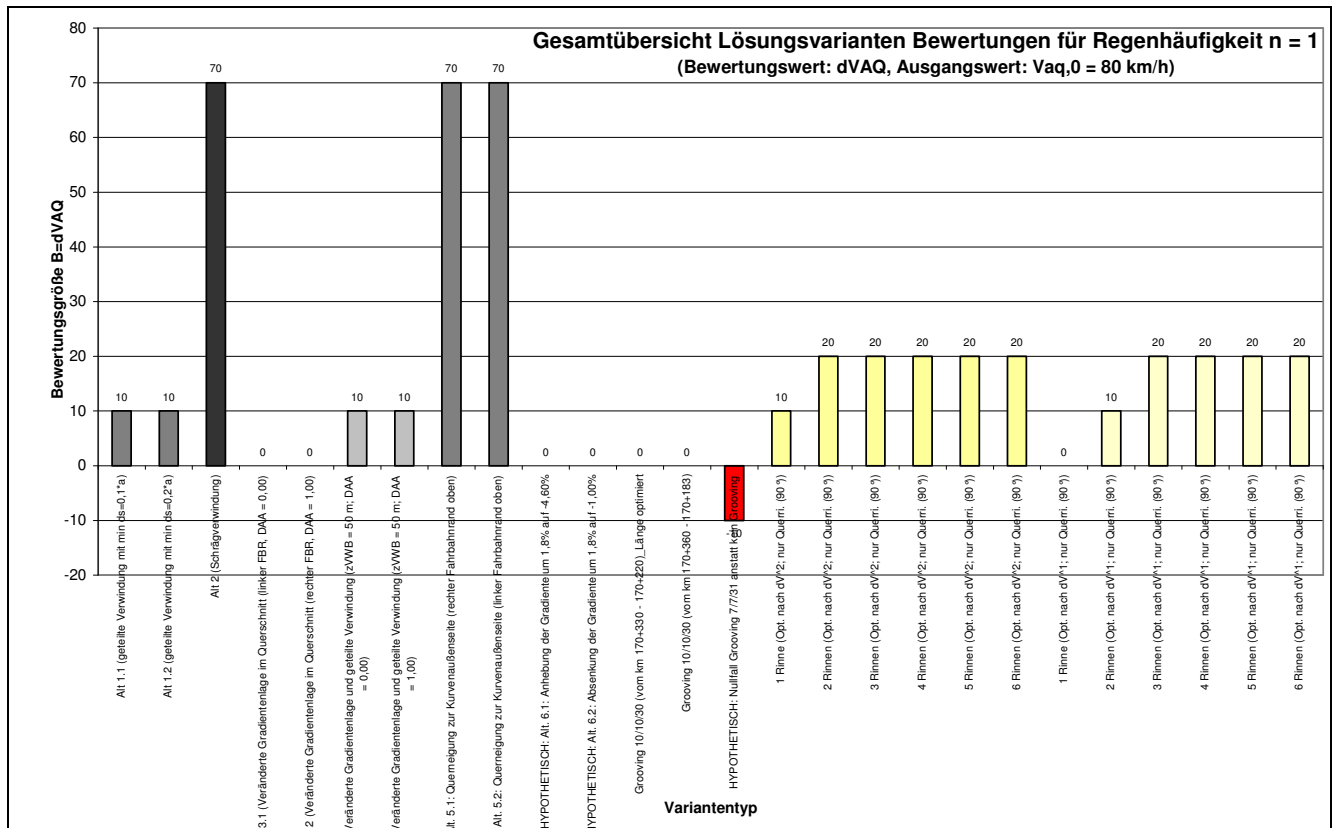


Abbildung 4-51 Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit n = 1; $B = \Delta V_{aq}$, $V_{aq,0} = 80$ km/h

Die Abminderungen der minimalen Aquaplaning-Geschwindigkeit wurden nicht für jedes Regenereignis gerechnet. Abbildung 4-52 stellt die Lösungsvarianten dar, für die eine Berechnung erfolgt ist. Links ist der Ohne-Fall dargestellt. Die Verbesserungen bei den Grooving-Maßnahmen sind bei häufigeren Regenereignissen deutlicher als bei seltenen. Insgesamt gibt es bei sehr hohen Regenintensitäten (hier bei n = 0,2) keine Maßnahme mehr, mit der überhaupt eine Abminderung erreichbar ist, mit Ausnahme der Schrägverwindung (Alt. 2).

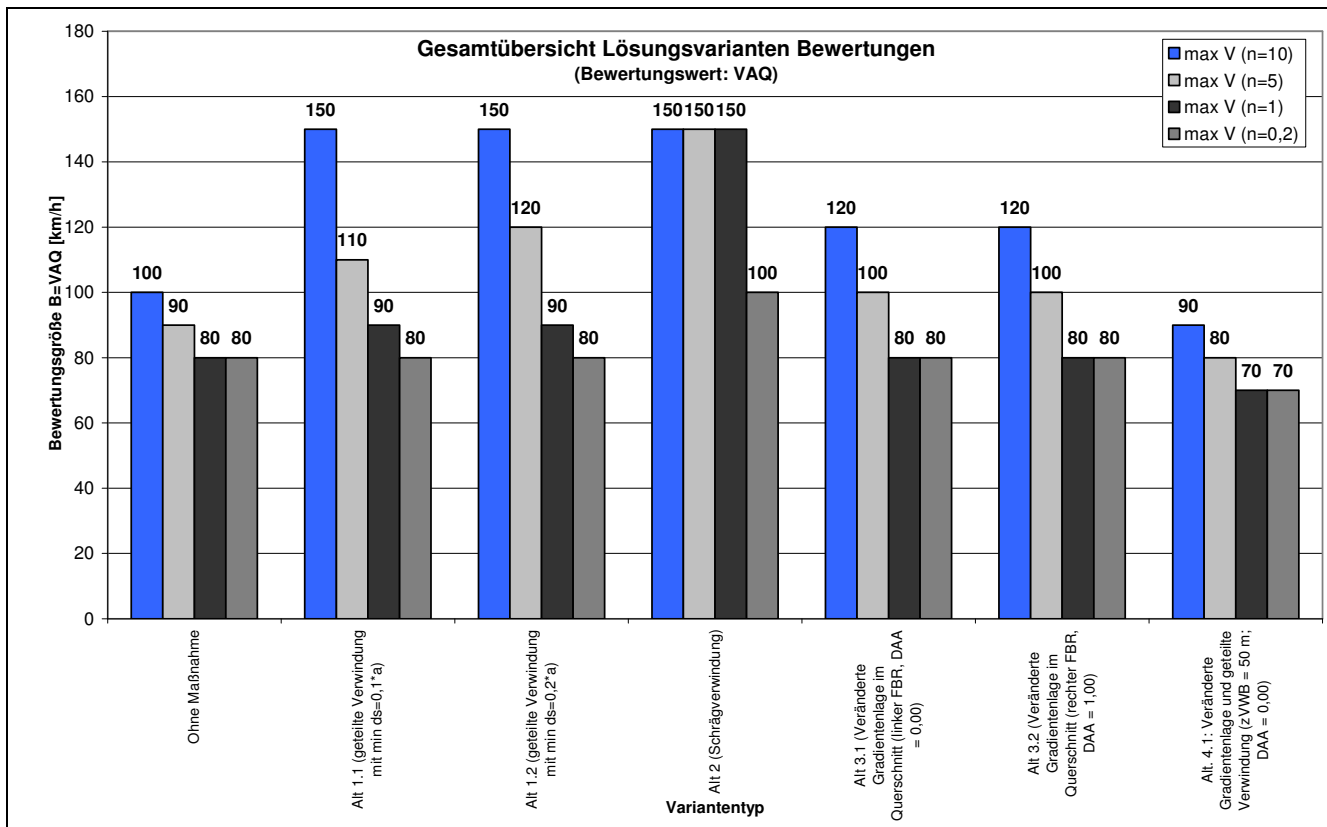


Abbildung 4-52 Gesamtübersicht Lösungsvarianten Bewertungen für Regenhäufigkeit $n = \{0,2; 1; 5; 10\}$; $B = mV_{aq}$

5 KRITISCHE WÜRDIGUNG UND AUSBLICK

Mit dem vorgestellten Simulationsmodell und Computerprogramm PLANUS ist es möglich, bestehende Straßenabschnitte in Bezug auf das Aquaplaning-Risiko einzuschätzen und mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Situation zu untersuchen und vergleichend zu bewerten. Gleichwohl ermöglicht das Modell eine Beurteilung von Straßenentwürfen auf ihre Aquaplaning-Eigenschaften bereits in frühen Planungsphasen anhand der Entwurfsparameter.

Hierzu bietet das Programm vielfältige Auswertungsmethoden, die in der vorliegenden Arbeit untersucht, verbessert und beispielhaft dargestellt wurden. Die im Bericht gezeigten Abbildungen wurden entweder direkt mit PLANUS erzeugt oder über die PLANUS-Ausgabedateien in weiteren Programmen ohne große Weiterbearbeitung erstellt.

Hierzu wurde ein Weg gefunden, der dem Anspruch der Straßenplanung gerecht wird, den Wasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen und die daraus ableitbaren Aquaplaning-Eigenschaften einer Straße modellieren zu können und gleichzeitig die hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten möglichst umfassend mit einbezieht. Der Fokus der Entwicklung lag auf der praktischen Anwendbarkeit und eines möglichst großen Nutzens für die Praxis im Straßenentwurf und -betrieb.

Durch empirische Absicherung mittels umfangreicher Versuchsreihen basieren die Ergebnisse auf einer guten Erfahrungsbasis und bieten die Genauigkeit, die die gestellte Aufgabe erfordert. Umfassende Vergleiche mit anderen Untersuchungen, z.B. zu Wasserfilmdickenverteilungen, wurden zur Absicherung der Modellergebnisse durchgeführt.

Die in PLANUS hinterlegten Modelle sind bewusst als hydrodynamisch-geometrische Hybrid-Lösungen ausgearbeitet worden. Die 1-Dimensionalität bei der Flusssimulation wurde beibehalten, nicht nur um die Kalibrierung anhand von Beregnungsversuche vornehmen zu können, sondern um auch eine qualitativ gute Anwendbarkeit und Stabilität zu gewährleisten. So gesehen ist ein Teilbereich der Modelltheorie auf die Kopplung und Ausführbarkeit der Modellkomponenten entfallen.

Mit den beschriebenen Modellen wurden langjährig angewandte und etablierte Modellvorstellungen zum Wasserabflussverhalten um die sich aus der Computertechnologie ergebenden Möglichkeiten erweitert und ergänzt. Die eindimensionale Betrachtung des oberflächigen Wasserabflusses in Form einer Falllinienbetrachtung wird im Straßenwesen seit langem standardmäßig angewandt. Die vorliegende Arbeit adaptierte dieses Konzept auf ein Raum-Gittermodell und ermöglicht es somit, neben den bereits vorgestellten Erweiterungen, z.B. auf irreguläre Topologien, auf die Verarbeitung von Daten aus Laservermessungen etc., weitere Modellergänzungen einzuführen und einfach an das Modell anzukoppeln. So ist denkbar:

- Fahrdynamische Betrachtungen (Fahrzeugmodelle) unter Einbeziehung des Griffigkeits- bzw. Aquaplaningverhaltens auf dem diskretisierten Modell der Fahrbahnoberfläche durchzuführen,

- Randstaubbedingungen (z.B. aus Ablaufschächten) zu erfassen,
- Die Modellierungen für beliebige andere Topologietypen (z.B. Kreisverkehrsplätze, Knotenpunkte etc.) durchzuführen. Die Modell-Algorithmen sind theoretisch dazu in der Lage, da sie von der ursprünglich vorausgesetzten, rechteckigen Form des Modellierungsbereichs gelöst wurden.
- Mikroskopische Grooving-Berechnungen im Modell zu integrieren (jede Rille wird einzeln betrachtet). Die theoretischen Grundlagen für eine softwaretechnische Implementierung wurden in RESSEL/HERRMANN (2006B) gelegt.

Zur Absicherung und Fortschreibung der Ergebnisse wird primär empfohlen:

- Durchführung von Aquaplaning-Versuchsreihen mit Variation der Reifenprofiliefen, Fahrbahntexturen und Wasserfilmdicken zur Aktualisierung bzw. Absicherung der Parameter des Aquaplaning-Modells auf Basis geschlossener Randbedingungen.
- Untersuchung des Wasserabflusses auf weiteren Belägen, insbesondere auf offenporigen Asphalten, um diese als Aquaplaning-Maßnahme untersuchbare Lösungsmöglichkeit in das Modell aufzunehmen. Ergänzend dazu kommen auch Aquaplaning-Tests auf offenporigen Belägen in Betracht.

Unabhängig von der Vielzahl denkbarer Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten wurde mit den vorgestellten Modellen und deren Verfügbarkeit und Anwendbarkeit in der praktischen Planung durch das Computerprogramm PLANUS ein Schritt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Streckenabschnitten mit erhöhtem Aquaplaning-Risiko unternommen. Es wurde ein Instrument erarbeitet, mit dem die Praxis im Straßenentwurf und -betrieb Optimierungs- und Sanierungsvorschläge zu erstellen in der Lage ist.

Es bleibt darauf hinzuweisen, dass darüber hinaus jeder Verkehrsteilnehmer zwei der drei wichtigen Einflussfaktoren des Aquaplaning-Effekts stets selbst zu beeinflussen vermag: die Reifenprofiltiefe und die gewählte Fahrgeschwindigkeit.

Es war vorrangige Absicht dieser Untersuchung, sämtliche Berechnungen und Dimensionierungen auf die gesetzlich vorgegebene Mindestreifenprofiltiefe von 1,6 mm zu beziehen. Der Sicherheitsgewinn in Bezug auf Aquaplaning, der sich durch eine höhere Profiltiefe ergibt, ist jedoch immens, wie Abbildung 5-1 exemplarisch zeigt.

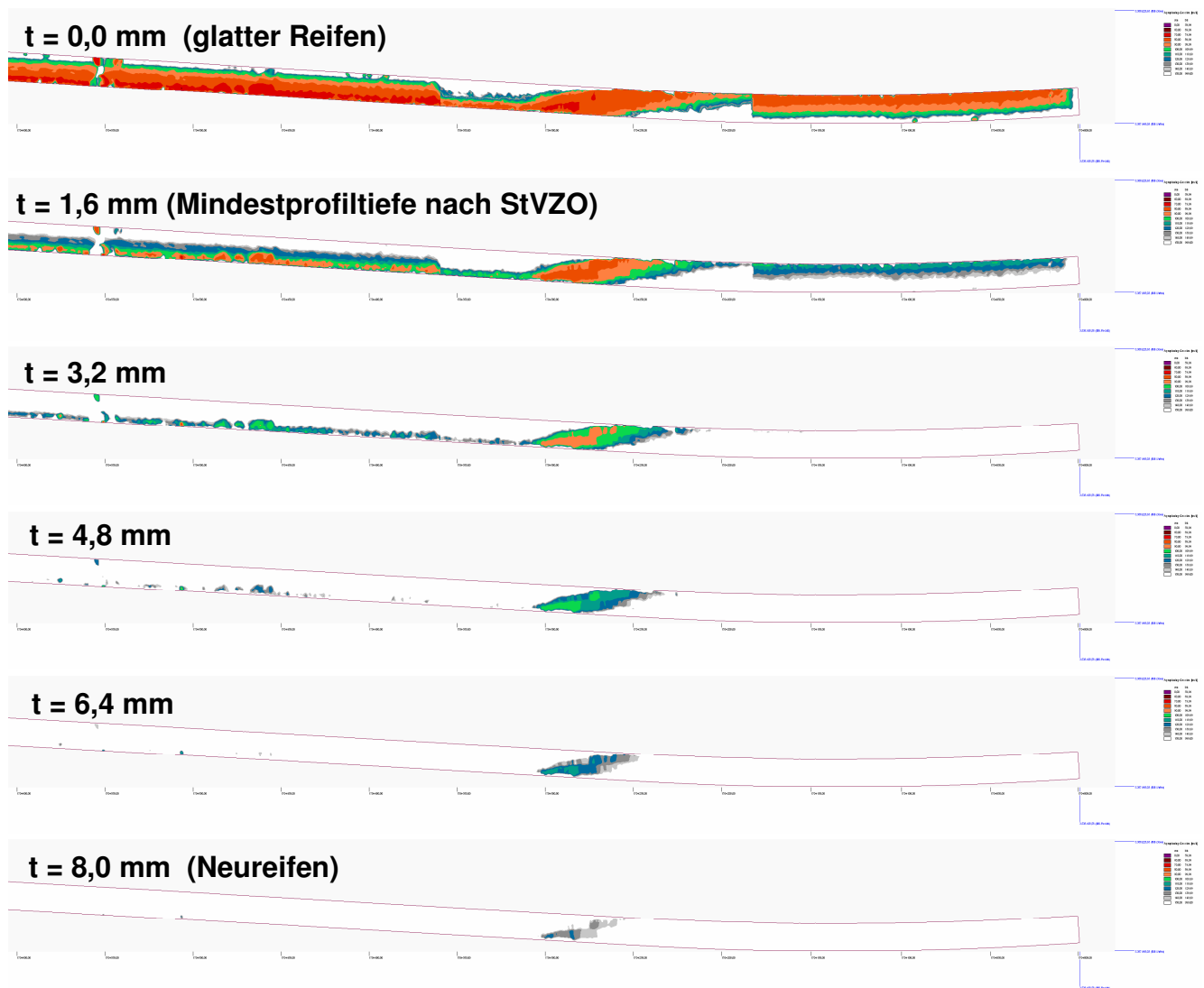


Abbildung 5-1: Aquaplaning-Geschwindigkeiten für das Regenereignis $n = 1$ [$r = 125,7 \text{ l} / (\text{s} \cdot \text{ha})$] unter Variation der Reifenprofiliefen t

Umgekehrt ergibt sich aus dem Unterschreiten der Mindestprofiltiefe eine überproportionale Zunahme der Aquaplaning-Gefahr, wie in Abbildung 5-1 für den Parameter $t = 0,00 \text{ mm}$ zu erkennen ist. Untersuchungen im Rahmen der jährlich durchgeführten Verkehrssicherheitsaktion „Reifen-Check“ (GTÜ) ergeben regelmäßig, dass ca. 5% aller Fahrzeuge eine Reifenprofiltiefe unterhalb von 1,60 mm aufweisen³³.

Abbildung 5-2 zeigt abschließend am untersuchten Beispiel, dass mit einem Neureifen ($t = 8,0 \text{ mm}$) bei einem 20-jährigen Regenereignis das Risiko bezüglich Längs-Aquaplaning immer noch geringer ist, wie mit einem Reifen mit vorgeschriebener Mindestprofiltiefe ($t = 1,6 \text{ mm}$) bei einem 5 mal pro Jahr eintretenden Regenereignis ($n = 0,2$). Mit einem fast glatten Reifen ist derselbe Verwindungsbereich bereits bei einem 10 mal pro Jahr eintretenden Regenereignis nur noch unter 70 km/h befahrbar.

³³ Die Reifen-Untersuchungen der GTÜ im Jahr 2001 führten zu folgenden Ergebnissen: Knapp 24% der Reifen verfügten nur noch über eine Profiltiefe nahe der Verschleißgrenze (1,6 mm), und über 12% wurden mit unzureichenden Profiltiefen erfasst ($< 1,60 \text{ mm}$). Eine ebenfalls von der GTÜ durchgeführte Umfrage im Jahr 2000 ergab: 40% der befragten Autofahrer war die gesetzlich vorgeschriebene Mindestprofiltiefe nicht bekannt. (GTÜ, 2001)

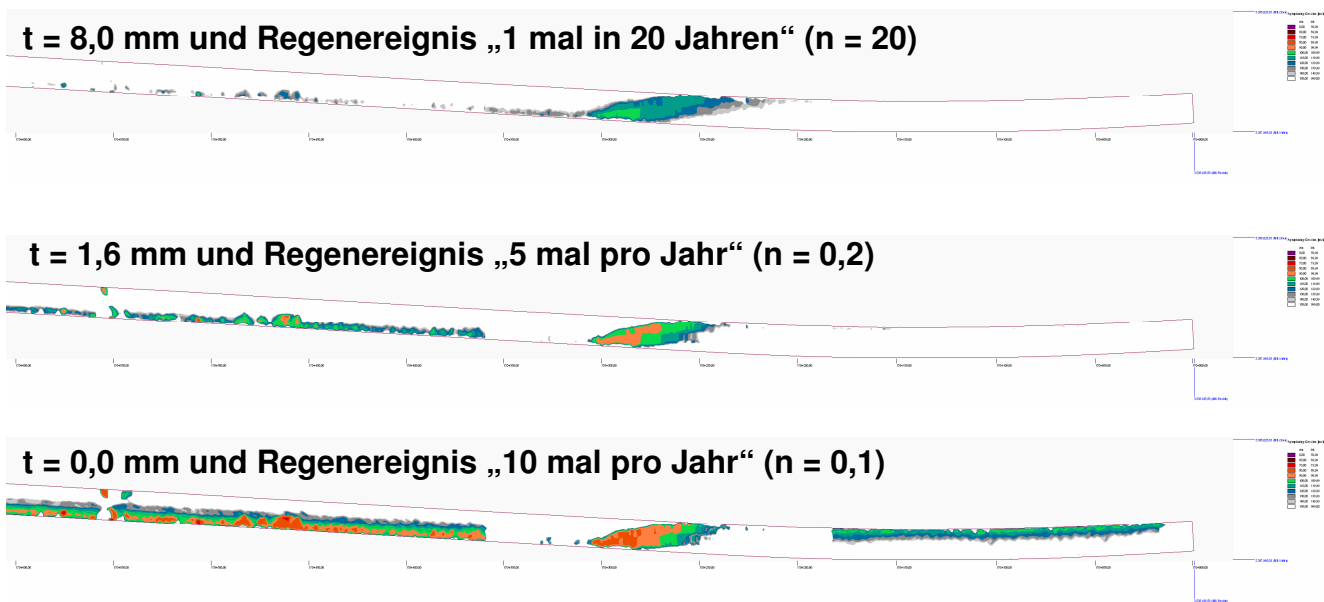


Abbildung 5-2: Vergleich der Aquaplaning-Geschwindigkeiten für Neureifen und einen Reifen mit vorgeschriebener Mindestprofiltiefe; Variation der Regenhäufigkeit

Neben einer straßenbauseitigen Optimierung sollten daher sämtlichen Versuche unternommen werden, diese enormen Potenziale auszuschöpfen. Sei es durch Hinweise im Rahmen von Verkehrssicherheitsaktionen (Plakate an Aquaplaning-Stellen auf Autobahnen), durch Sensibilisierung der Öffentlichkeit durch Werbung oder Medienberichte oder durch Schulung der Verkehrsteilnehmer (z.B. im Rahmen des theoretischen Teils zur Fahrerlaubnis-schulung).

Ein Anheben der vorgeschriebenen Mindeststreifenprofiltiefen (auf 2,5 mm oder zumindest 2,0 mm) wird empfohlen.

Nachdem zumindest die Rechtsprechung³⁴ bereits bei einer gesetzlich noch ausreichenden Reifenprofiltiefen von 1,6 mm von einer Mithaftung der Verkehrsteilnehmer ausgeht, sollten diese besser informiert und darin bestärkt werden, eigenverantwortlich und frühzeitig auf eine ausreichende Reifenprofiltiefe, unabhängig von den vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Mindestwerten, zu achten.

³⁴ „Autofahrer, die mit einer Reifenprofiltiefe von 1,6 mm (Verschleissgrenze) auf regennasser Fahrbahn bei 120 km/h ins Schleudern geraten, haben wegen grober Fahrlässigkeit keinen Anspruch aus ihrer Vollkaskoversicherung - auch wenn es noch nicht ordnungswidrig ist, mit solchen Reifen zu fahren.“ (Landgericht Itzehoe 3 O 153/00).

6 GLOSSAR

Modellierungsbereich bezeichnet die Gesamtheit aller zur Modellierung eingerichteter Zellen. Aus der Topologie der zu modellierenden Fahrbahn ergibt sich der *Außenbereich* als Leerfläche, die Einpassung in ein ORS (Orthogonalraster-System) dient. *Innenbereich* (Fahrbahnoberfläche) bezeichnet die Zellen, die tatsächlich mit Werten behaftet sind, die zur Modellierung ausgewertet werden und deren Attributen Werte zugewiesen werden können.

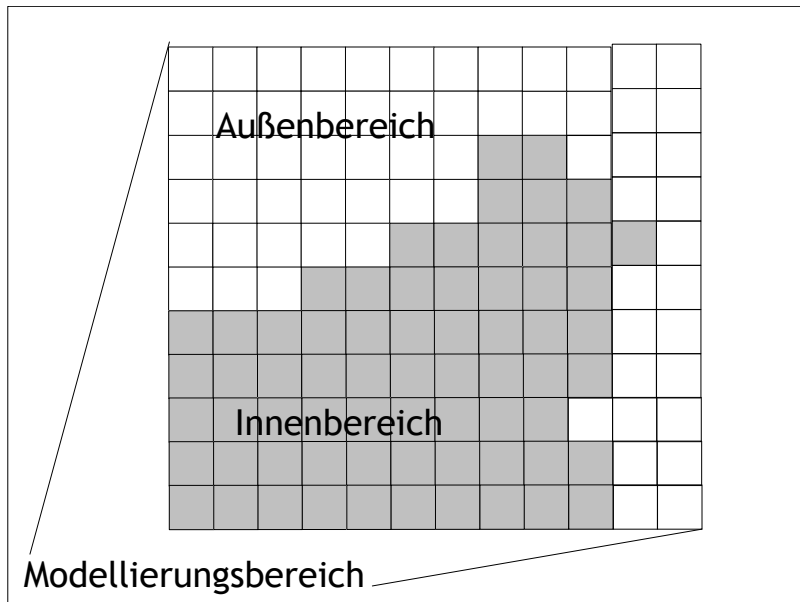


Abbildung 6-1: Modellierungsbereich, Innenbereich, Außenbereich

Punkte des Innenbereichs die direkt an den Außenbereich angrenzen, werden als *Randbereich* gekennzeichnet.

Winkel, falls nicht anders angegeben, beziehen sich Winkelgrößen immer auf ein Globalsystem. Bei Berechnung von Winkeldifferenzen wird von der Winkelfunktion der Sprung ($0^\circ/360^\circ$) berücksichtigt (vgl. Abbildung 6-2).

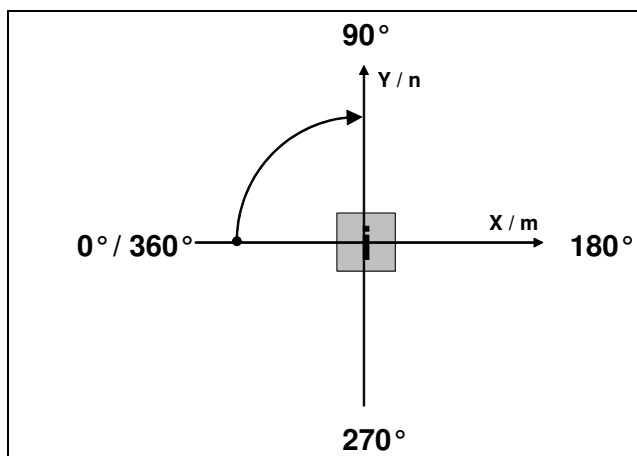


Abbildung 6-2: Winkelterminologie

Zellen sind die Flächen, die durch ihren Mittelpunkt repräsentiert werden (vgl. Abbildung 6-4). Eigenschaften wie z.B. Höhe, Wasserfilmdicke... sind immer auf den Zellmittelpunkt bezogen

und werden als für die Zelle indifferent angenommen. Der Begriff *Punkt* wird als Synonym benutzt.

Nachbarzellen zu einer Zelle *i* sind alle in einem Umgebungsbereich $U = 1$ angrenzenden Zellen. Es gibt:

- *direkte* Nachbarzellen mit einer gemeinsamen Kante mit der Zelle *i* und
- *indirekte* Nachbarzellen mit einem gemeinsamen Berührungspunkt mit der Zelle *i*.
- Die vier direkten Nachbarzellen ($u \in U \subseteq \text{Dir}$) haben eine gemeinsame Zellgrenze mit der Ausgangszelle (Süd, Nord, Ost, West). Die vier indirekten Nachbarzellen ($u \in U \subseteq \text{Ind}$) berühren die Ausgangszelle nur jeweils an einem Eckpunkt (SO, SW, NW, NO).

Die Begriffe *Punkt* und *Zelle* werden in dieser Abhandlung synonym verwendet. Ein Punkt repräsentiert streng genommen den Mittelpunkt einer Zelle (vgl. Abbildung 6-4) und dient der Verortung dieser Zelle im Raum. Die flächenhafte Bedeutung kommt im Begriff *Zelle* zum Ausdruck, die immer ein bestimmtes Gebiet umschreibt (in diesem Fall:

$$A = g^2$$

mit:

- A = Fläche einer Zelle, m²
- g = Rasterdichte, m/Zelle

Der Abstand zwischen orthogonal benachbarten Punkten entspricht der Rasterdichte bzw. der Länge der Zellenkanten.

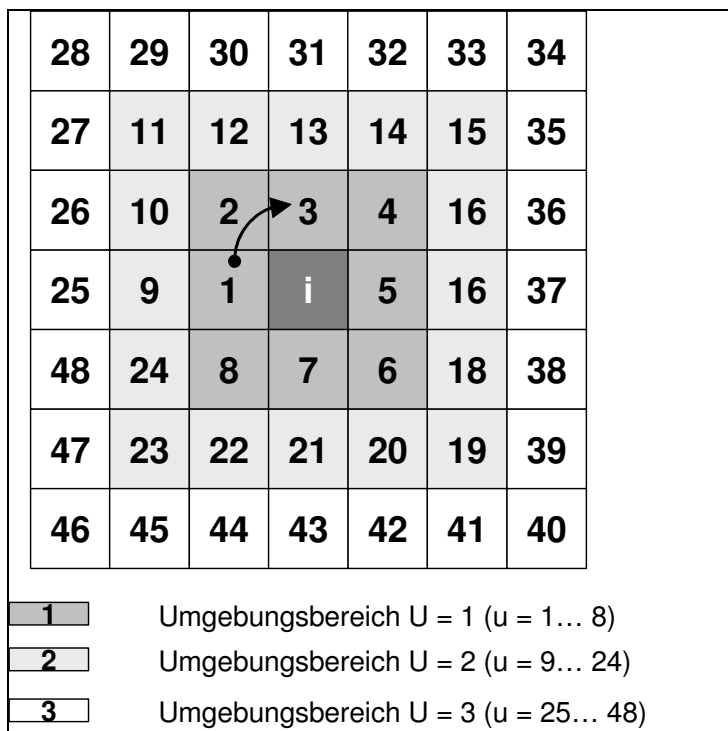


Abbildung 6-3: Terminologie Umgebungsbereich

Umgebungsbereich bezeichnet eine Menge an Punkten *U* die einen Ausgangspunkt *i* umfassen (vgl. Abbildung 6-3). Mit $U = 1$ werden die unmittelbaren Nachbarpunkte zu *i* erfasst. Für die Anzahl *n* der Punkte in *U* gilt:

$$n = (2 \cdot U + 1)^2 - 1$$

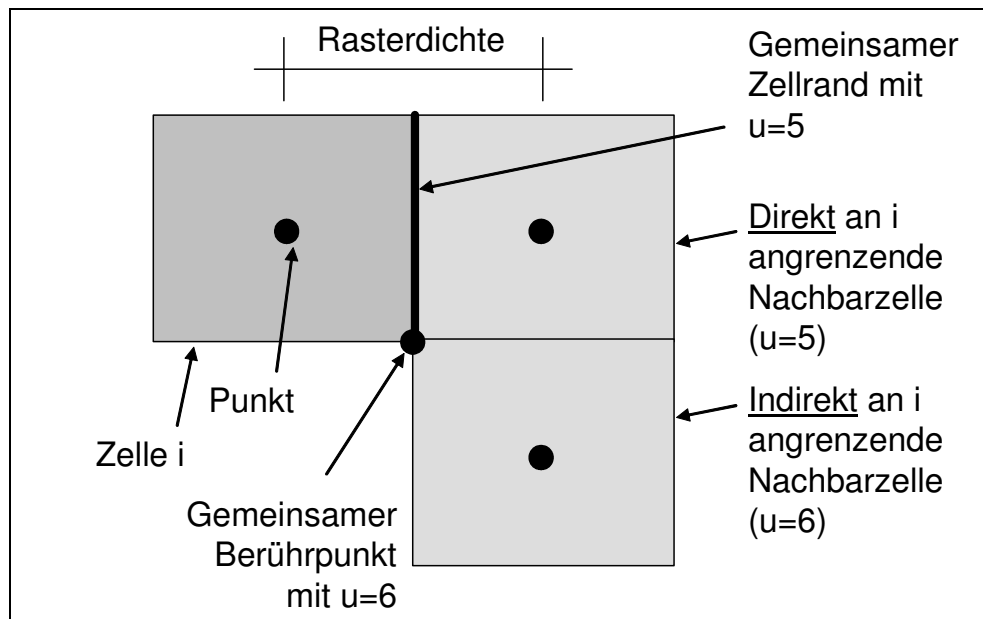


Abbildung 6-4: Terminologie im Zusammenhang mit dem Orthogonal-Rastersystem

Wasserfilmdicke. Wird nur der Begriff ohne weitere Kennzeichnung verwendet, ist die bezogene Wasserfilmdicke WFD_b nach HÖCKER (1971) gemeint. Daneben wird in dieser Arbeit die rechnerische Wasserfilmdicke WFD_r verwendet. Diese ist aber stets als solche gekennzeichnet. Daneben wird der Begriff Wasserhöhe verwendet, der eine nicht-bezogene, reine Wasserhöhe an einer bestimmten Stelle definiert.

Aquaplaning-Geschwindigkeit wird synonym mit *kritische Geschwindigkeit*, *Aufschwimmgeschwindigkeit* und *maximale sichere Fahrgeschwindigkeit* verwendet. Je nach Textzusammenhang gibt einer der vier Begriffe, trotz gleicher Quantität, den Sachverhalt am nächsten wieder. Gemeint ist in jedem Falle die Aufschwimmgeschwindigkeit bei dynamischem Längs-Aquaplaning, welches allein durch den Staudruck des Wassers (oder ähnliche Erscheinungen) und nicht von Zentripetalkräften, z.B. bei Kurvenfahrt o.ä., beeinflusst wird.

Orthogonalraster-System (ORS) leitet sich von der orthogonalen, äquidistanten Anordnung der Zellen bzw. Punkte des Modellierungsbereichs ab. Die Punkte sind dabei über eine ganzzahlige X- und Y-Koordinate stets adressierbar. Der gerasterte Abstand von Punkten lässt sich aus der Adresse $\{X, Y\}$ ableiten. Es ist hierzu kein weiterer Zeiger notwendig.

Regenereignis wird hier synonym mit der Regenspende bzw. –intensität verwendet. Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Regenereignissen erfolgt in dieser Abhandlung meist durch Angabe der Regenhäufigkeit n (unter Konstanz aller anderen Einflussparameter).

7 LITERATUR

BATHELT, H. (1971): Analytische Behandlung der Strömung in der Aufstandsfläche schnell rollender Reifen auf nasser Fahrbahn („Aquaplaning“) (Dissertation). Technische Hochschule Wien, Wien, Österreich.

FACH, M. (1996): Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Reihe Fahrzeugtechnik Heft F 21, Bergisch-Gladbach.

FISCHLEIN, H.; GNADLER, R.; UNRAU, H.-J. (2001): Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenstruktur auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen bei trockener und nasser Fahrbahn. In: ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift), 103, 2001, H. 10, S. 950-962.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRAßENWESEN (FG) (1968): Merkblatt über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Ausgabe 1968, Köln.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRAßENWESEN (FG) (1972): Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (1998): Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen – Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypen-Steckkarten, Ausgabe 1998, Köln.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitte (RAS-Q), Ausgabe 1996, Köln.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (1995): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung (RAS-L), Ausgabe 1995, Köln.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (1987a): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Entwässerung (RAS-Ew), Ausgabe 1987, Köln.

GALLAWAY, B.M.; ROSE, J.G.; SCHILLER JR., R.E. (1972): The Relative Effects of Several Factors Affecting Rainwater Depths on Pavement Surfaces. Highway Research Board (HRB), Highway Research Record Nr. 396, Washington D.C., USA, S. 59-69.

GALLAWAY, B.M.; IVEY, D.L.; HAYES, G.G. ET AL. (1979): Pavement and Geometric Design Criteria for Minimizing Hydroplaning. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-79-31, S. 278 ff.

GENGENBACH, W. (1967): Das Verhalten von Kraftfahrzeugreifen auf trockener und insbesondere nasser Fahrbahn (Dissertation). Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

GENGENBACH, W. (1968): Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn. In: ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift), 70, 1968, H.3 (I), S.83-89, H. 8 (II), S. 288-293, H. 9 (III), S. 310-316.

GNADLER, R. (1980): Naßgriff- und Aquaplaningverhalten von PKW-Reifen. In: Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH) (Hrsg.), Heft 22, Karlsruhe, S. 113-129.

GOUGH, V.E. (1958): Tire to Ground Contact Stresses. *Wear*, 2, 1958, Nov., 2, S. 107ff.

GROGGER, H. (1996): Kopplung von Strömungs- und Strukturmechanik zur Berechnung des Aquaplanings von Pkw-Reifen (Dissertation). Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich.

GTÜ (GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ÜBERWACHUNG MBH) (2001): Pressemitteilung zum ReifenCheck 2001, www.gtue.de, Stuttgart.

HEINZ, G. (1981): Erhöhtes Unfallrisiko bei Nässe – Versuch einer Quantifizierung. In: *Straßenverkehrstechnik*, 1981, H. 6, S. 188-194.

HELMIG, R., (1996): Einführung in die numerischen Methoden der Hydromechanik. *Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart*, Heft 86; Institut für Wasserbau (Hrsg.), Stuttgart.

HENNES, R. (1985): Zur Optimierung der Textur von Fahrbahnoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Feuchte (Dissertation). Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen.

HERRING, H.E. (1980): Der Einfluß der Fahrbahnverwindung auf Fahrdynamik, Wasserabfluß und Unfallgeschehen. In: *Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH)*, Heft 22, Karlsruhe, S. 85-99.

HÖCKER, H.J. (1971): Die Oberflächenentwässerung von Fahrbahnen und ihre Bedeutung für den Straßentwurf. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 118; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn.

HOFER, D. (1989): Entscheidungshilfe zur Beurteilung kritischer Bereiche der Straßenoberflächenentwässerung. In: *Straße und Autobahn*, 1989, H. 1, S. 24-29.

HOLDERBAUM, A. (1978): Hydraulische Untersuchungen zur Ermittlung der Wasserfilmdicke auf berechneten Fahrbahnoberflächen (Dissertation). Technische Hochschule DARMSTADT (HRSG.), DARMSTADT.

HORNE, W.B.; DREHER, R.C. (1963): Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning. NASA TN D-2056, Washington D.C., USA.

HORNE, W.B. (1968): Tire Hydroplaning and Its Effects on Tire Traction. In: *Highway Research Record No. 214*, Transportation Research Board, Washington, D.C., S. 24-33.

KALENDER, U. (1971): Abfluss des Regenwassers von ideal-ebenen Fahrbahnoberflächen. (Dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin.

KALENDER, U. (1986): Wechselwirkung Reifen/Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluß bei Nässe und hohen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung neuester Reifentypen – Teil II. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 498; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.

- KARANTOUNIAS, G. (1972): Dünnschichtabfluß auf stark geneigter Ebene (Dissertation). Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- KATTUSCH, M. (2002): Bauliche Maßnahmen zur Vermeidung von Aquaplaningunfällen in Verwindungsbereichen breiter Richtungsfahrbahnen. In: Straße und Autobahn, 53, 2002, 8, S. 438-441.
- KLEIN, R.; LEHNERT, D.; HOLDERBAUM, A. ET AL. (1978): Modellversuche zum Abfluß von Niederschlagswasser auf Verwindungsstrecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 250; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- KNOLL; NAZET (1969): Die Trassierung von Bundesautobahnstrecken im Zusammenhang mit dem Aquaplaning-Effekt. In: Straße und Autobahn, 20, 1969, 5, S. 162-168.
- KRATOCHWILL, H. (1996): Aquaplaning-Untersuchung von glatten und profilierten Pkw-Reifen mit Hilfe einer dreidimensionalen Strömungsberechnung ohne Berücksichtigung der Reifenverformung (Dissertation). Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich.
- LEHNERT, D. (1974): Untersuchungen zur Querschnittsgestaltung von Straßen im Bereich von Wendelinien mit besonderer Berücksichtigung der Abführung des Niederschlagswassers (Dissertation). Fachbereich Wasser und Verkehr, Technische Hochschule Darmstadt (Hrsg.), Darmstadt.
- LEHNERT, D. (1975): Rechnerische Ermittlung der Wasserfilmdicke auf Straßen bei Regen. In: Straßen- und Tiefbau, 29, 1975, H. 1, S.12-15.
- LUCAS, J. (1968): Messung der geometrischen Rauheit und Wasserabfluß von der Fahrbahn. In: Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe. Berichte des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Berlin (Hrsg.), H. 2, S. 163-178. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- MOORE, D.F. (1965): Drainage Criteria for Runway Surface Roughness. In: The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, 69, 1965, 5, S. 337-342.
- NESTMANN, F.; KROHMER, R.; BERNHART H. H. (1996): Wasserfilmdicken in Abhängigkeit von Neigungen, Unebenheiten und Regenintensitäten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 728; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- PETRACZEK, O. (1975): Experimentelle Ermittlung der Wasserfilmdicken auf Fahrbahnen unter natürlichen Bedingungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 195; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- PETROVIĆ, P. (1976): Fahrbahnverwindung bei geringem Längsgefälle im Hinblick auf den Wasserabfluß. Reihe Straßenforschung, Heft 58, Bundesministerium für Bauten und Technik (Hrsg.), Wien, Österreich.
- PIEPER, K. (1938): Regenabfluß von Straßenflächen (Dissertation). Technische Hochschule Dresden, Dresden.

RAUBAL, B. (2002): Ein Winkelschrittverfahren zur Bestimmung von entwässerungstechnisch optimierten Regelflächen für Kreisverkehrsanlagen in Schräglage. In: Workshop „Kreisverkehr“ – Tagungsband. Sommerakademie des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen Graz, 17. August 2001. Verlag für die Technische Universität Graz, Graz, Österreich.

REDZOVIC, V. (1995): Experimentelle Ermittlung des Einflusses der negativen Querneigung auf die Fahrsicherheit hinsichtlich der Kraftschlußbeanspruchung bei Fahrstreifenwechseln und Bremsvorgängen (Dissertation). Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (Hrsg.), Karlsruhe.

RESSEL, W.; HERRMANN, S.R. (2006A): Aquaplaning und Wasserfilmdicken – Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen; Berechnung der Wasserfilmdicke. FE 05.126/2001/AGB. Schlussbericht, Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach.

RESSEL, W.; HERRMANN, S.R. (2006B): Computer Simulation of Grooved-Pavement Runoff – Based on the Runway-Characteristics of the Hamburg-Finkenwerder Special Airfield. In: Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen, Heft XX (Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen). Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart.

RESSEL, W.; HERRMANN, S.R. (2006C): Benutzerhandbuch zu PLANUS V 1.4.2. Anhang zu FE 05.126/2001/AGB. Schlussbericht, (Kein offizieller Vertrieb. In PLANUS integriert bzw. zur Verfügung gestellt mit der entsprechenden PLANUS-Version). Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach.

RESSEL, W.; HERRMANN, S.R. (2003): Generierung von Fahrbahntopografie-Modellen aus Trassierungs- und Oberflächenstrukturparametern. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Steinauer, Mitteilungen des Lehrstuhls für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Aachen.

RIEDEL, A. (1985): Theoretische Untersuchung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen auf Straßenverwindungen (Dissertation). Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

SCHULZE, K.-H.; DAMES, J; LANGE, H. (1975): Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 189; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.

SCHULZE, K.-H. (1977): Kraftschluß neuester Reifentypen bei nassen Fahrbahnoberflächen und hohen Geschwindigkeiten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 228; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.

TRAPP, K.-H. (2002): Aquaplaning in Verwindungsbereichen breiter Richtungsfahrbahnen. In: Straße und Autobahn, 53, 2002, 8, S. 433-437.

ZIOR, F. (1987): Regenwasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen – experimentelle und theoretische Überlegungen. Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Heft Nr. 38, Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt (Hrsg.), Darmstadt.

EXPERTEN-INTERVIEWS

[1] Klein, M. (2005), Stelle: Autobahnverwaltung Straßen.NRW, Dienststelle: Hamm/Westfalen Funktion: langjähriger Bearbeiter von Aquaplaning-Bereichen; Anwendererfahrung mit WAFI (Wasserfilmdicken-Programm) von Kordt (Landschaftsverband Westfalen-Lippe der Straßen.NRW) nach der Theorie von Höcker (1971)

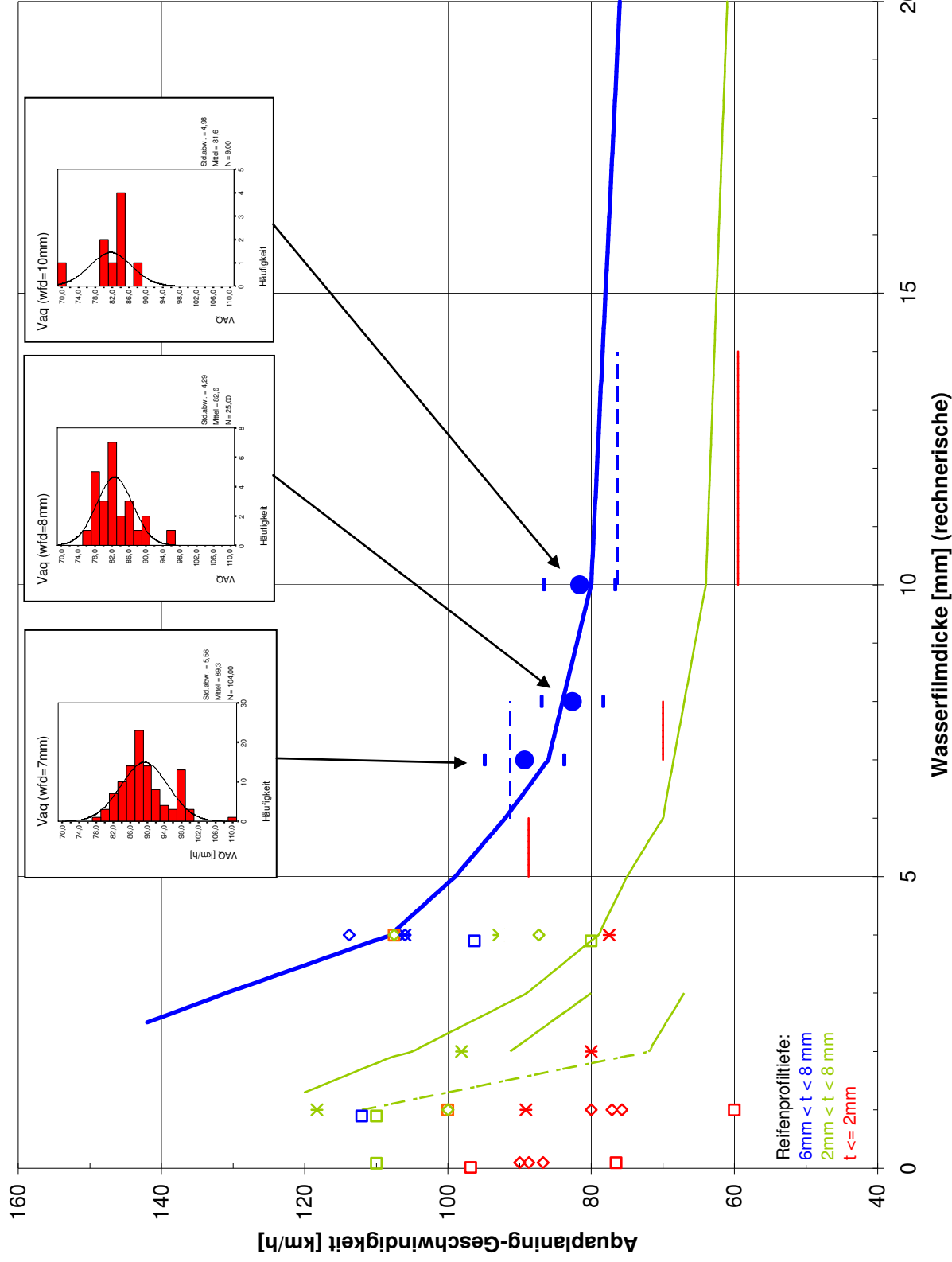
VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen
CFD	Computational Fluid Dynamics
DA	Datenarten; Standardisierte Datenaustauschformate in der Straßenplanung und der Geodäsie (z.B. DA001, DA055, DA066)
GKS	Gauss-Krüger-System
GMS	Gauckler-Manning-Strickler
GTÜ	Gesellschaft für technische Überwachung
LST	Landesstelle für Straßentechnik. Straßenbauverwaltung des Landes Baden-Württemberg
LV	Landesvermessungamt Baden-Württemberg
NASA	National Aeronautics and Space Administration (<i>Luft- und Raumfahrtbehörde der USA</i>)
ORS	Orthogonal-Rastersystem
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung

APPENDIX

APP. A AQUAPLANING-MODELLBILDUNG

App. A.1 Ergebnisse von Reibwertmessungen mit hohen Wasserfilmen / Aquaplaning-Messversuche



- Kälender (1989); Fahrbahnprofil, III; "Gebrauchter" Reifen, Reifenmemdruck: 1,5 bar
- Kälender (1989); Fahrbahnprofil, III; "Neue" Reifen, Reifenmemdruck: 1,5 bar
- Dames (1975); Profil: Reifen Phoenix P3, Profiltiefe ca. 8mm, Asphaltbeton 012
- Dames (1975); Profilfloser Reifen, Asphaltbeton 012
- Goadler (1980); Radlast: 450 kp, Reifenmemdruck 2,1 bar, Profilhöhe 3,84mm, Aquapl. bei m=0,15
- Goadler (1980); Radlast: 450 kp, Reifenmemdruck 2,1 bar, Profilhöhe 3,84mm, Aquapl. bei m=0,20
- ✗ Fach: 175/70 13 Hersteller A, 2mm Profil, Aqu bei m=0,15
- ✗ Fach: 175/70 13 Hersteller A, 5mm Profil, Aqu bei m=0,15
- ✗ Fach: 175/70 13 Hersteller A, 8mm Profil, Aqu bei m=0,15
- Aquaplaning-Tests (vgl. Tab.), MW L1=7mm
- Reifentests aus ams (Standardabweichung unten)
- Fach: 155/70 13, Hersteller A, 2mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- Fach: 155/70 13, Hersteller A, 5mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- Fach: 155/70 13, Hersteller A, 7mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller A, 2mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller A, 5mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller A, 8mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller B, 2mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller B, 2mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller B, 5mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller B, 8mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller C, 2mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller C, 5mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦ Fach: 225/45 ZR15, Hersteller C, 8mm Reifenprofiliefe, Aqu bei m=0,15
- ♦

App. A.1a Zusammenstellung der Versuchsparameter von Reibwertmessungen mit variiertem Wasserfilmdicke

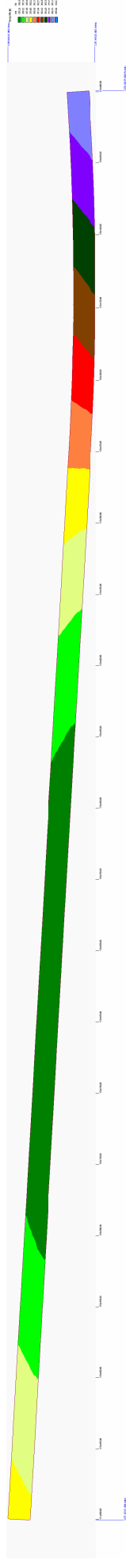
Autor, Erscheinungsjahr (Messreihe)	Radlast [kN]	Wasserfilmdicke [mm]	Wasserfilmdicke (Definition / Art der Annäherung)	Reifeninnendruck [bar]	Reifenhersteller und -typen	Reifenart	Mittlere Reifenprofil-tiefe [mm]
KALENDER, 1986 (Messgruppe C)	3,43	0,5 1,0 1,5 2,0	Rechnerisch / intern	1,5 2,0	PIARC (4 Längsrillen) PIARC (profillos) Phoenix P 110 Ti UniRoyal Ralley 180 UniRoyal Ralley 180 UniRoyal Ralley 280 UniRoyal Ralley 280 Continental TS 771 Continental TS 771 Michelin XZX Michelin XZX UniRoyal Ralley 280 UniRoyal Ralley 340	165 R 15 165 R 15 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 185 SR 13 205 HR 13	7,9 0 7,4 7,1 2,6 7,8 2,9 > 8,0 3,9 7,0 1,5 > 8,0 7,7
FACH, 1996 (Versuchsreihe 3)	2,5	0,1 0,2 1 2 4	Rechnerisch / intern	2,5	(Hersteller nicht angegeben)	175/70 13 155/70 13	2 5 8
SCHULZE, 1977	3,43	0,3 1,0	Rechnerisch / extern	1,5	Dunlop Sp 68 Continental Conti TS Dunlop Sp 57 Phoenix P 110 Ti UniRoyal Ralley 180 Fulda Rasant	165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13 165 SR 13	8 8 8 8 8 8
GNADLER, 1980	4,5	0,2 0,5 1,0 2,0 3,0	Rechnerisch / intern	2,1	Serienmäßige Gürtelreifen mit gleicher Profilstruktur und gleichem Negativanteil (Hersteller nicht angegeben)	185 HR 14 Stahl 185 HR 14 Textil	3,84
DAMES, 1975	3,5	0,3 0,6 0,9	Rechnerisch / intern	nicht angegeben	Phoenix P3		0 1 8
Reifentests	2,70 bis 4,02 (im Mittel 3,43)	7,0 8,0 10,0	Rechnerisch / extern	nicht angegeben	Diverse	Diverse	8 (4) (3)
Standardisierte Griffigkeitsmessungen	3,43	1,0	Rechnerisch / intern	1,5	PIARC (4 Längsrillen)	165 R 15	8

App. A.1b Übersicht über die ausgewerteten Reifentests

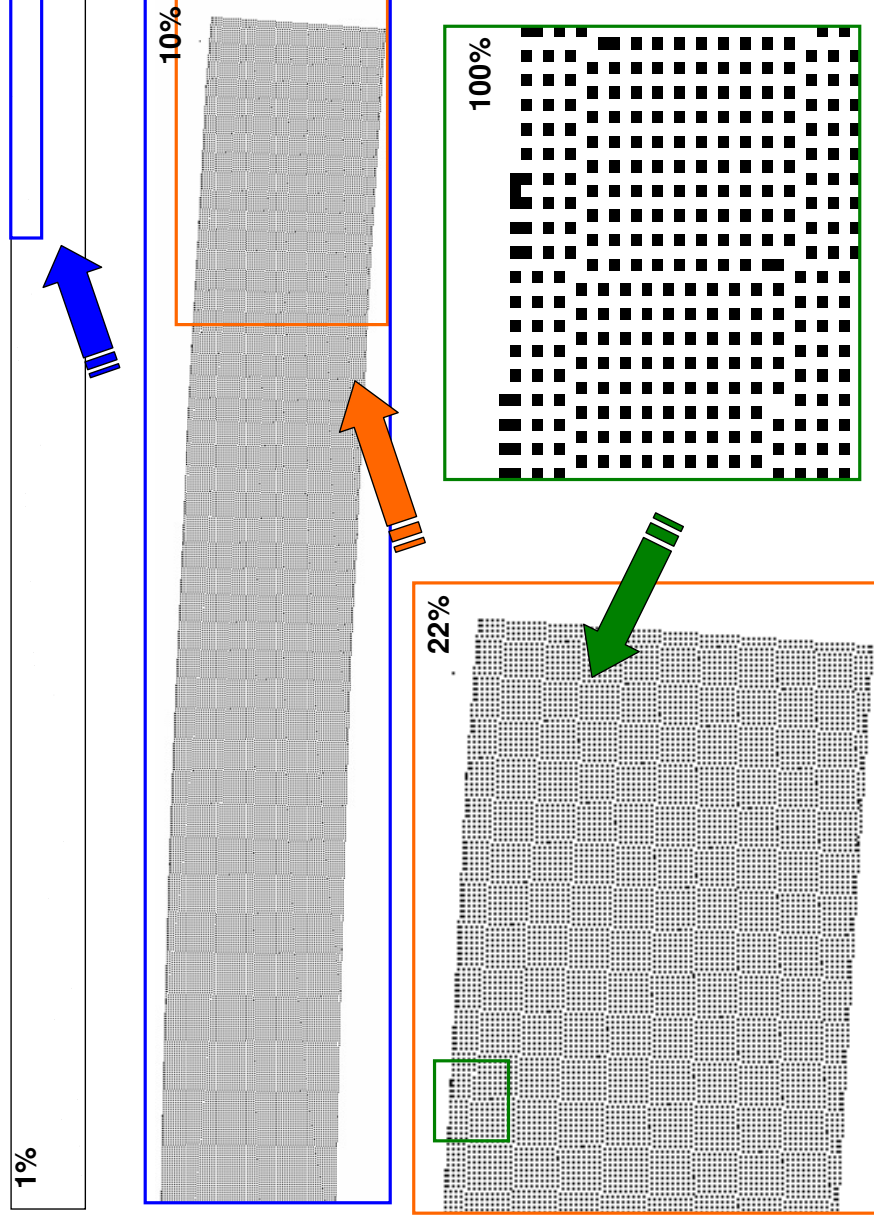
Test (Zeitschrift und Ausgabe)	n Testumfang (Anzahl untersuchter Reifentypen).	Reifengröße	WFD [mm] (l / q) l: WFD für das Längs- Aqua-Planing q: WFD für das Quer-Aqua-Planing	Messfahrzeug	Fahrzeuggewicht [kg] Fahrzeuggewicht aus Herstellerangaben ermittelt.	Ergebnisspektrum Aqua- planing längs [km/h]	Ergebnisspektrum Aqua- planing quer [m/s ²]
AMS 06/00	8	215/55 R16	8 / -	Mercedes E 320	1.745	78,1 – 82,0	2,61 – 4,13
AMS 06/01	9	205/55 R16	8 / -	Mercedes C 200	1.590	82,0 – 95,0	2,06 – 2,75
AMS 06/02	11	205/55 R16 W	10 / 7	BMW 325i	1.585	65,8 – 78,1	1,32 – 2,47
AMS 06/98	11	205/60 R15V	8 / 6	BMW 5er	1.625	84,0 – 92,7	3,79 – 5,04
AMS 06/99	10	205/55 R16	8 / -	BMW 328i	1.595	81,3 – 86,6	3,17 – 4,08
AMS 21/00	10	195/65 R15	8 / -	BMW 321i	1.565	95,7 – 101,9	3,07 – 4,22
AMS 21/01	9	195/65 R15T	8 / -	Audi A4 2.0	1.410	76,6 – 88,0	3,54 – 4,16
AMS 21/98	14	195/65 R15H	- / -	VW Golf V 5	1.300	84,8 – 92,3	1,61 – 2,02
AMS 21/99	8	185/65 R14T	- / -	Ford Focus	1.300	89,5 – 94,8	3,60 – 4,00
AMS 22/99	5	225/60 R16H	- / -	Mercedes S 430	1.955	80,7 – 87,1	3,50 – 4,10
Auto – Bild 11/01	12	205/55 R16	- / -	Mercedes C 200	1.590	83,3 – 86,1	4,01 – 4,42
Auto – Bild 11/02	13	195/65 R15H	10 / -	VW Golf	1.320	81,6 – 90,5	4,13 – 5,06
Auto – Bild 38/01	6	195/65 R15T	- / -	-	-	77,3 – 87,9	-
Auto – Bild 40/01	17	205/55 R15	- / -	Mercedes C 200	1.590	97,1 – 102,6	-
Auto – Zeitung 21/01	7	195/65 R15H	10 / -	BMW 325i	1.585	104,0 – 110,0	-
Auto – Zeitung 21/01	7	195/65 R15H	10 / -	VW Passat TDI	1.540	77,0 – 90,0	-
Auto – Zeitung 23/99	7	205/55 R16H	10 / 6	BMW 3er	1.565	80,1 – 87,1	-
Auto – Zeitung 07/99	8	195/65 R15H	7 / -	VW Bora 2.0	1.332	80,2 – 91,2	-
Auto – Zeitung 07/98	9	205/60 R15V	6 / 5	Alfa 156 1.8	1.440	80,0 – 85,0	-
Auto – Zeitung 23/98	8	195/65 R15T	10 / 6	Audi A3 TDI	1.285	72,0 – 84,2	-
Gute Fahrt 03/01	10	225/45 R17	7 / 6	Audi TT	1.380	77,7 – 84,4	3,37 – 4,17
Gute Fahrt 03/02	10	175/65 R13T	7 / 6	VW Lupo	1.015	77,6 – 89,2	3,62 – 4,47
Gute Fahrt 03/00	10	195/65 R15V	7 / 5	Passat Variant TDI	1.494	84,4 – 93,4	3,70 – 5,17
MOT 08/99	8	195/65 R15H	7 / -	Audi A3 1.8	1.285	82,5 – 90,9	-
MOT 08/99	8	205/65 R15V	7 / -	BMW 523i	1.625	85,1 – 109,0	-
MOT 08/99	8	155/70 R13T	7 / -	VW Polo 1.6	1.188	83,1 – 98,8	-
MOT 09/00	10	195/65 R15H	7 / 6	Audi A3 1.8 T	1.275	85,2 – 90,5	-
MOT 09/00	9	185/60 R14H	7 / 6	Seat Ibiza 1.4 16V	1.146	78,2 – 90,4	-
MOT 09/00	9	205/55 R16V	7 / 6	BMW 323 Ci	1.565	92,9 – 99,1	-
MOT 23/00	10	195/65 R15T	10 / 6	VW Golf V5	1.300	82,1 – 89,8	3,77 – 4,48
MOT 23/00	9	185/60 R14T	10 / 6	Skoda Fabia 1.4	1.210	74,4 – 93,4	3,02 – 3,76
MOT 23/99	6	195/65 R15	- / -	BMW 320i	1.565	89,6 – 97,4	3,86 – 4,36
MOT 23/99	6	195/65 R15	- / -	VW Passat	1.570	77,1 – 84,3	3,84 – 4,55
MOT 24/01	9	195/65 R15T	- / -	Audi A4 2.0	1.450	79,6 – 88,0	3,54 – 4,16
MOT 09/97	3	175/70 R13T	10 /	VW Golf	1.320	70,9 – 81,1	-
MOT 09/97	3	205/50 R15	10 /	VW Golf	1.320	60,1 – 69,7	-

APP. B BASISDATEN

App. B.1 Topologie (Höhen) Modellierungsbereich (aus Ursprungsdaten)



App. B.2 Rasterauflösung



App. B.3

PLANUS-Modul „Parametrisierung“

Querschnitt und Drehachse | Querneigungsdaten | Höhenplan | Lageplan

Querneigungen

Querneigung [%]	Station (B+km)	Station (rel)	Höhe z [m] (Gradiente)	Q
-2	Q -2 [%] 3,490	-266,45	368,32	<input type="radio"/>
-1	Q -1 [%] 3,490	-95,21	363,51	<input type="radio"/>
0	Q 0 [%] 0,000	0	360,83	<input type="radio"/>
1	Q +1 [%] -2,360	56,79	359,28	<input type="radio"/>
2	Q +2 [%] -2,360	733,55	359,42	<input type="radio"/>

VWB verschoben auf [km]

Querschnitte

linker Fahrbahnrand | rechter Fahrbahnrand

Anrampungseigungen

-1 Anrampungseigung -1 (von q-2 auf q-1) [%]: 0,0000

0 Anrampungseigung 0 (von q-1 auf q0) [%]: 0,2813

1 Anrampungseigung 1 (von q0 auf q1) [%]: 0,3081

2 Anrampungseigung 2 (von q1 auf q2) [%]: 0,0000

Verwindungstyp

Standardverwindung

Schrägverwindung (Wandelnder Grat)

Querschnitt und Drehachse | Querneigungsdaten | Höhenplan | Lageplan

Fahrbahnquerschnitt

FBQ-Datei: planus_standardfbq

FBQ-Datei laden | FBQ-Datei editieren

Fahrspuren

Fahrspuren einblenden

Fahrzeug Spurbreite [m]: 1,65

RO.35.5mod(BAB A8) (S. Hermann)

U 0,00m, F 0,00m, F 0,37m

F 0,37m

Drehachse

F 4,00m

R 6,26m, S 2,50m

U 0,00m

15,35 Fahrbahnbreite B [m]

7,675 Breite links der Drehachse Bl [m]

0,5000 Drehachsenanordnung [-]

7,675 Breite rechts der Drehachse Br [m]

Querschnitt und Drehachse | Querneigungsdaten | Höhenplan | Lageplan

Längsneigungen

2,8100 Längsneigung s0 [%]

1,5900 Längsneigung s1 [%]

0,0000 Längsneigung s2 [%]

Tangentschnittpunkte

Tangentschnittpunkt 1 berücksichtigen

Beginn-Ausrundung: km 170+273,58

Ende-Ausrundung: km 170+853,80

170,56369 Station [km]

352,48 Höhe [m]

13187 Ausrundungshalbmesser H [m]

290,11 Tangentenlänge T [m]

3,1912 Stich f [m]

Tangentschnittpunkt 2 berücksichtigen

Station [km]

Höhe [m]

Ausrundungshalbmesser H [m]

Tangentenlänge T [m]

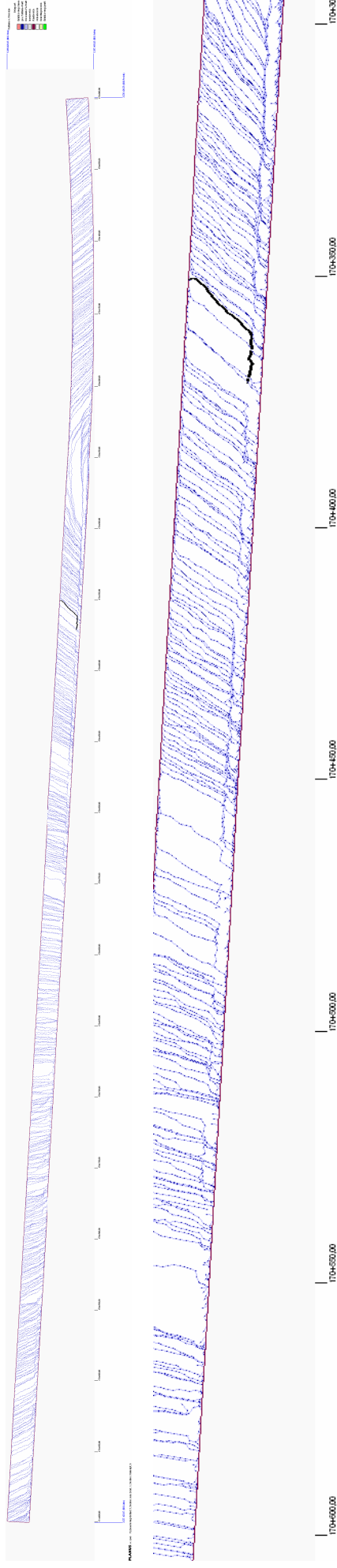
Stich f [m]

Überhöhungsmaßstab Höhenplan: 10,0

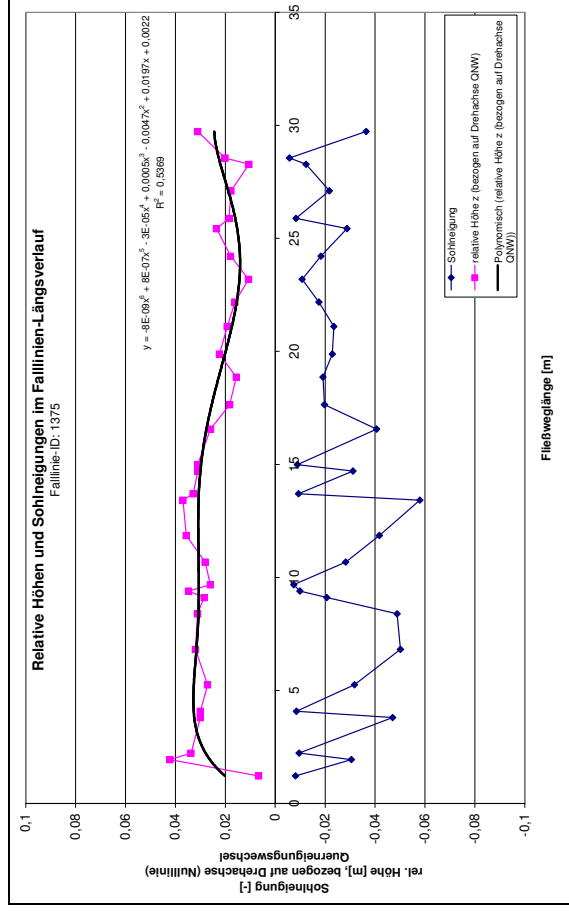
APP. C ANALYSE OHNE-FALL

App. C.1 Exemplarische Falllinienverläufe Lageplan

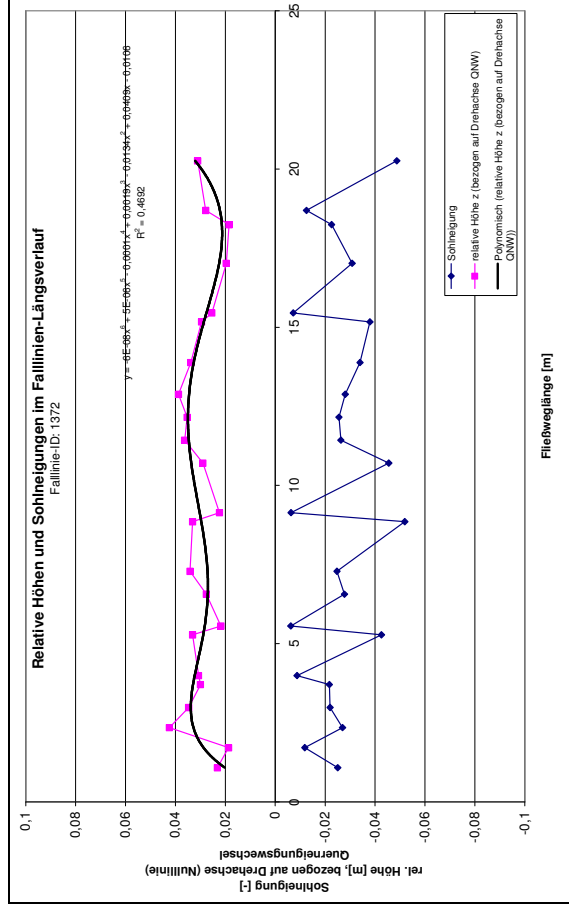
Falllinien Nr. 1375 (Länge: 29,73 m, 31 Segmente, Start: 3386/196; Ende: 3274/257 (m/n))



Falllinien Nr. 1375



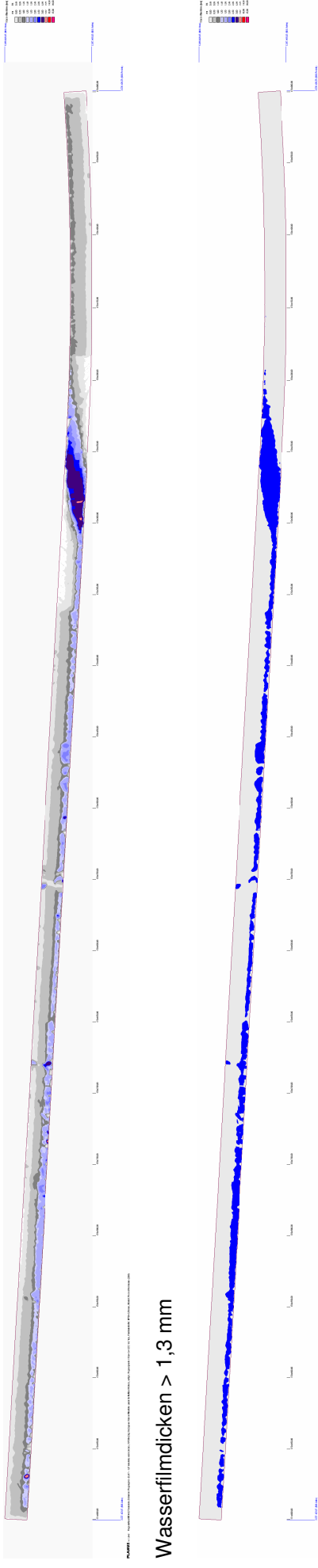
Falllinien Nr. 1372



App. C.2 Analyse Ohne-Fall, Regenhäufigkeit n = 1

App. C.2a Wasserfilmdicken

Wasserfilmdicken gesamt

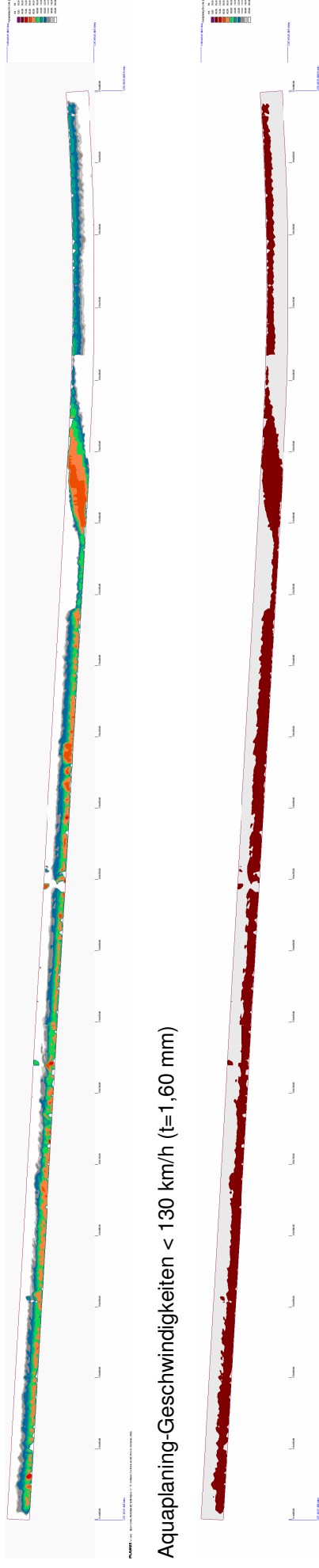


Wasserfilmdicken > 1,3 mm

79.342 von 393.624 Punkten über Grenzwert, entspricht 3.196,88 m² bzw. 20,16% der Modellierungsbereichsfläche

App. C.2b Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t=1,60 mm)

Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

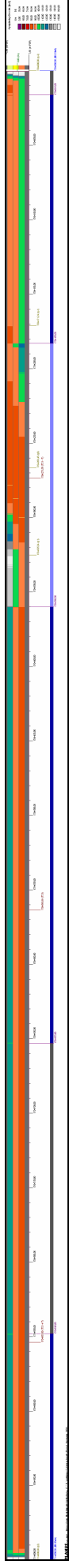


Aquaplaning-Geschwindigkeiten < 130 km/h (t=1,60 mm)

160.971 von 393.624 Punkten über Grenzwert, entspricht 6.485,91 m² bzw. 40,89% der Modellierungsbereichsfläche

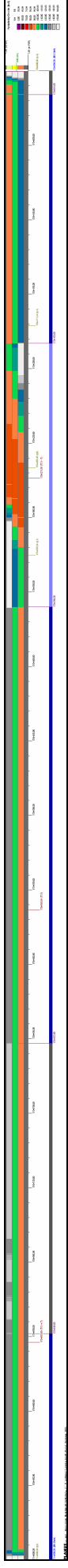
App. C.3 Fahrstreifenbezogene Aquaplaning-Geschwindigkeiten Ohne-Fall (Grooving 7/7/31 im Bereich km 170+360 bis km 170+183)

Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129$ l/(s·ha), $i = 4,0508$ mm/min)



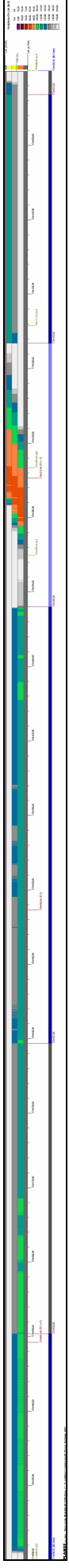
Fahrstreifen 1: min Vaq = 81,1 km/h bei km 170+278,00 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 80,7 km/h bei km 170+287,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 80,1 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287$ l/(s·ha), $i = 1,3457$ mm/min)



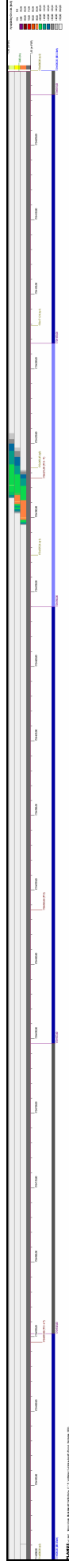
Fahrstreifen 1: min Vaq = 83,1 km/h bei km 170+277,30 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 82,8 km/h bei km 170+287,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 81,9 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7$ l/(s·ha), $i = 0,7542$ mm/min)



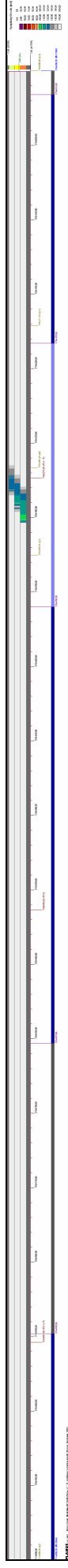
Fahrstreifen 1: min Vaq = 87,4 km/h bei km 170+278,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 86,9 km/h bei km 170+286,60 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 85,6 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77$ l/(s·ha), $i = 0,3586$ mm/min)



Fahrstreifen 1: min Vaq = 100,4 km/h bei km 170+278,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 98,4 km/h bei km 170+289,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 95,3 km/h bei km 170+300,00

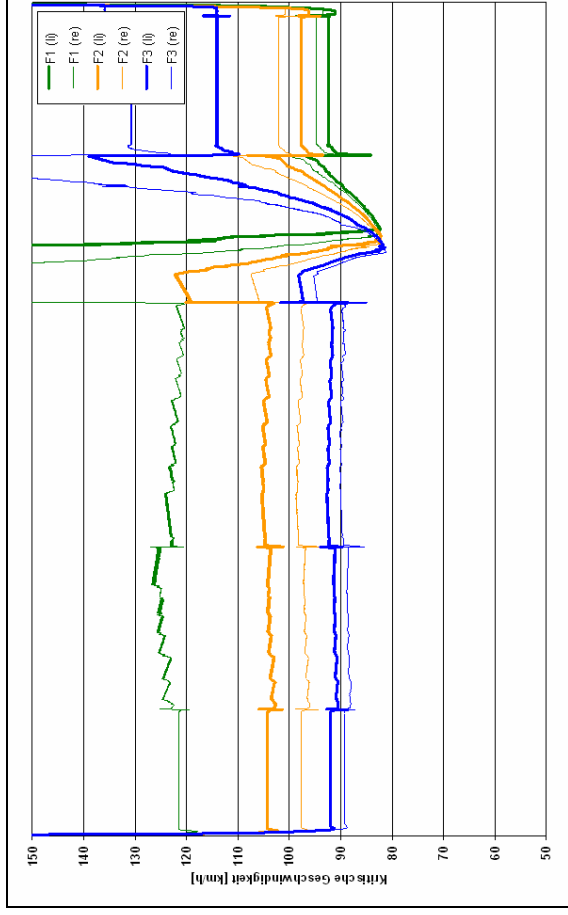
Regenhäufigkeit $n = 10$ ($r = 38,60$ l/(s·ha), $i = 0,2316$ mm/min)



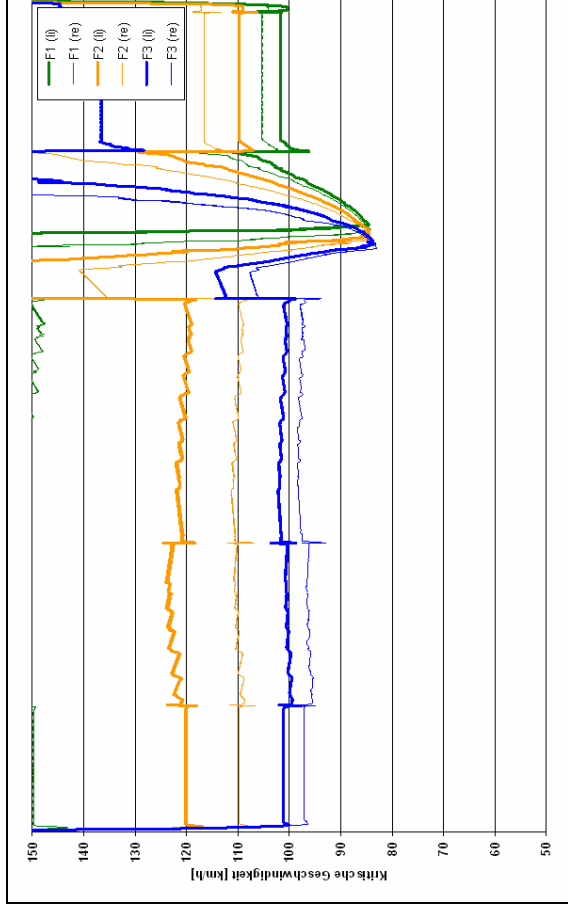
Fahrstreifen 1: min Vaq = 121,2 km/h bei km 170+281,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 116,2 km/h bei km 170+290,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 108,0 km/h bei km 170+301,20

App. C.4 Radspuren Ohne-Fall (Grooving 7/7/31 im Bereich km 170+360 bis km 170+183)

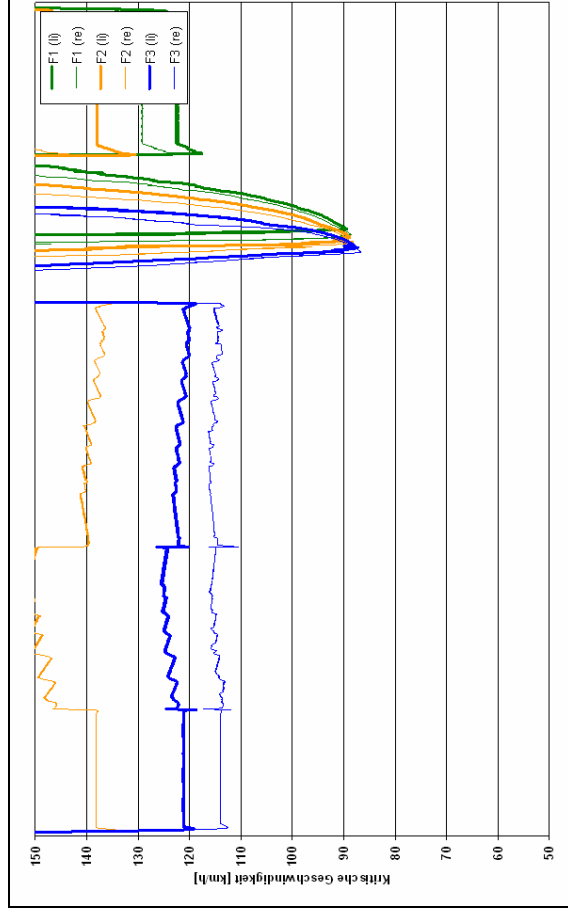
Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 4,0508 \text{ mm/min}$



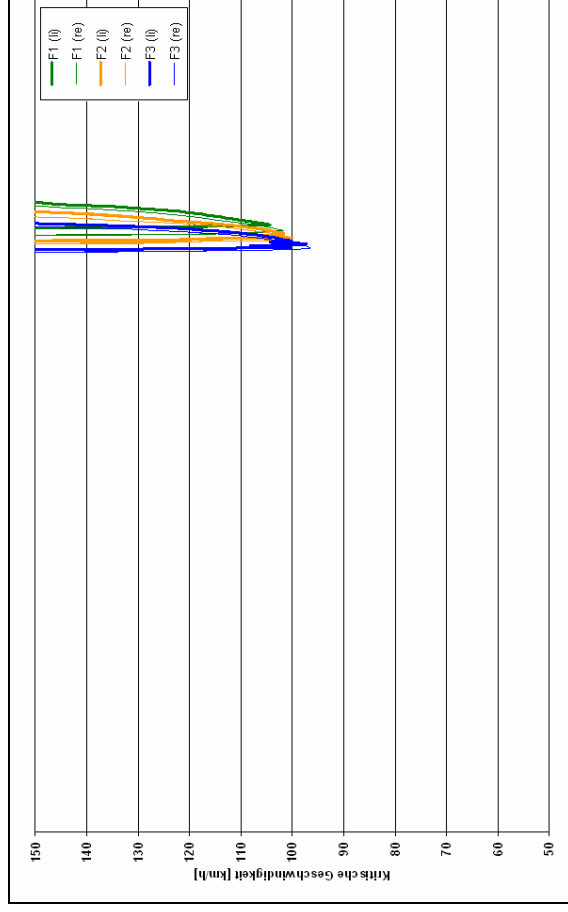
Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$



Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$

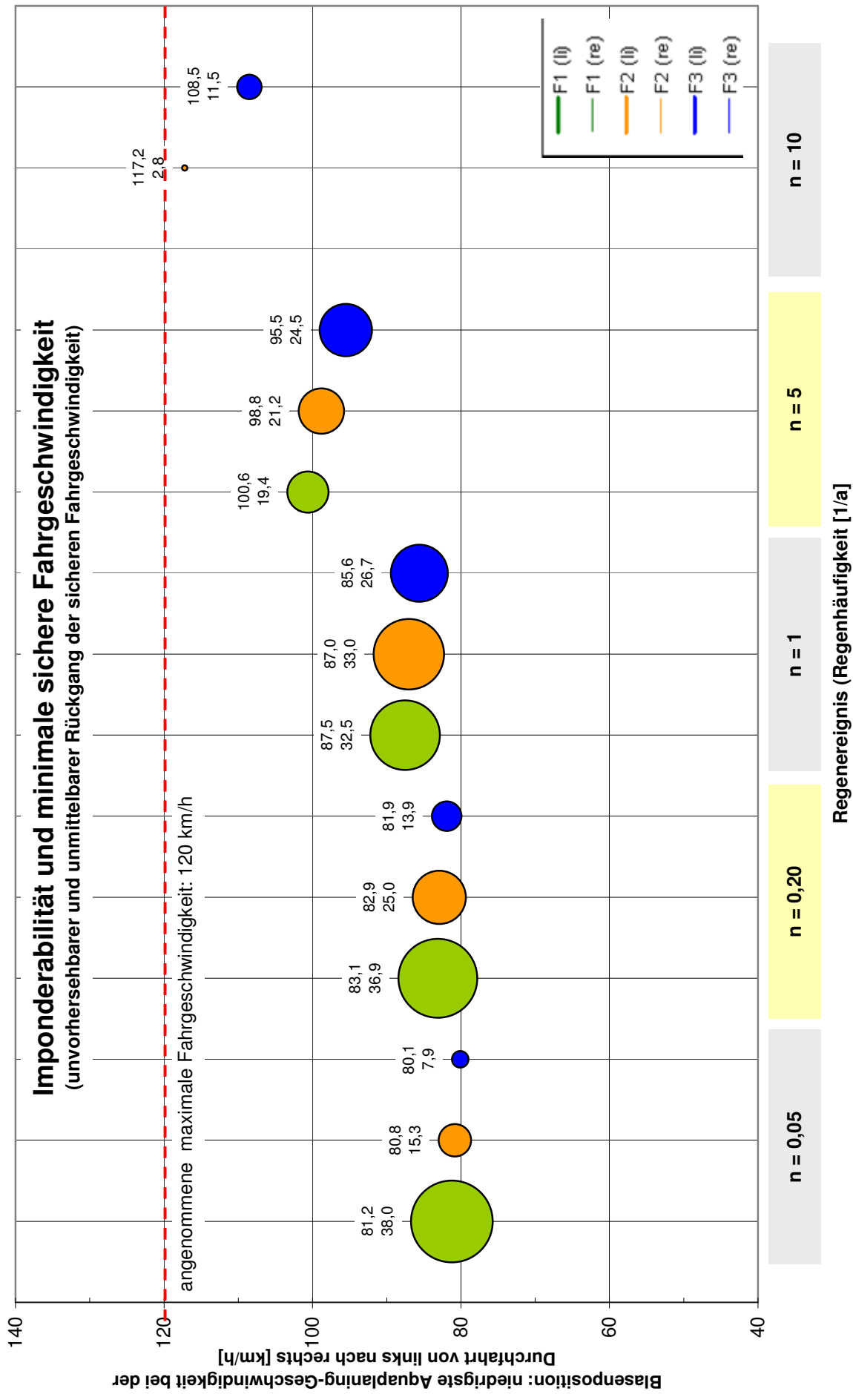


Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,3586 \text{ mm/min}$

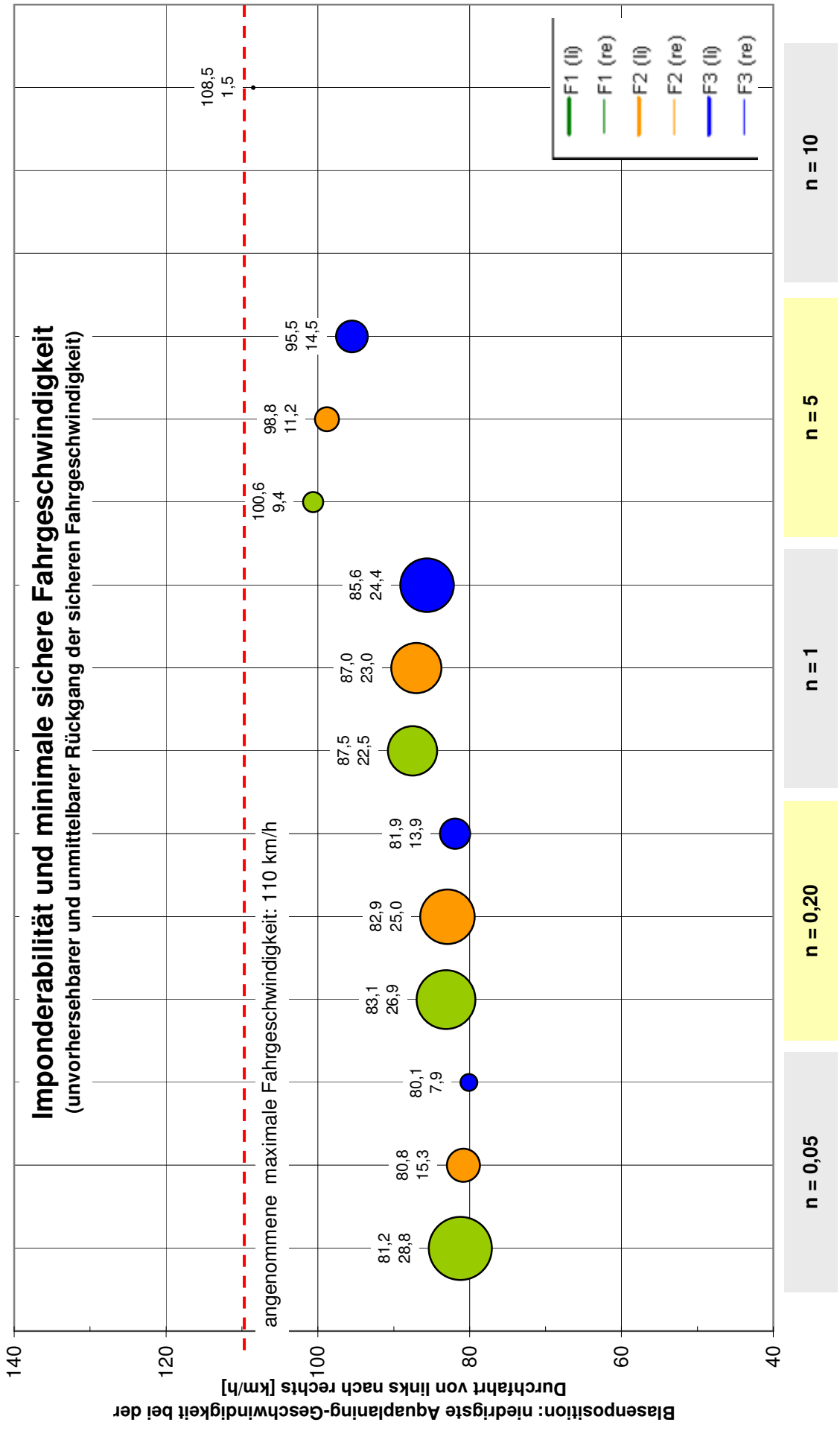


App. C.5 Imponderabilität

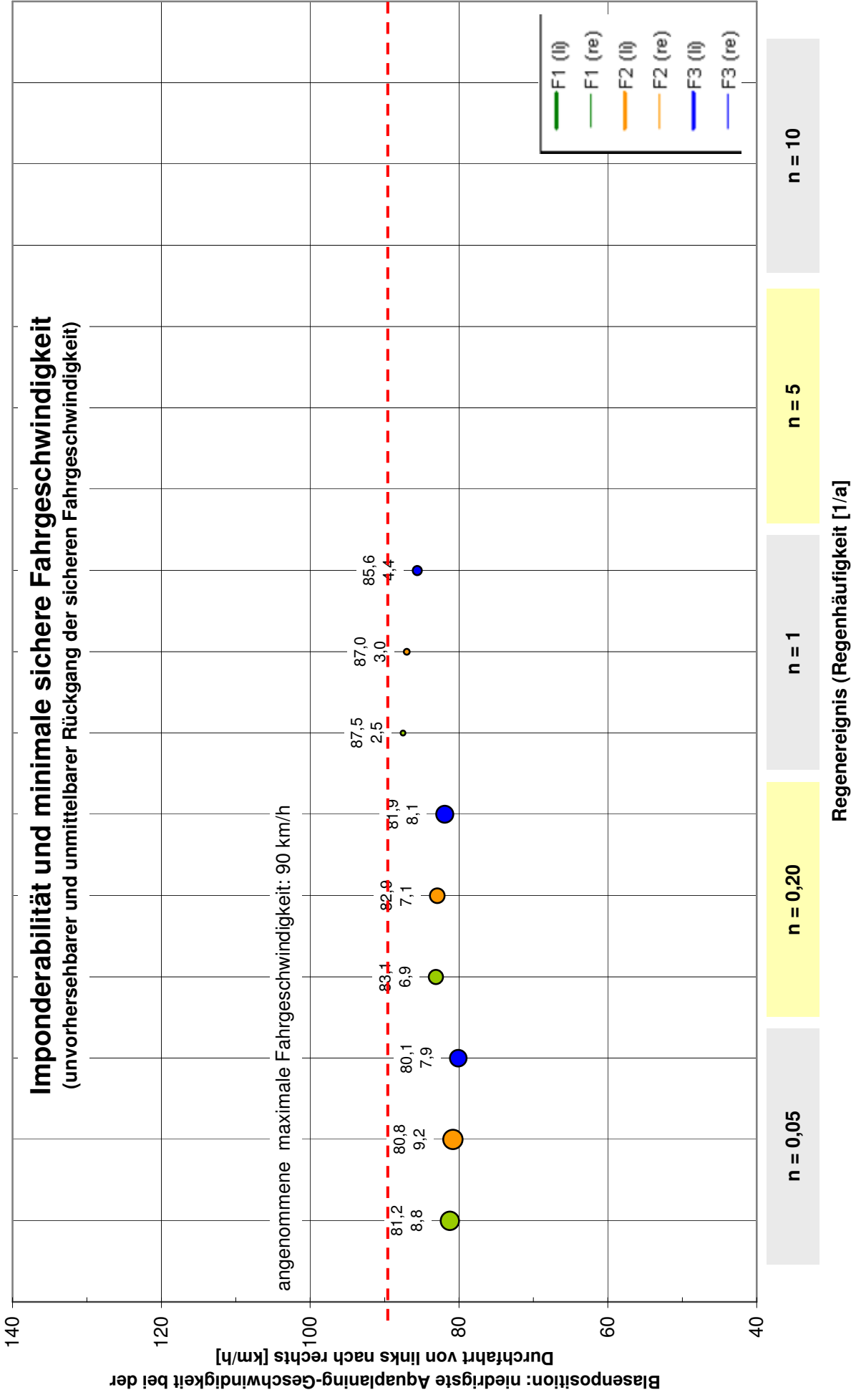
App. C.5a Imponderabilität für $V_{zul} = 120 \text{ km/h}$; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mindest-Aquaplaning-Geschwindigkeit



App. C.5b Imponderabilität für $V_{zul} = 110 \text{ km/h}$; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mindest-Aquaplaning-Geschwindigkeit

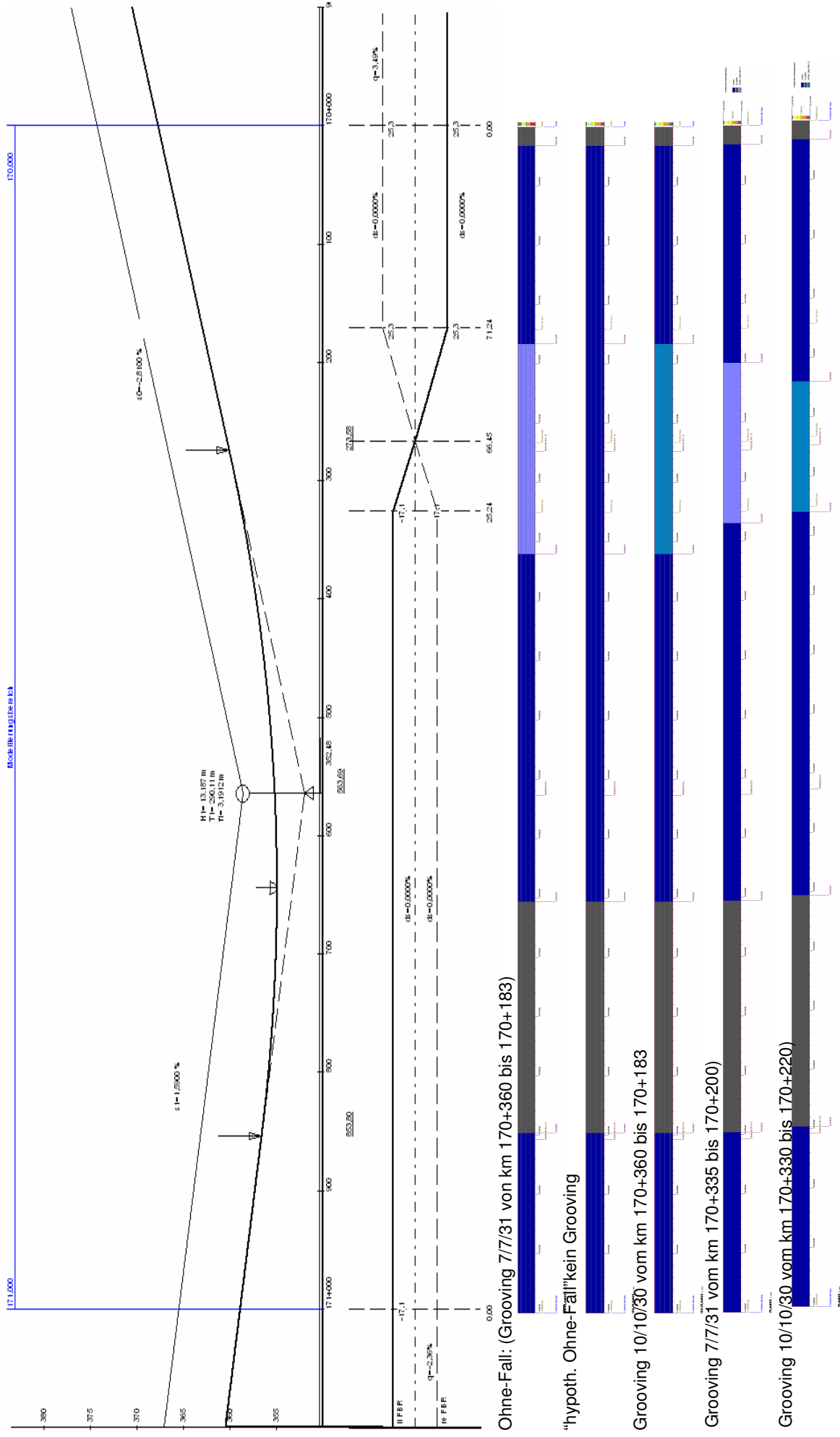


App. C.5c Imponderabilität für $V_{zul} = 90 \text{ km/h}$; Aquaplaning-Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich und absolute Mindest-Aquaplaning-Geschwindigkeit



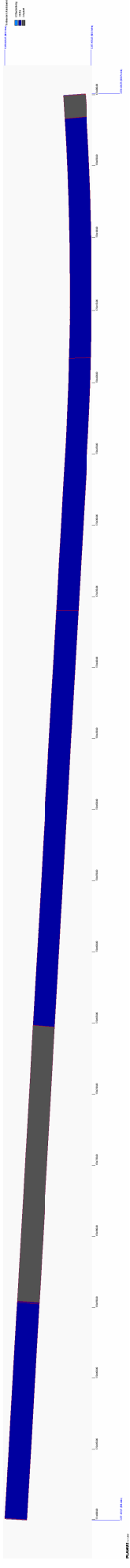
APP. D GROOVING-MABNAHMEN

App. D.1 Höhenplan, Querneigungsband und Texturmodelle der untersuchten Grooving-Pattern

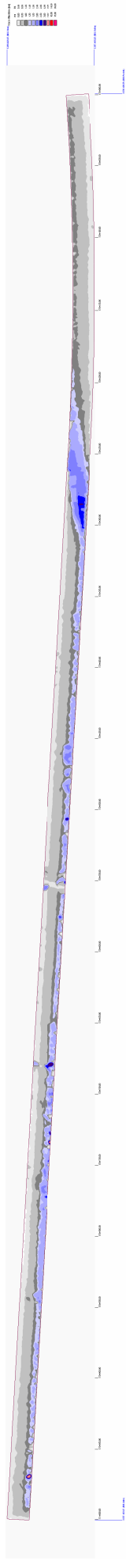


App. D.2 Hypothetischer Ohne-Fall (kein Grooving)

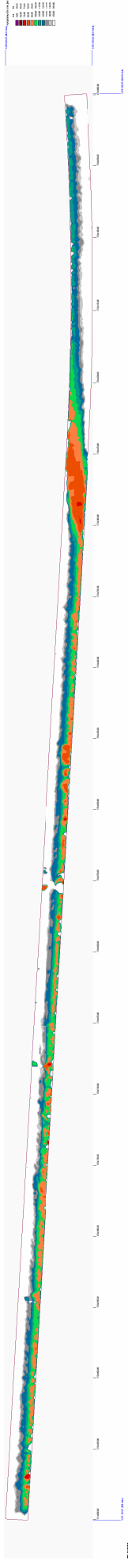
App. D.2a Texturmodell



App. D.2b Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,7542 \text{ mm/min}$) Wasserfilmdicken



Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)



Differenzen der Wasserfilmdicken (Ohnefall – Ohnefall [hypothetisch])

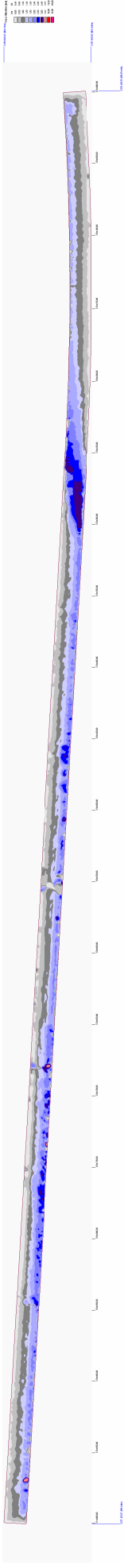


Differenzen der Aquaplaning-Geschwindigkeiten (Ohnefall – Ohnefall [hypothetisch])

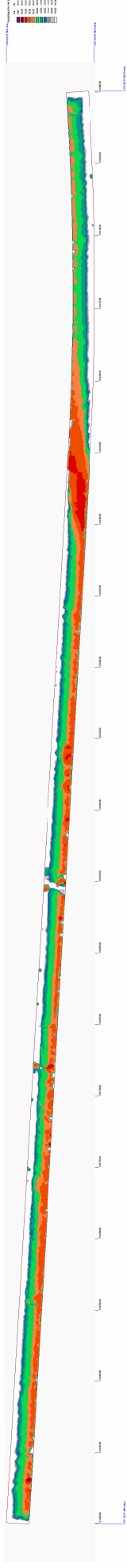


App. D.2c Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$

Wasserfilmdicken

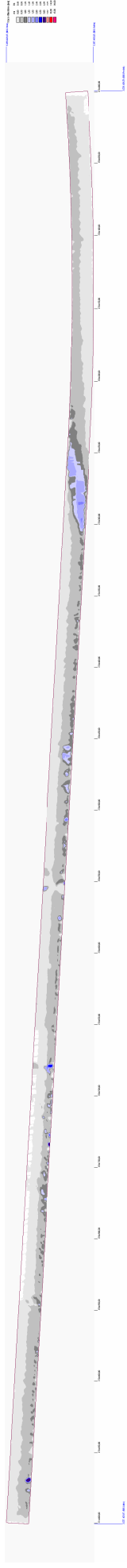


Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)

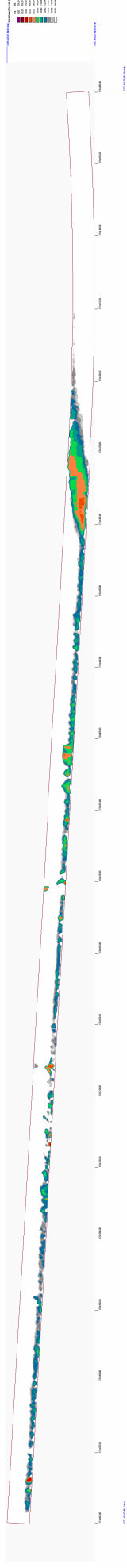


Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,3586 \text{ mm/min}$

Wasserfilmdicken



Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)

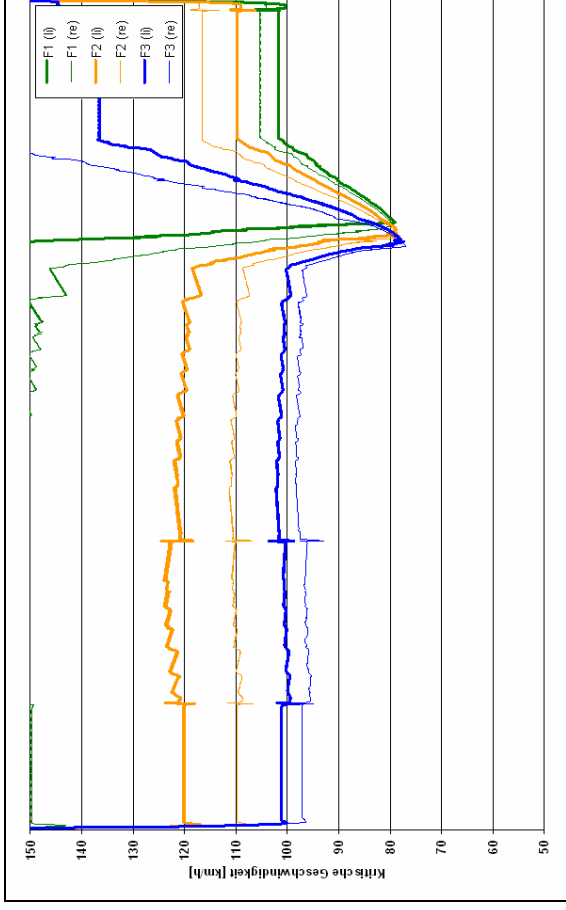


App. D.2d Radspuren für Hypothetischer Ohne-Fall (kein Grooving)

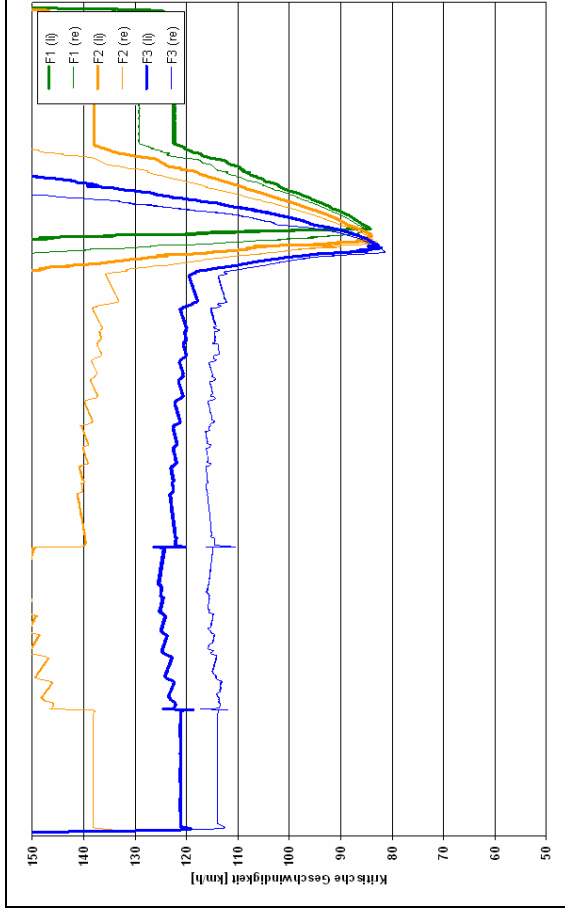
Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 4,0508 \text{ mm/min}$



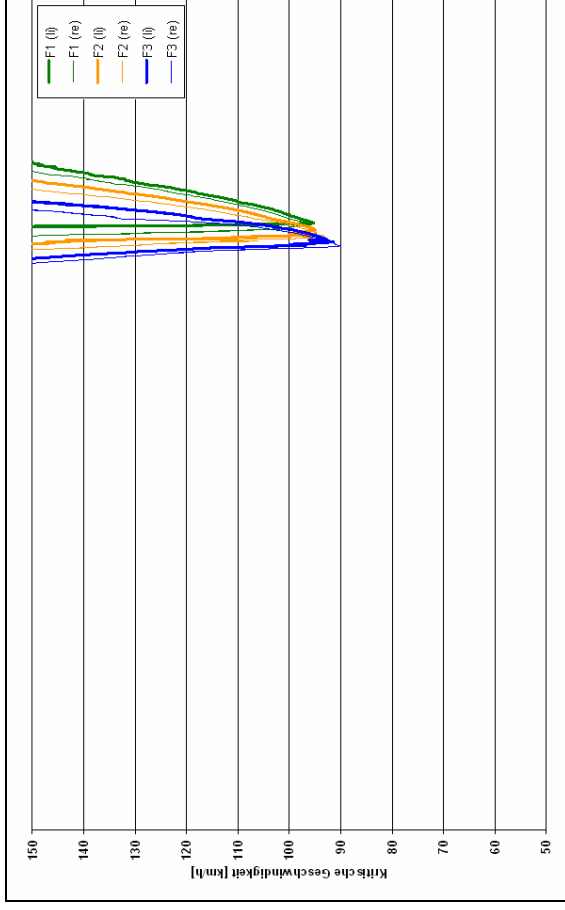
Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$



Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$

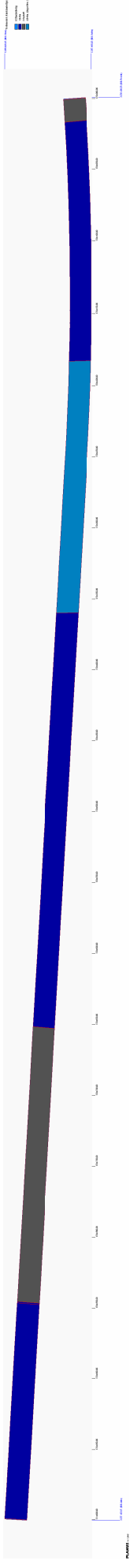


Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,3586 \text{ mm/min}$

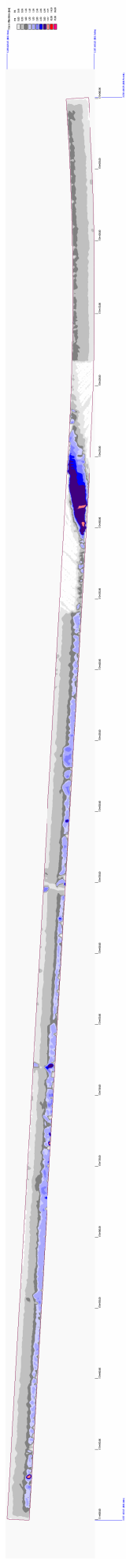


App. D.3 Alternative: Grooving 10/10/30 im Bereich km 170+360 bis km 170+183

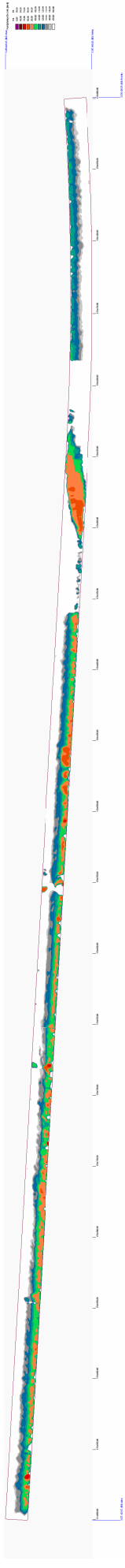
App. D.3a Texturmodell



App. D.3b Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$ Wasserfilmdicken



Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)



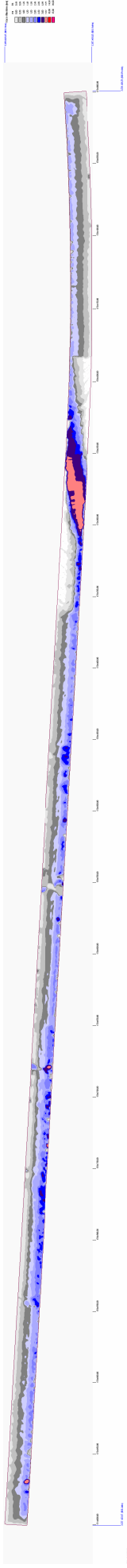
Differenz der Wasserfilmdicken



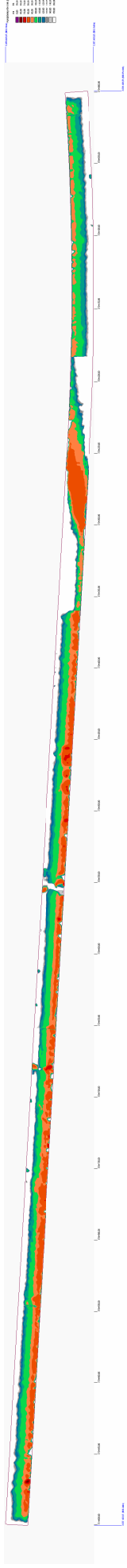
Differenzen der Aquaplaning-Geschwindigkeiten



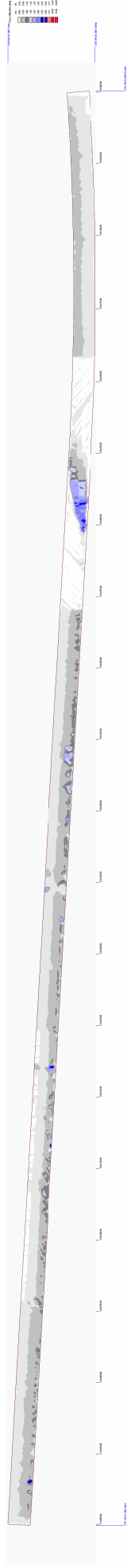
App. D.3c Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$
 Wasserfilmdicken



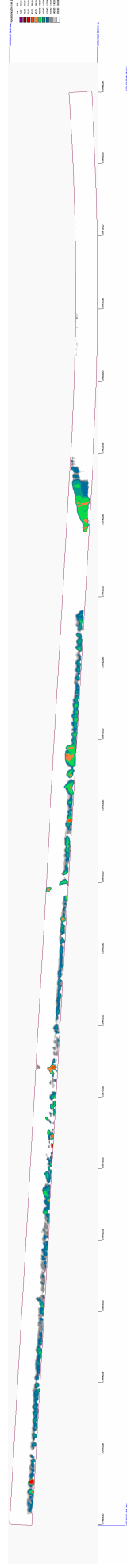
Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)



App. D.3d Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,3586 \text{ mm/min}$
 Wasserfilmdicken

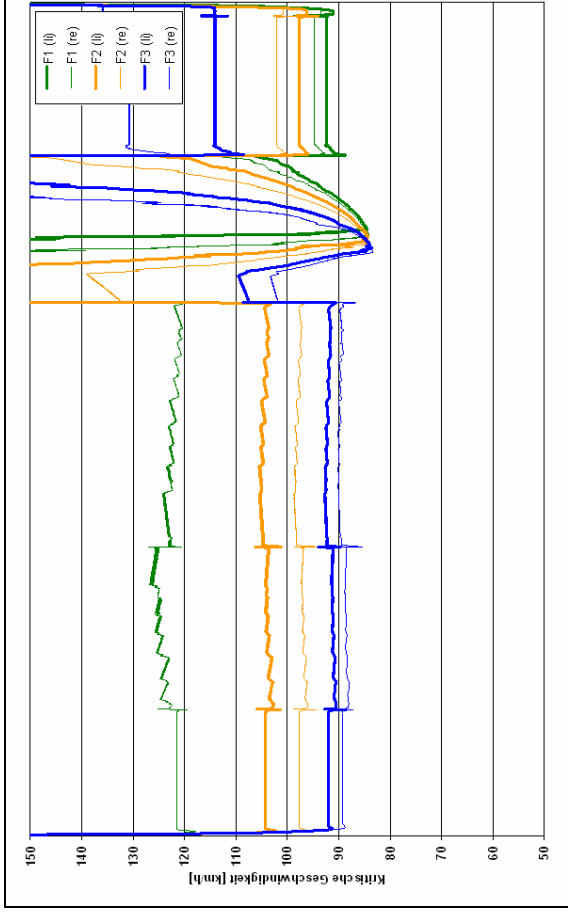


Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)

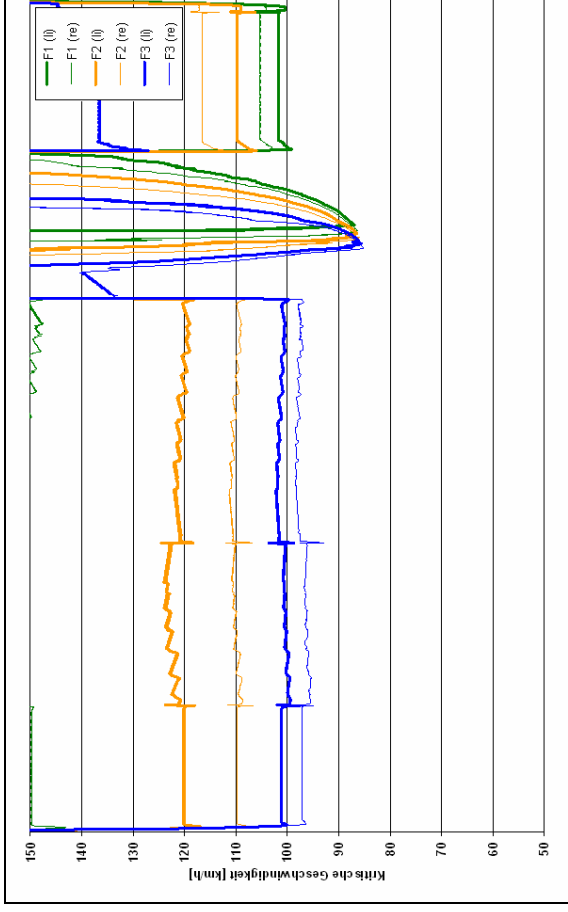


App. D.3e Radspuren für Grooving 10/10/30 im Bereich km 170+360 bis km 170+183

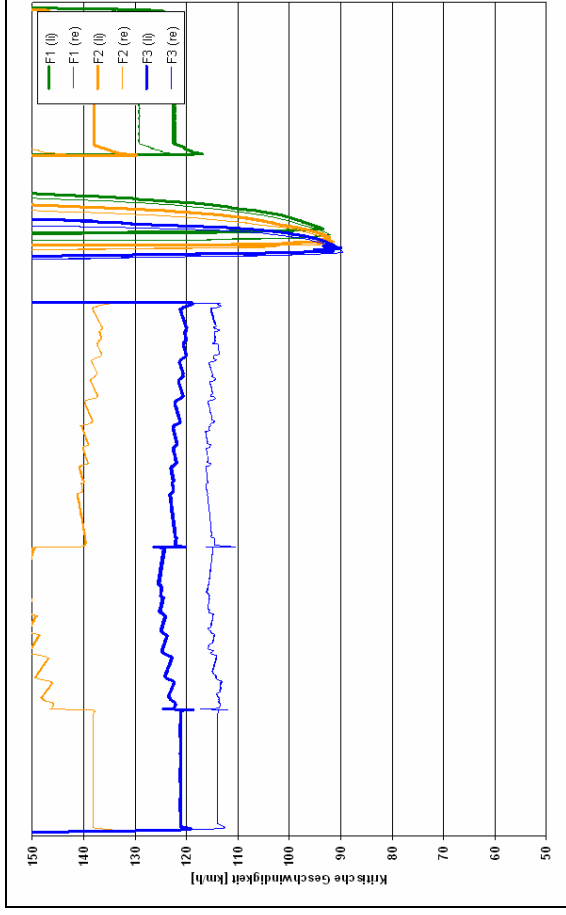
Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 4,0508 \text{ mm/min}$



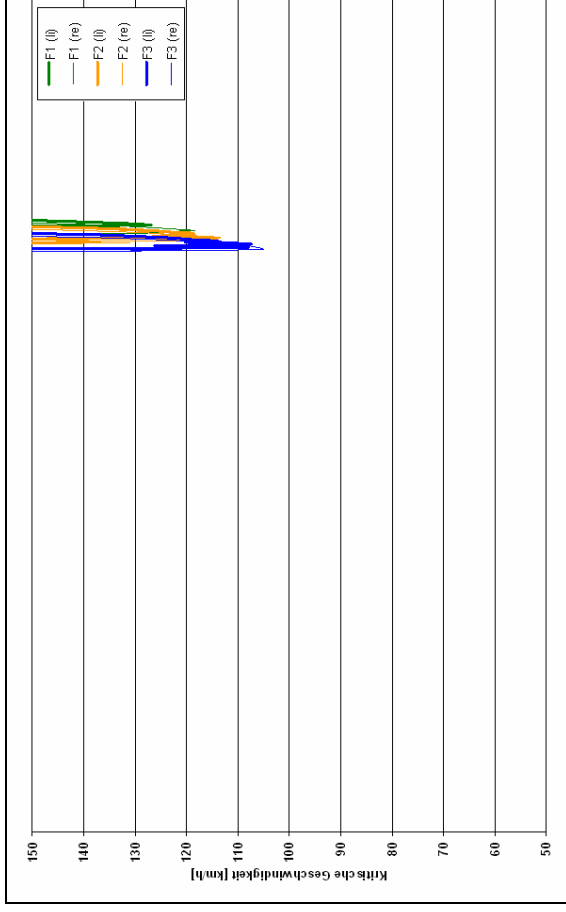
Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$



Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$

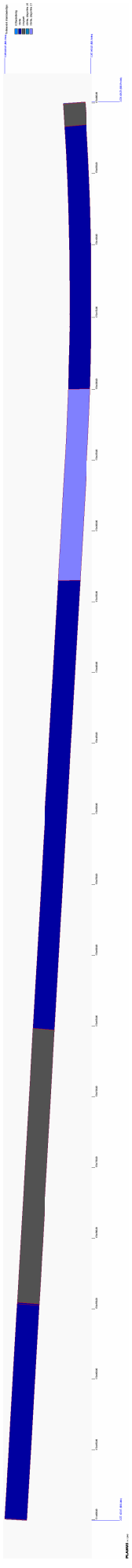


Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,3586 \text{ mm/min}$

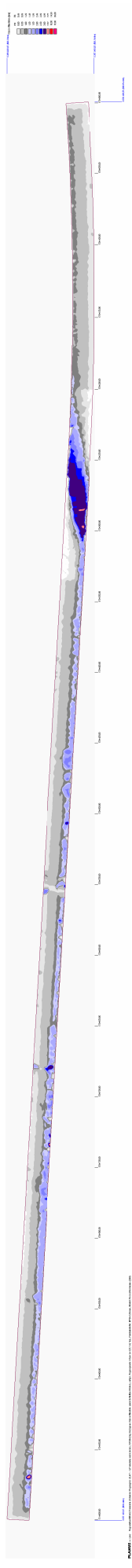


App. D.4 Grooving 7/7/31 im Bereich km 170+335 bis km 170+200

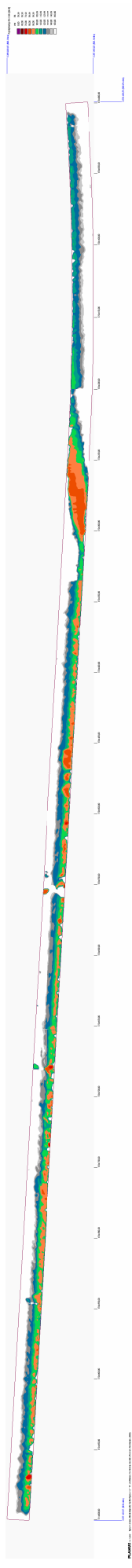
App. D.4a Texturmodell



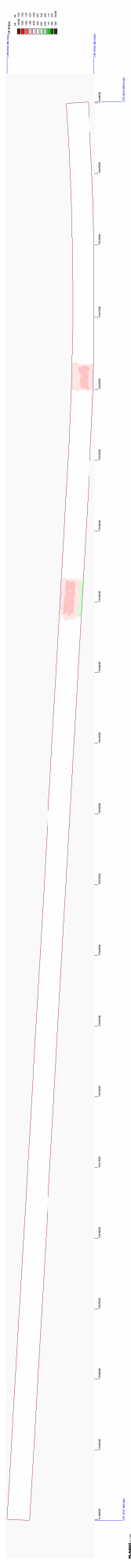
App. D.4b Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,7542 \text{ mm/min}$) Wasserfilmdicken



Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)



Differenz der Wasserfilmdicken

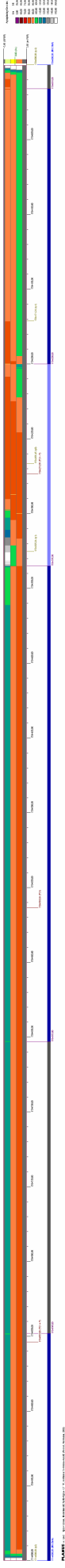


Differenzen der Aquaplaning-Geschwindigkeiten



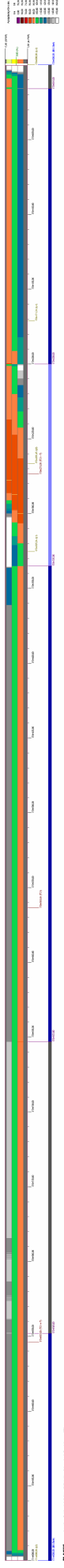
App. D.4c Fahrstreifenbezogene Aquaplaning-Geschwindigkeiten für „Grooving 7/7/31 im Bereich km 170+335 bis km 170+200“

Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 4,0508 \text{ mm/min}$)



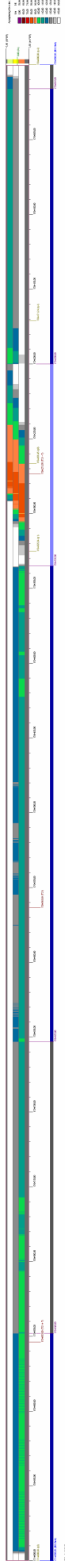
Fahrstreifen 1: min Vaq = 80,4 km/h bei km 170+199,80 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 80,7 km/h bei km 170+287,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 80,1 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 1,3457 \text{ mm/min}$)



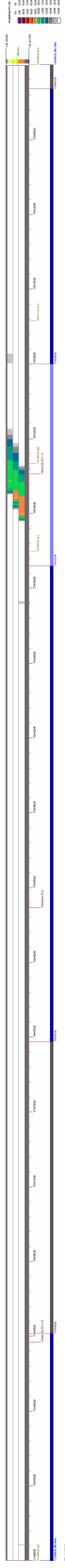
Fahrstreifen 1: min Vaq = 83,1 km/h bei km 170+277,30 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 82,8 km/h bei km 170+287,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 81,9 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,7542 \text{ mm/min}$)



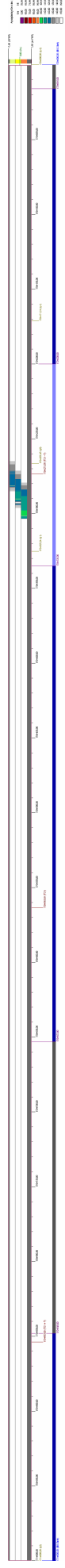
Fahrstreifen 1: min Vaq = 87,4 km/h bei km 170+278,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 86,9 km/h bei km 170+286,60 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 85,6 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,3586 \text{ mm/min}$)



Fahrstreifen 1: min Vaq = 100,4 km/h bei km 170+278,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 98,4 km/h bei km 170+289,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 95,3 km/h bei km 170+300,00

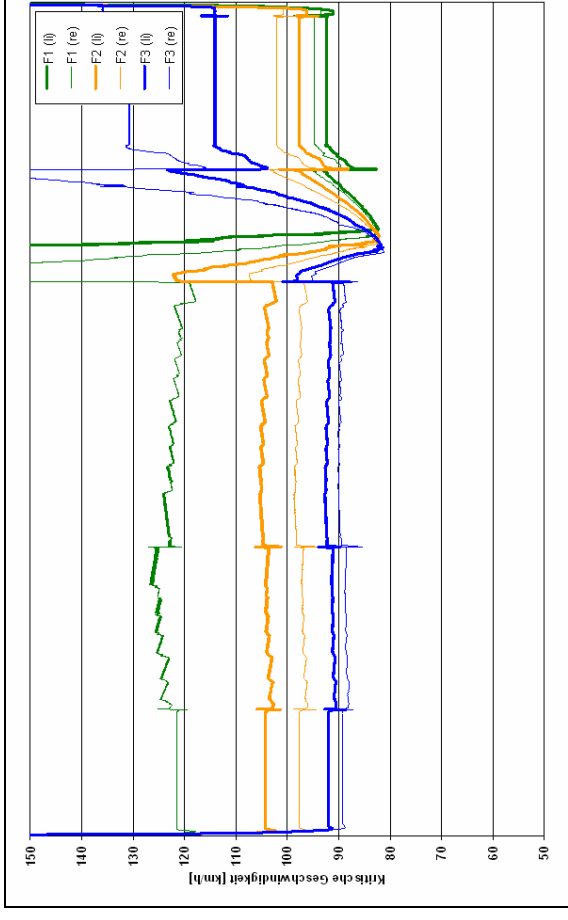
Regenhäufigkeit $n = 10$ ($r = 38,60 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,2316 \text{ mm/min}$)



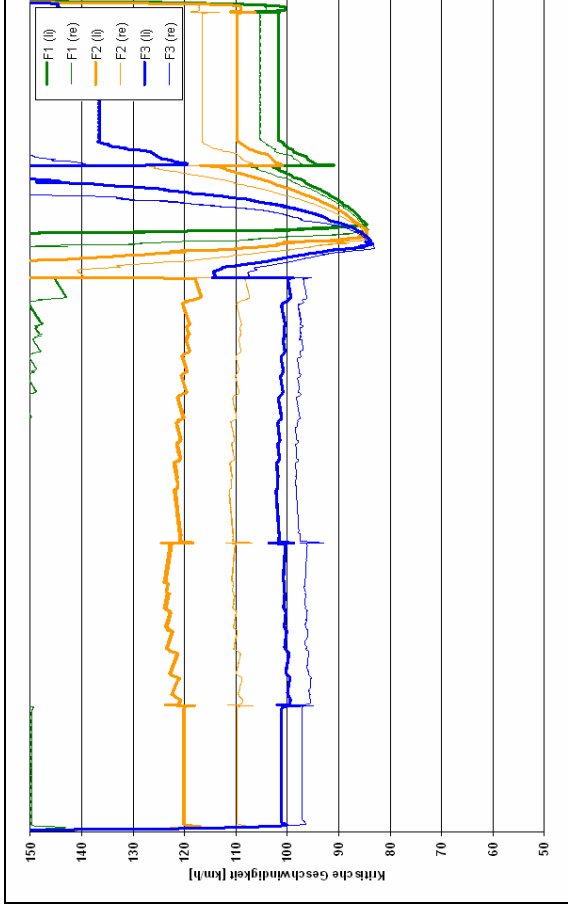
Fahrstreifen 1: min Vaq = 121,2 km/h bei km 170+281,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 116,2 km/h bei km 170+290,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 108,0 km/h bei km 170+301,20

App. D.4d Radspuren für Grooving 7/7/31 im Bereich km 170+300 bis km 170+235

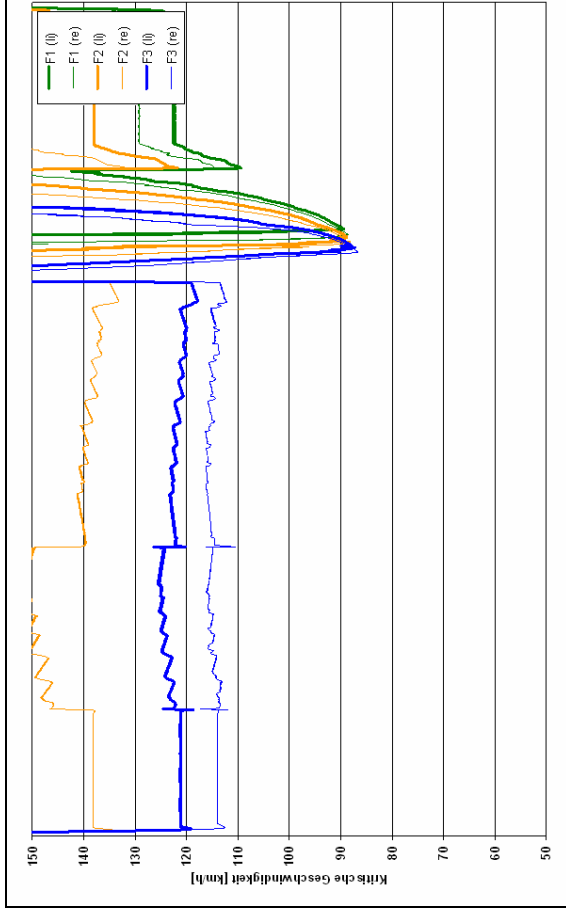
Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 4,0508 \text{ mm/min}$



Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$

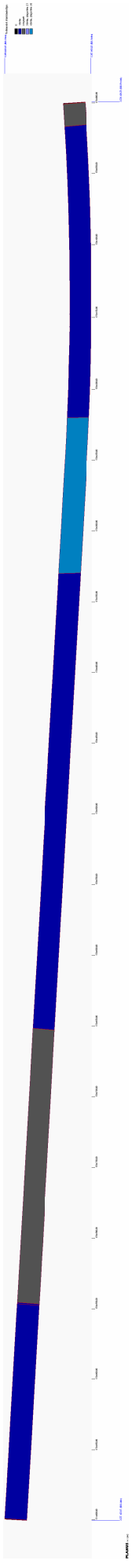


Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$

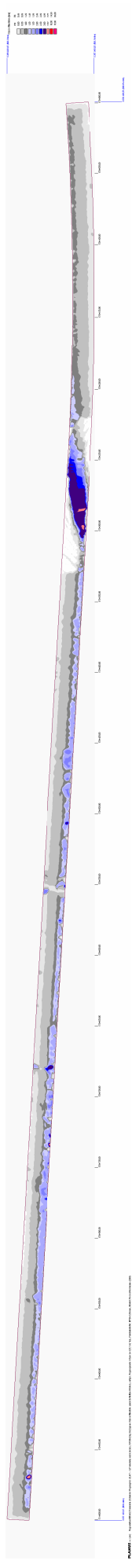


App. D.5 Grooving 10/10/30 im Bereich km 170+330 bis km 170+220

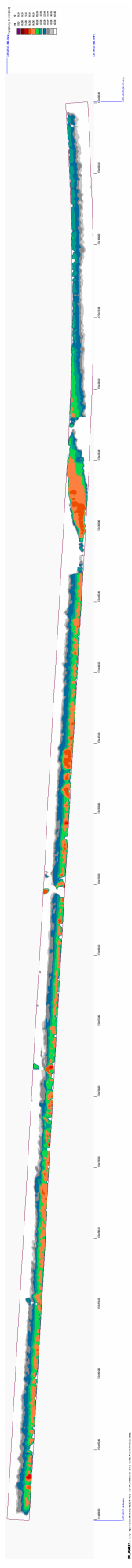
App. D.5a Texturmodell



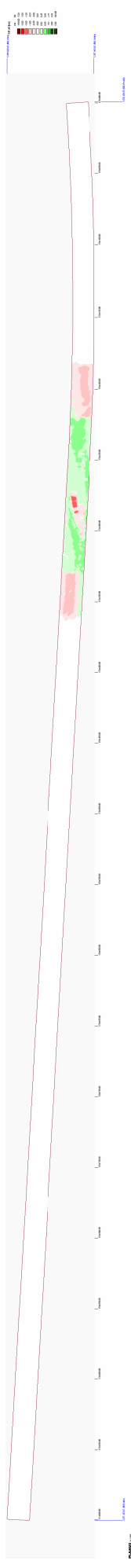
App. D.5b Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$ Wasserfilmdicken



Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$)



Differenzen Wasserfilmdicken ($WFD_1 - WFD_0$)

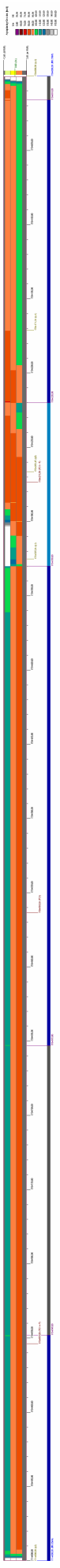


Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($t = 1,60 \text{ mm}$) ($V_1 - V_0$) | nur, falls $V_0 \leq 130 \text{ km/h}$)



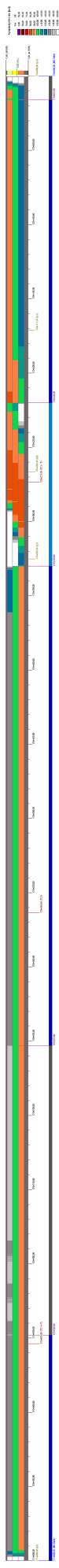
App. D.5c Fahrstreifenbezogene Aquaplaning-Geschwindigkeiten für „Grooving 10/10/30 im Bereich km 170+330 bis km 170+220“

Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129$ l/(s·ha), $i = 4,0508$ mm/min)



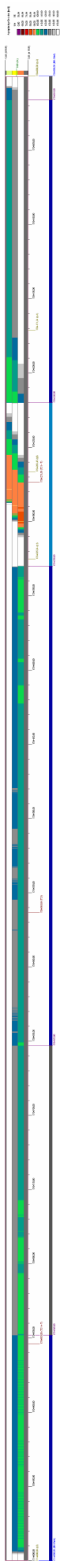
Fahrstreifen 1: min Vaq = 76,8 km/h bei km 170+219,80 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 82,9 km/h bei km 170+287,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 82,2 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287$ l/(s·ha), $i = 1,3457$ mm/min)



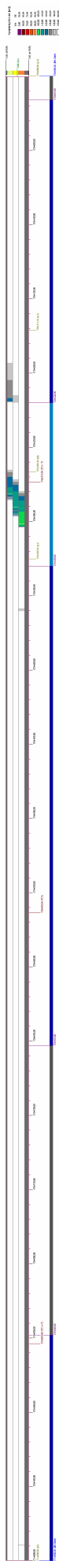
Fahrstreifen 1: min Vaq = 85,3 km/h bei km 170+278,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 84,9 km/h bei km 170+286,60 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 84,1 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7$ l/(s·ha), $i = 0,7542$ mm/min)



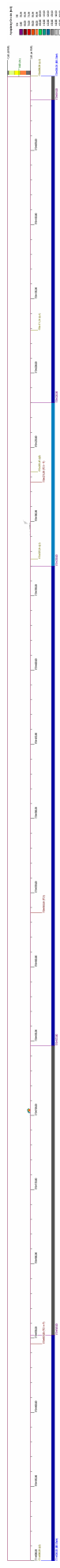
Fahrstreifen 1: min Vaq = 91,0 km/h bei km 170+278,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 90,0 km/h bei km 170+289,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 88,5 km/h bei km 170+299,60

Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77$ l/(s·ha), $i = 0,3586$ mm/min)



Fahrstreifen 1: min Vaq = 116,1 km/h bei km 170+281,20 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 111,0 km/h bei km 170+290,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 103,5 km/h bei km 170+301,20

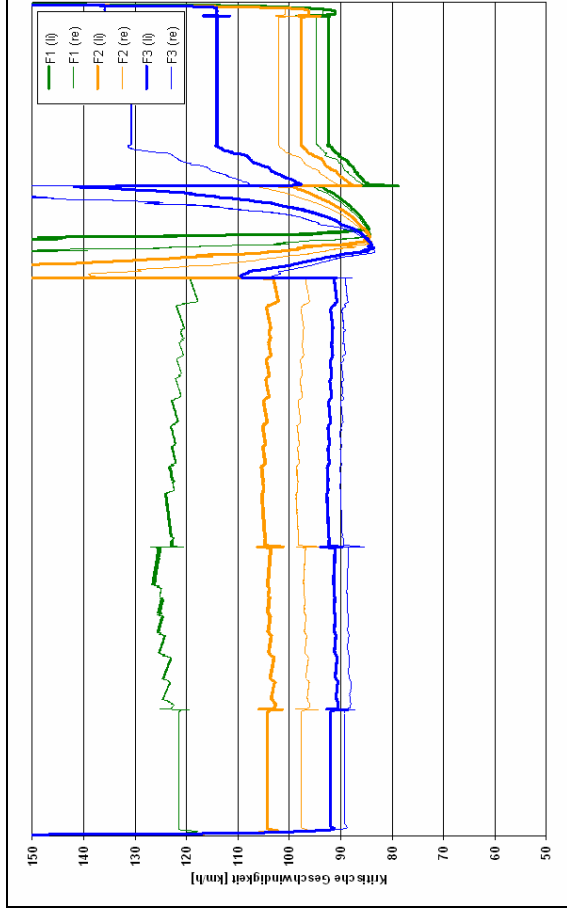
Regenhäufigkeit $n = 10$ ($r = 38,60$ l/(s·ha), $i = 0,2316$ mm/min)



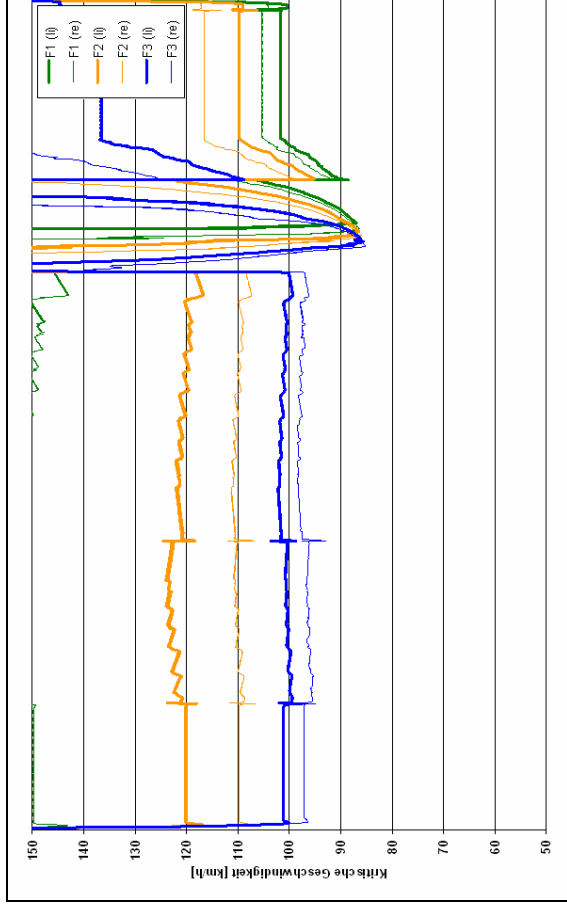
Fahrstreifen 1: min Vaq = 162,6 km/h bei km 170+218,60 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 189,4 km/h bei km 170+291,00 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 145,2 km/h bei km 170+301,20

App. D.5d Radspuren

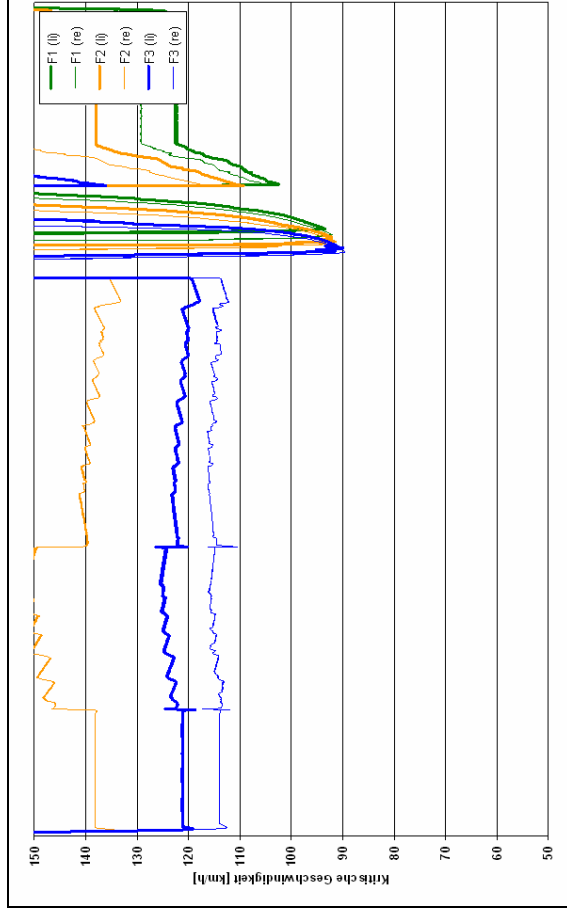
Regenhäufigkeit $n = 0,05$ ($r = 675,129 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 4,0508 \text{ mm/min}$



Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 1,3457 \text{ mm/min}$

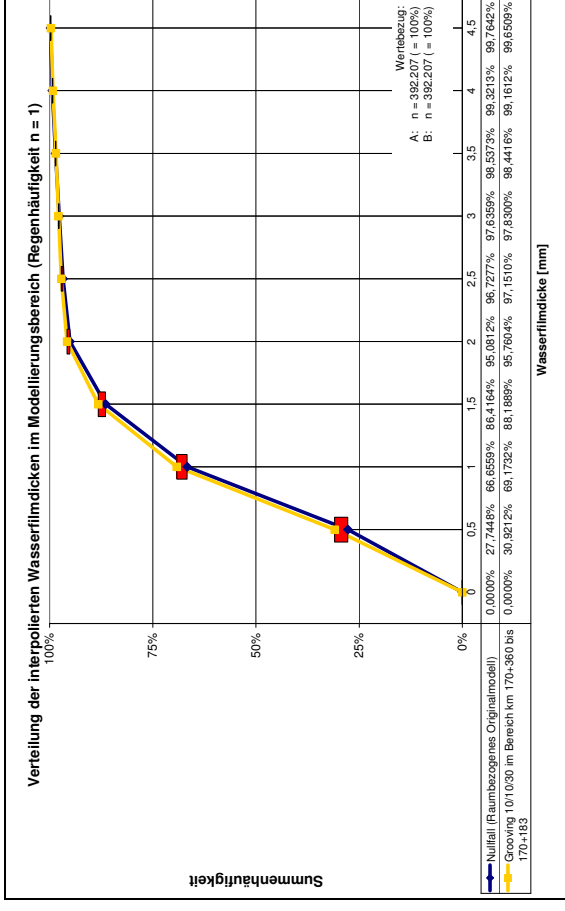
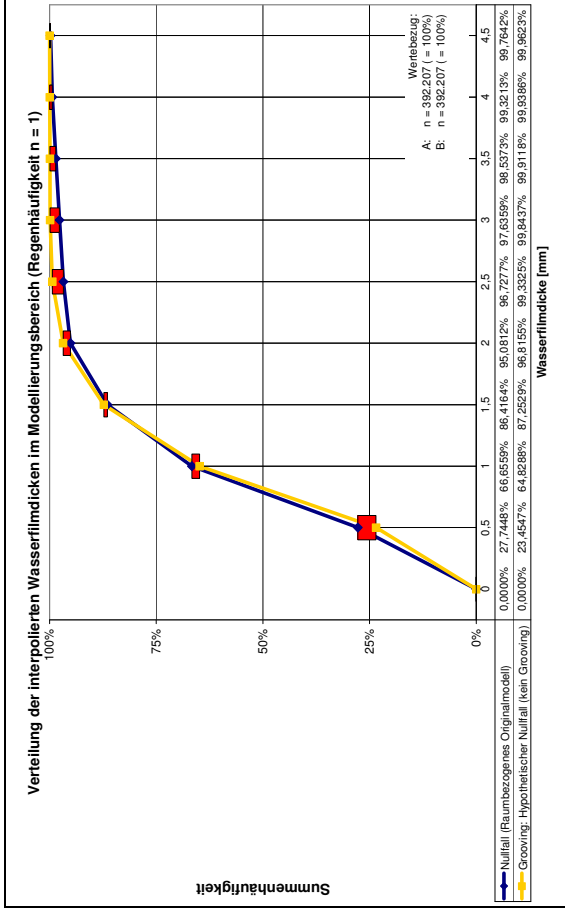


Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$), $i = 0,7542 \text{ mm/min}$

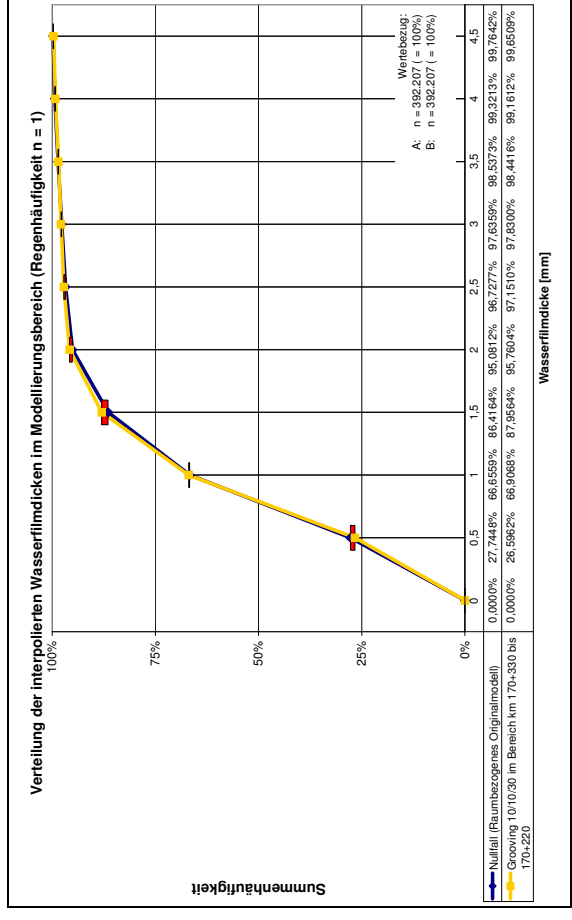


App. D.5e Wasserfilmdicken-Summenhäufigkeitsverteilungen für die Grooving-Varianten und für Regenhäufigkeit n = 1

Hypothetischer Ohne-Fall (kein Grooving)



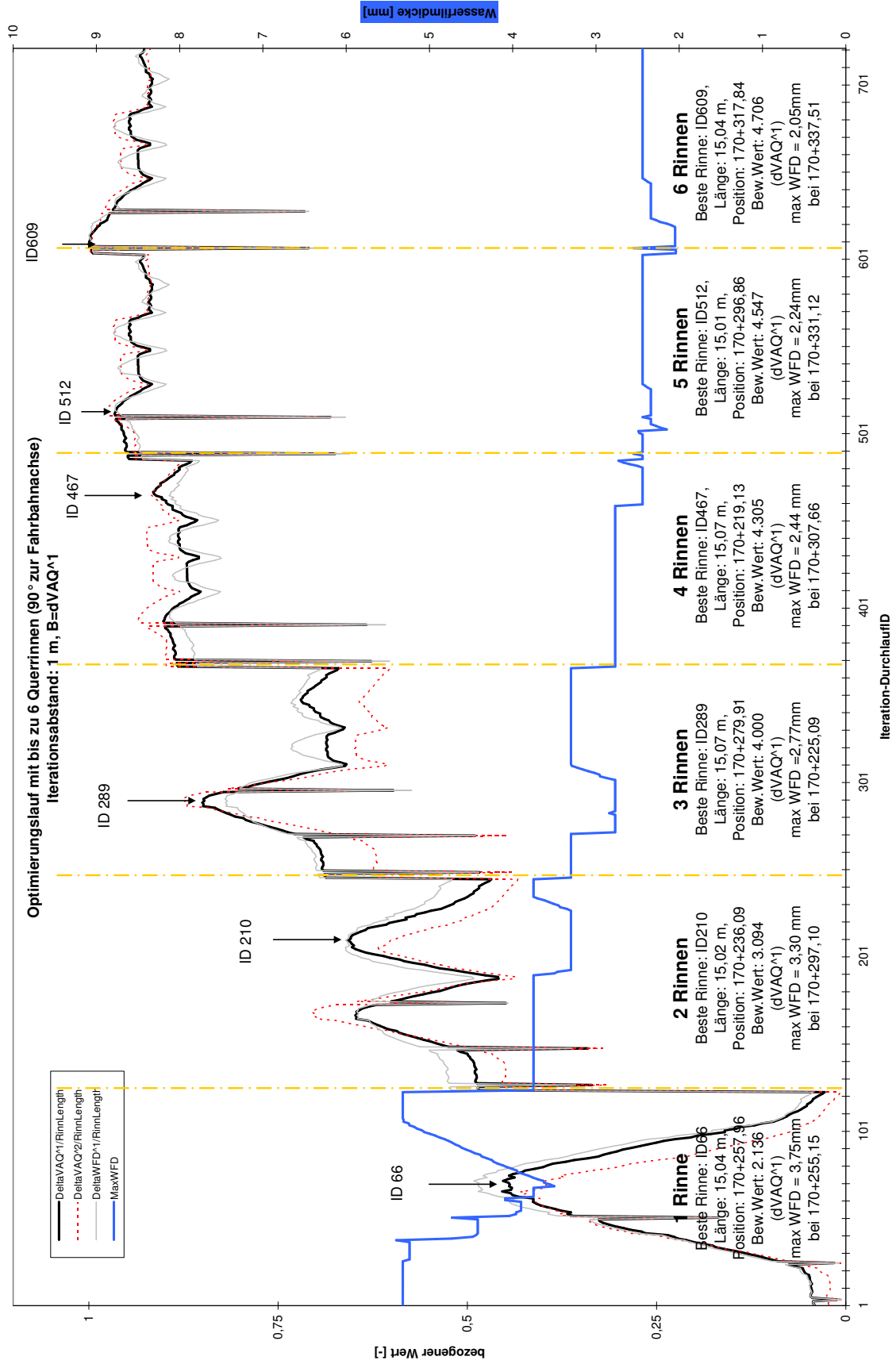
Grooving 10/10/30 im Bereich von km 170+330 bis 170+220



APP. E RINNENOPTIMIERUNG

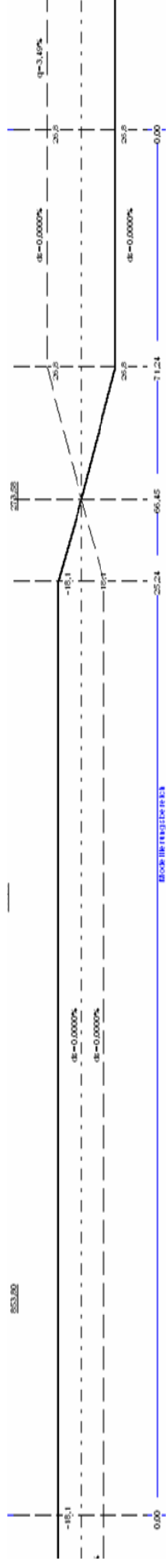
App. E.1 Max. 6 Querrinnen (90° zur FB-Achse), Regenhäufigkeit n=1; Iterationsabstand: 1,00 m, Bewertungsgröße B: ΔV_{aq}^{-1}

Bewertungsbereich BB: {3182/166 ; 4551/311}, Rinnenbereich RB: {3526/198; 4136/229} (km 170+322,83 – km 170+201,32) (Länge: 121,51 m), bei g=0,20

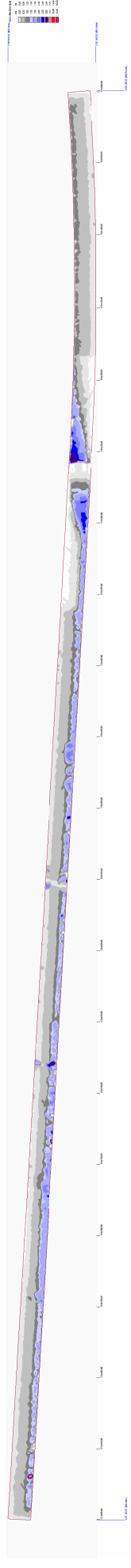
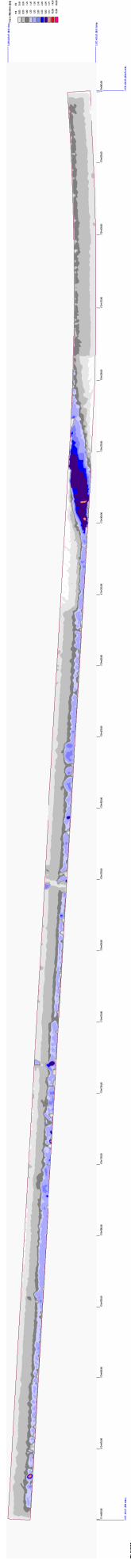


App. E.1a 1 Rinne

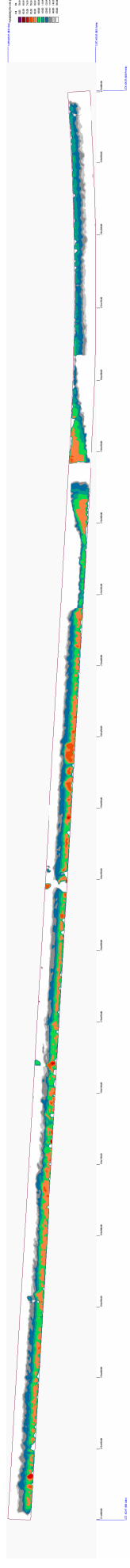
Beste Rinne: ID66, Länge: 15,04 m, Position: 170+257,96, Bew.Wert: 2.136 (dVAQ^1)



Wasserfilmcken-Verteilungen (oben: Ohne-Fall, unten: 1 Rinne gleichzeitig)



Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

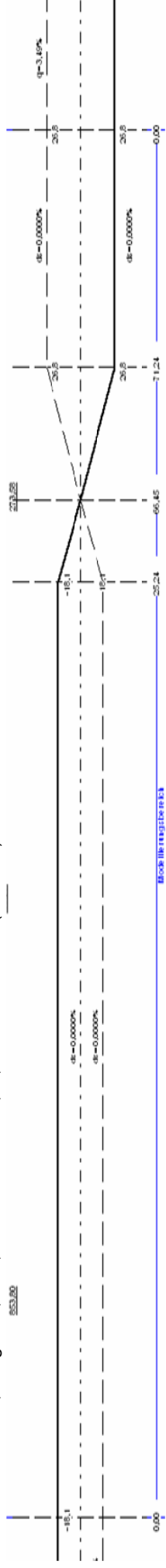


Differenzen (oben: Wasserfilmcken (WFD₁-WFD₀), unten: Aquaplaning-Geschwindigkeiten (V₁-V₀) nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)

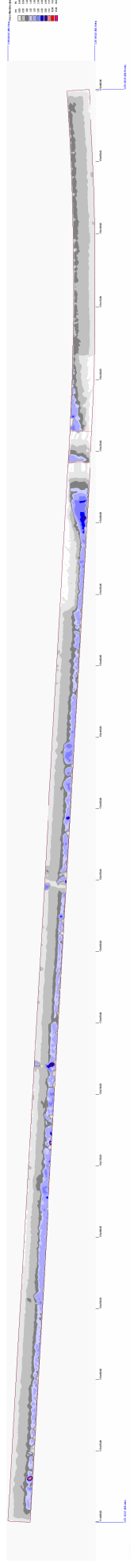
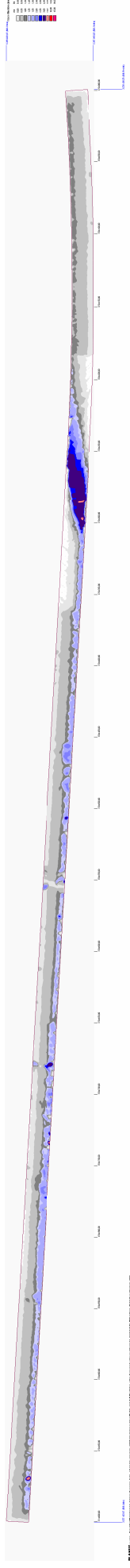


App. E.1b 2 Rinnen

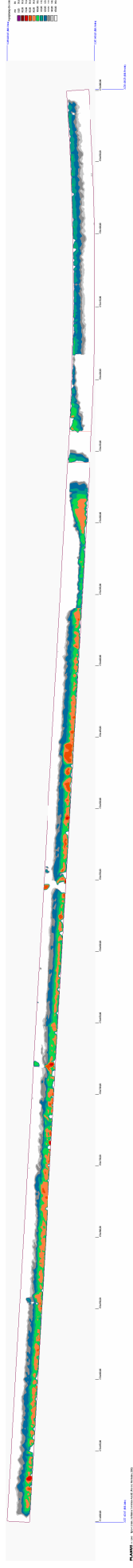
Beste Rinne: ID210, Länge: 15,02 m, Position: 170+236,09, Bew. Wert: 3.094 (dVAQ¹)



Wasserfilmicken-Verteilungen (oben: Ohne-Fall, unten: 2 Rinnen gleichzeitig)



Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

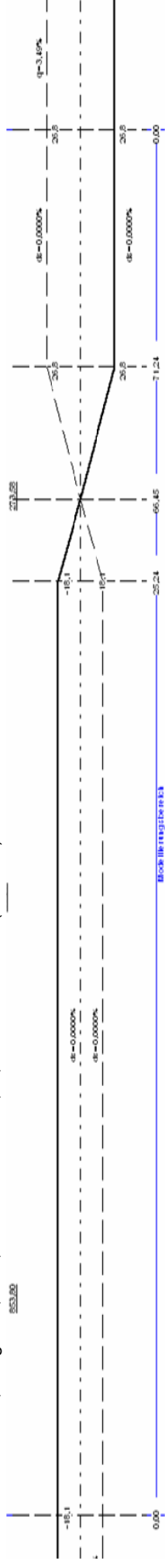


Differenzen (oben: Wasserfilmicken (WFD₁-WFD₀), unten: Aquaplaning-Geschwindigkeiten (V₁-V₀) | nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)

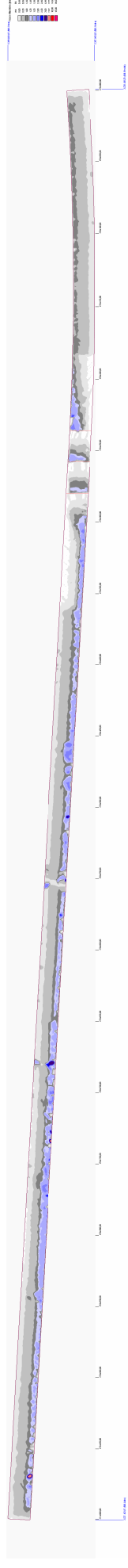
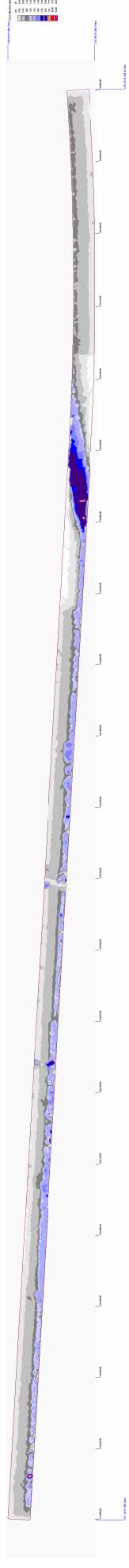


App. E.1c 3 Rinnen

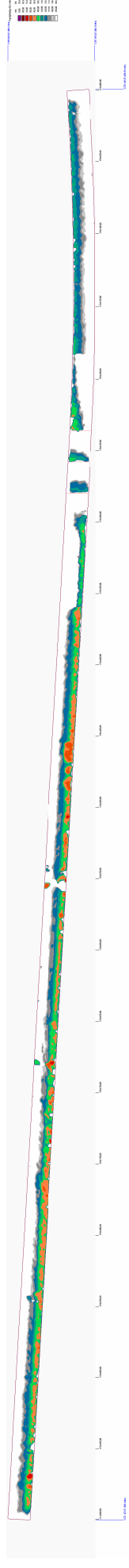
Beste Rinne: ID289, Länge: 15,07 m, Position: 170+279,91, Bew. Wert: 4.000 (dVAQ¹)



Wasserfilmicken-Verteilungen (oben: Ohne-Fall, unten: 3 Rinnen gleichzeitig)



Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

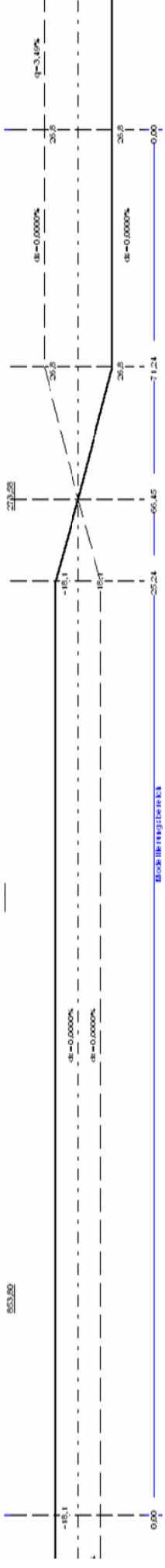


Differenzen (oben: Wasserfilmicken (WFD₁-WFD₀), unten: Aquaplaning-Geschwindigkeiten (V₁-V₀) | nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)

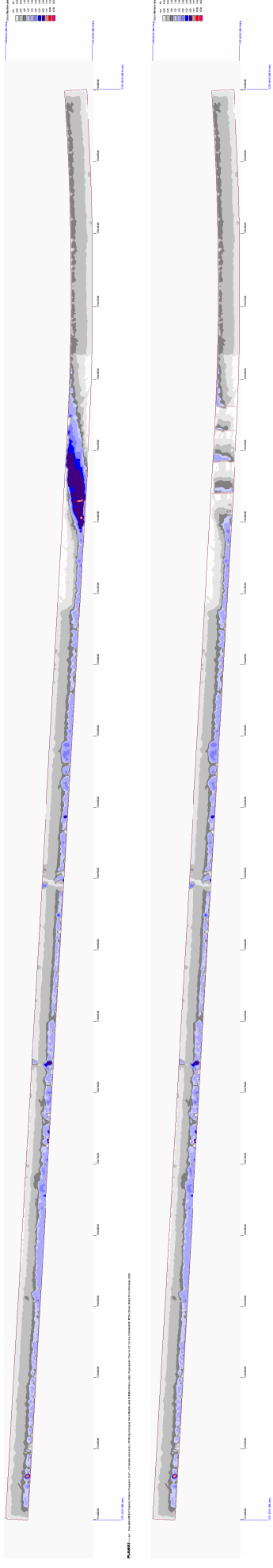


App. E.1d 4 Rinnen

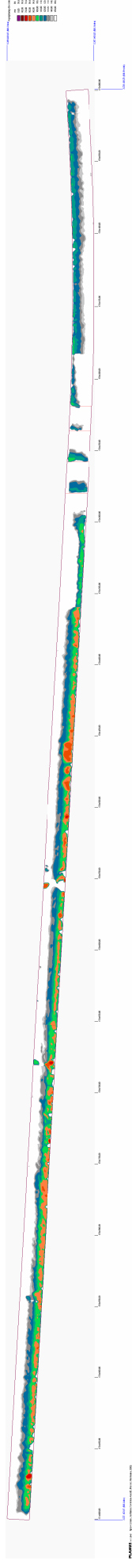
Beste Rinne: ID467, Länge: 15,07 m, Position: 170+219,13, Bew. Wert: 4.305 (dVAQ¹)



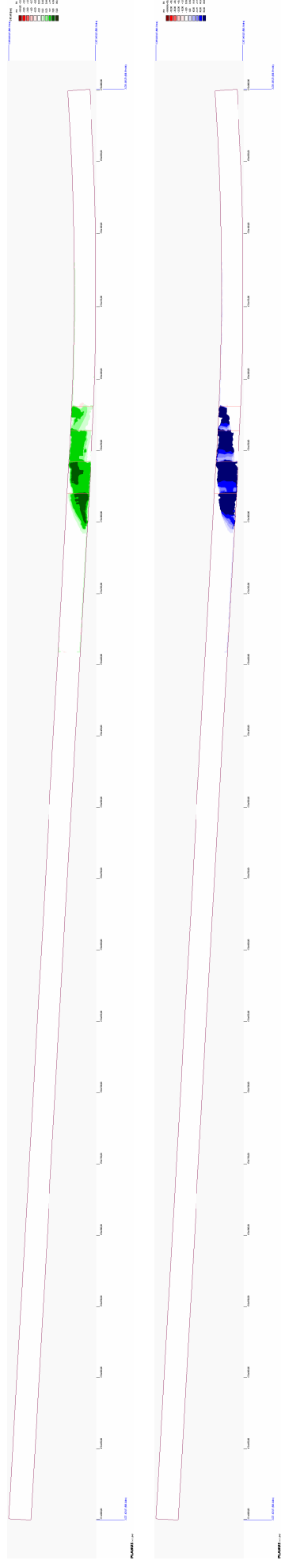
Wasserfilmicken-Verteilungen (oben: Ohne-Fall, unten: 4 Rinnen gleichzeitig)



Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

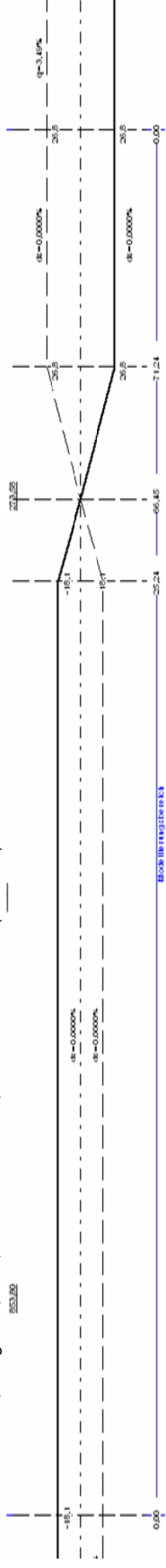


Differenzen (oben: Wasserfilmicken (WFD₁-WFD₀), unten: Aquaplaning-Geschwindigkeiten (V₁-V₀) | nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)

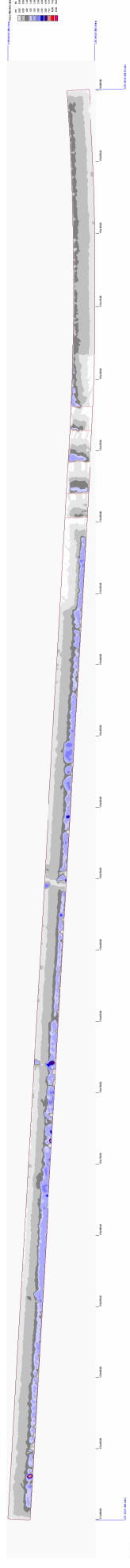
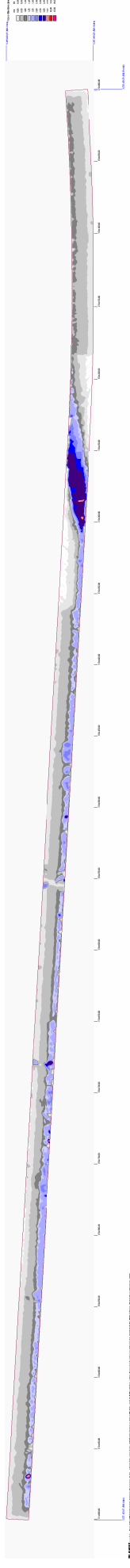


App. E.1e 5 Rinnen

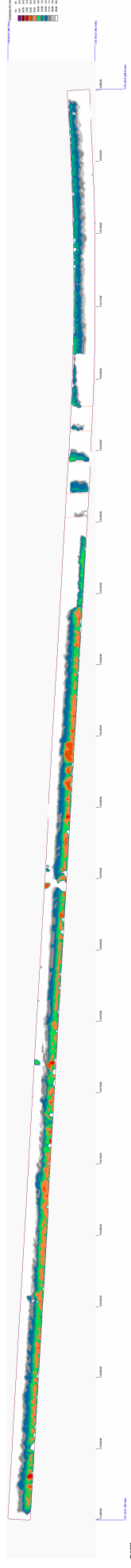
Beste Rinne: ID512, Länge: 15,01 m, Position: 170+296,86 Bew.Wert: 4.547 (dVAQ¹)



Wasserfilmicken-Verteilungen (oben: Ohne-Fall, unten: 5 Rinnen gleichzeitig)



Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

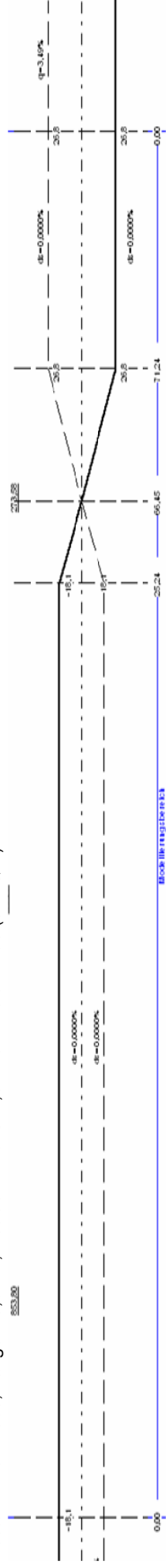


Differenzen (oben: Wasserfilmicken (WFD₁-WFD₀), unten: Aquaplaning-Geschwindigkeiten (V₁-V₀) | nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)

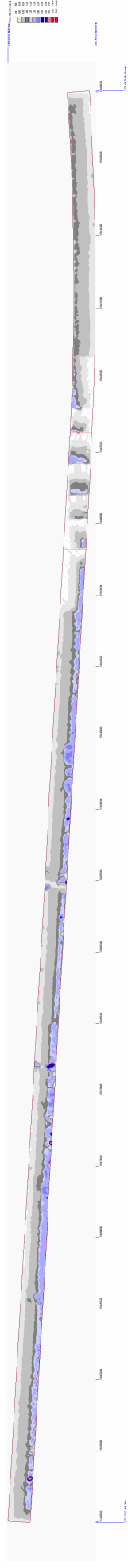
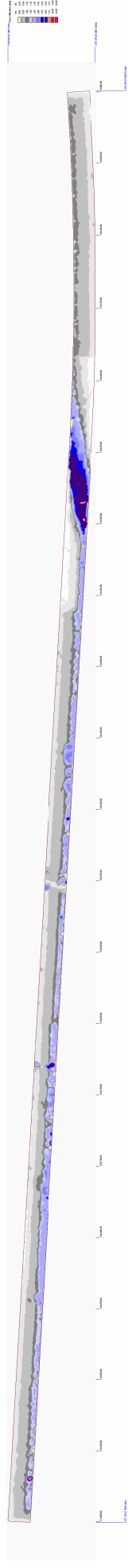


App. E.1f 6 Rinnen

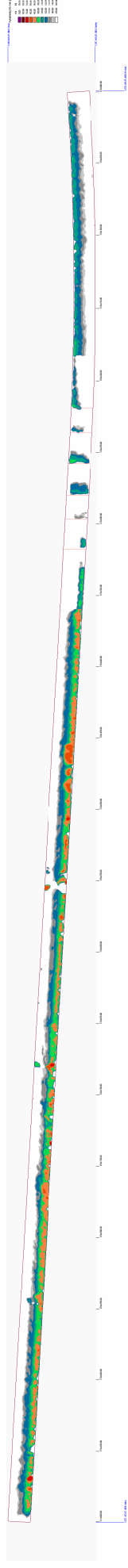
Beste Rinne: ID609, Länge: 15,04 m, Position: 170+317,84 Bew.Wert: 4.706 (dVAQ¹)



Wasserfilmicken-Verteilungen (oben: Ohne-Fall, unten: 6 Rinnen gleichzeitig)



Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm)

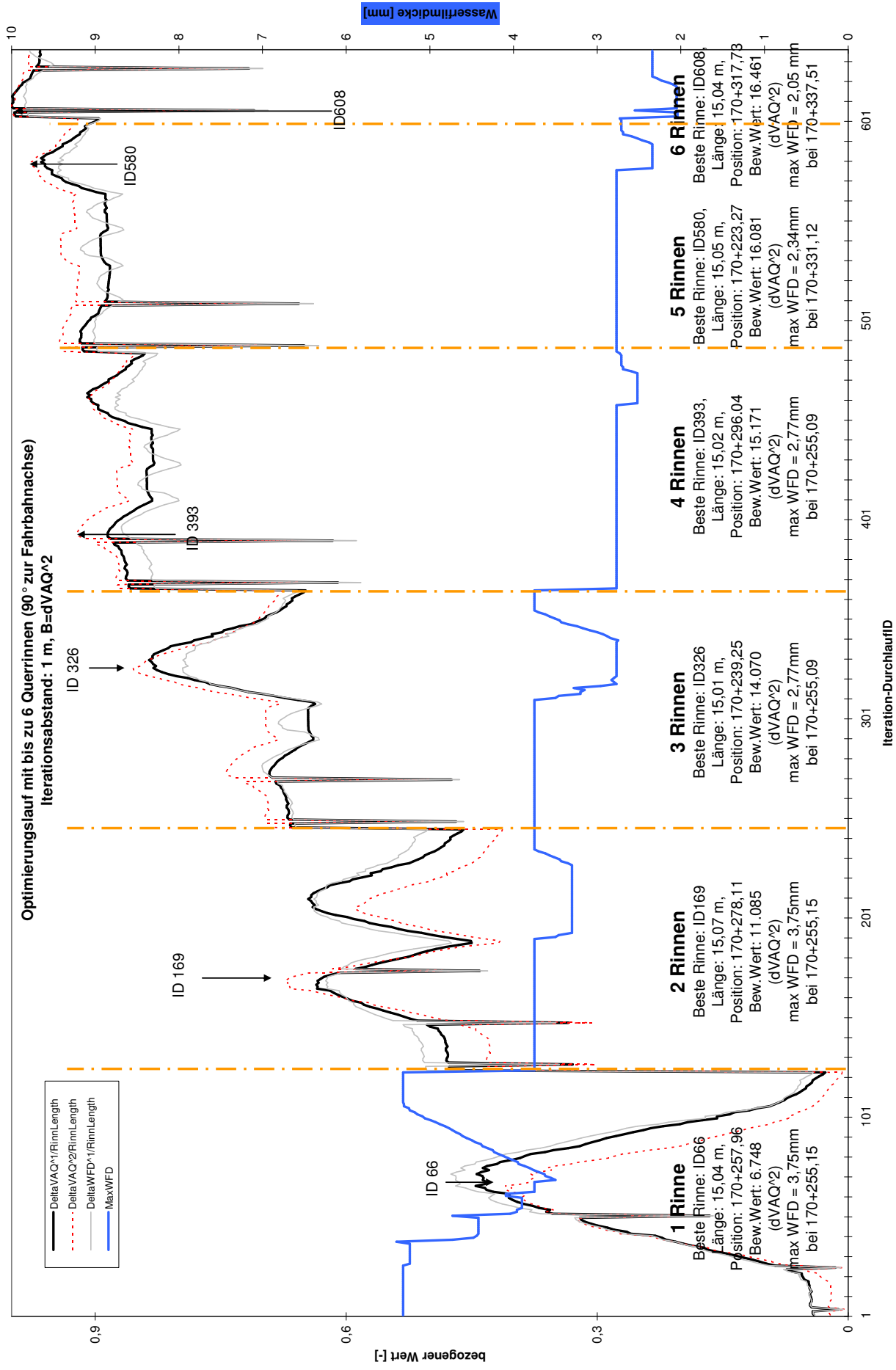


Differenzen (oben: Wasserfilmicken (WFD₁-WFD₀), unten: Aquaplaning-Geschwindigkeiten (V₁-V₀) | nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)



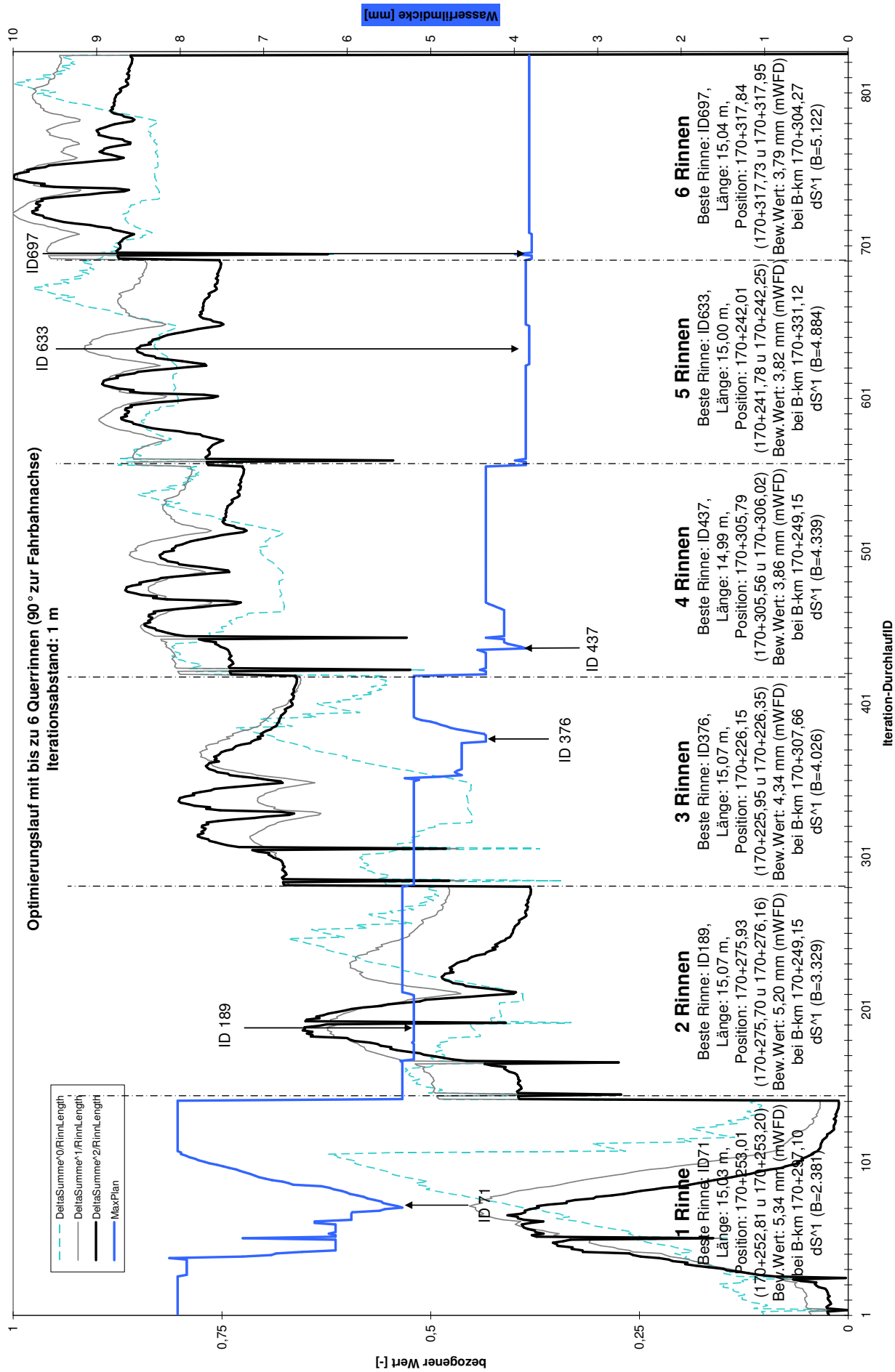
App. E.2 Max. 6 Querrinnen (90° zur FB-Achse), Regenhäufigkeit n=1; Iterationsabstand: 1,00 m, Bewertungsgröße B: ΔV_{aq}^2

Bewertungsbereich BB: {3182/166 ; 4551/311}, Rinnenbereich RB: {3526/198; 4136/229} (km 170+322,83 – km 170+201,32) (Länge: 121,51 m), bei

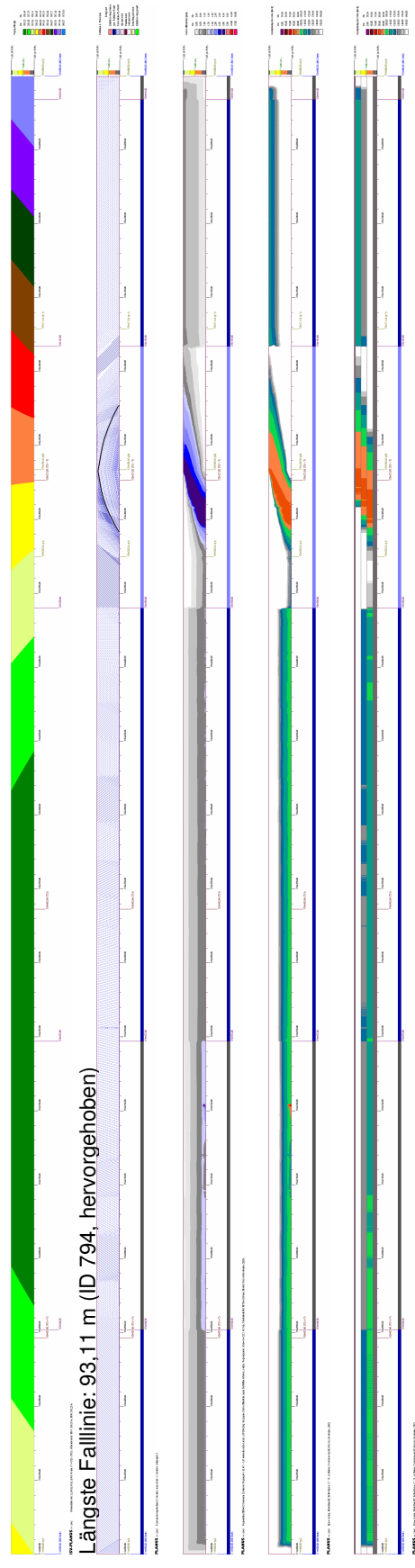
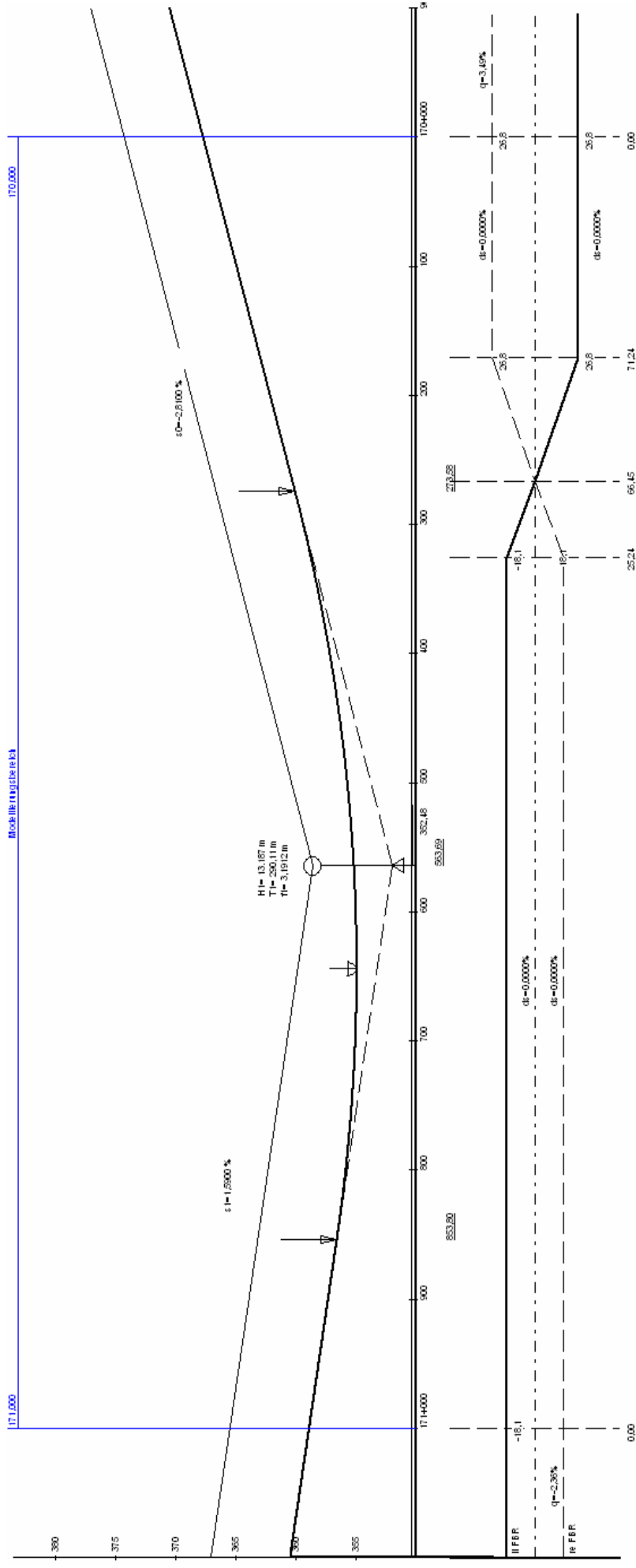


App. E.3 Max. 6 Querrinnen (90° zur FB-Achse), Regenhäufigkeit n=1; Iterationsabstand: 1,00 m, Bewertungsgröße B: maxWFD

Bewertungsbereich BB: {3556/167 ; 4255/313}, Rinnenbereich RB: {3526/198; 4228/232} (Länge: 140,91 m), bei g=0,20

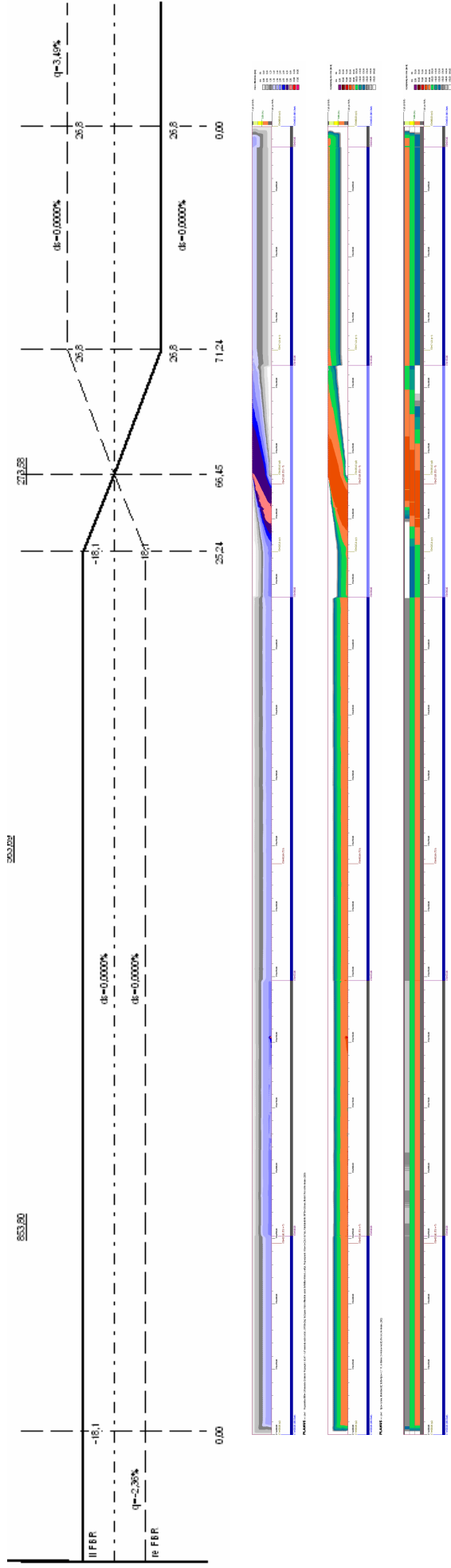


APP. F OHNE-FALL: WASSERFILMDICKEN (N = 1), AQUAPLANING-GESCHW. (N = 1; T = 1,60 MM)



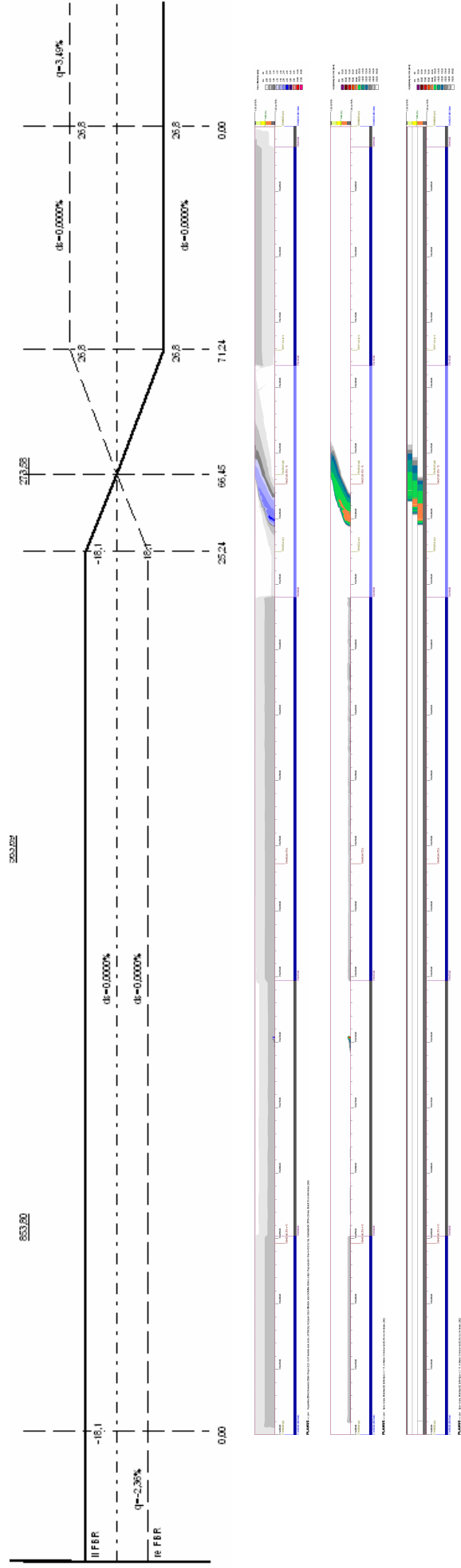
Fahrtstreifen 1: min Vaq = 87,4 km/h bei km 170+278,20 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 86,9 km/h bei km 170+286,60 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 85,6 km/h bei km 170+299,60
 Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.1a Ohne-Fall: Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=0,20), Aquaplaning-Geschw. (n=0,20; t=1,60mm)



Fahrtstreifen 1: min Vaq = 83,1 km/h bei km 170+277,40 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 82,8 km/h bei km 170+287,00 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 81,9 km/h bei km 170+299,60

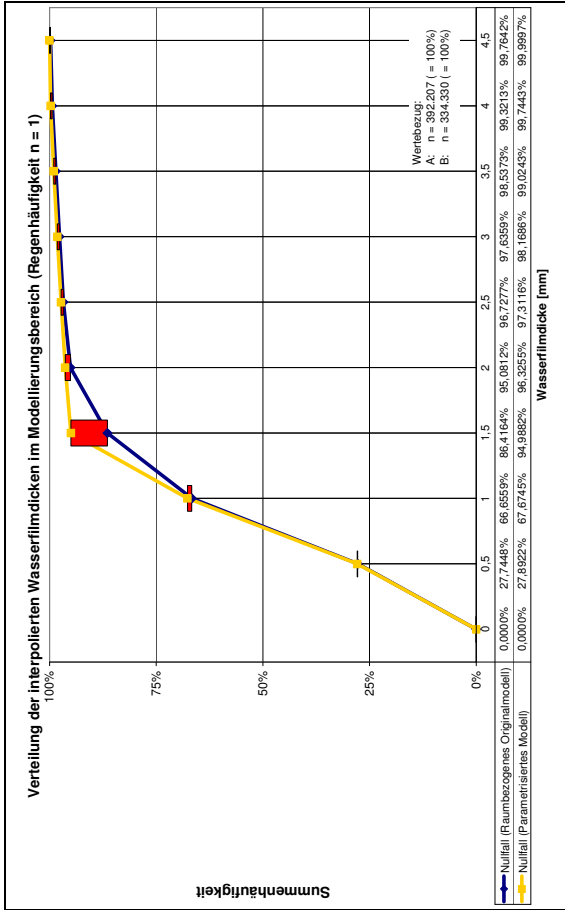
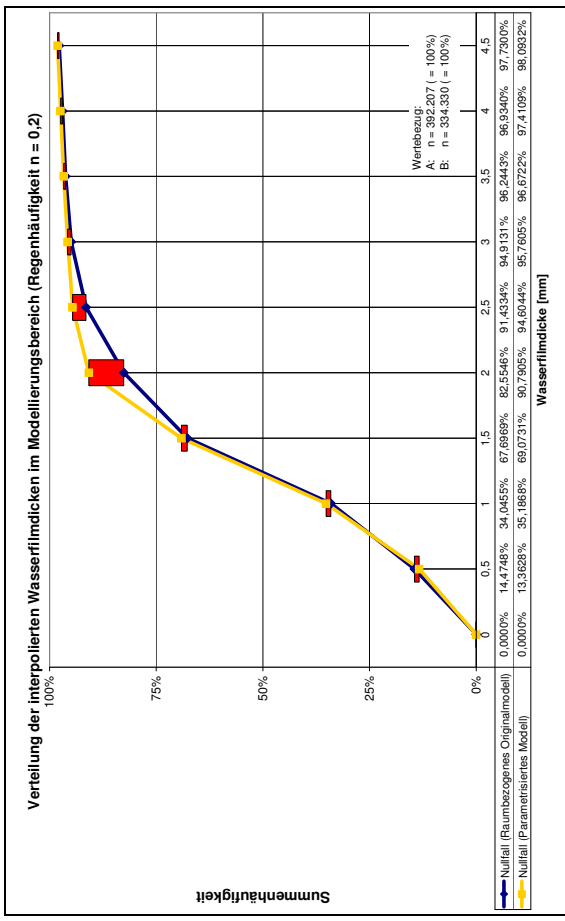
App. F.1b Ohne-Fall: Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=5), Aquaplaning-Geschw. (n=5; t=1,60mm)



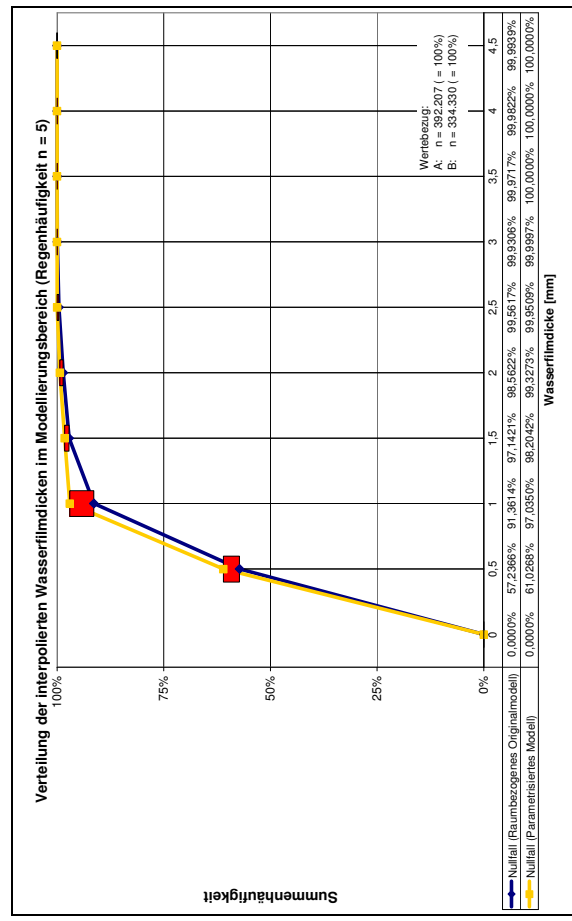
Fahrtstreifen 1: min Vaq = 100,4 km/h bei km 170+278,20 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 98,4 km/h bei km 170+289,00 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 95,3 km/h bei km 170+300,00

App. F.1c Vergleich raumbezogene Daten vs. parametrisierte Daten – Wasserfilmdicken-Summenhäufigkeitsverteilungen

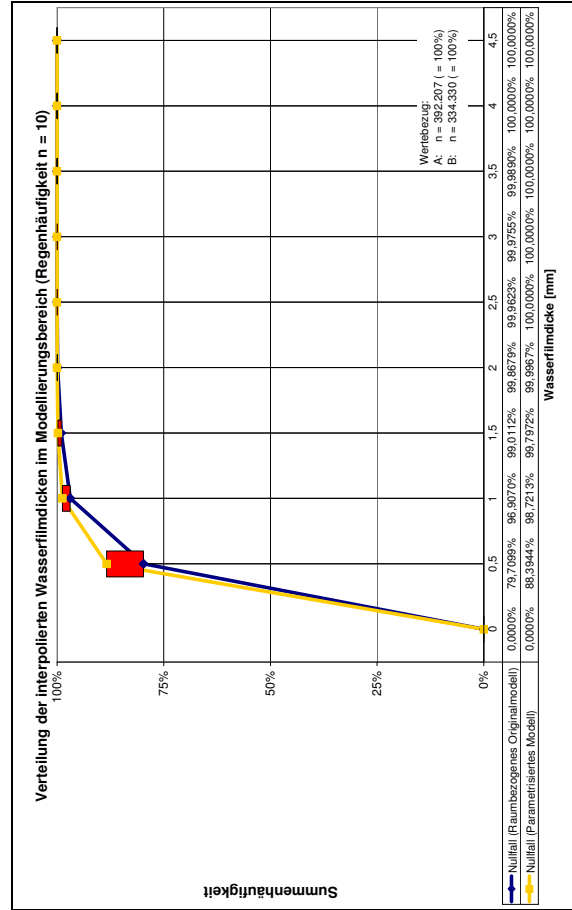
Regenhäufigkeit $n = 0,2$ ($r = 224,287 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 1,3457 \text{ mm/min}$) Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,7542 \text{ mm/min}$)



Regenhäufigkeit $n = 5$ ($r = 59,77 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,3586 \text{ mm/min}$)

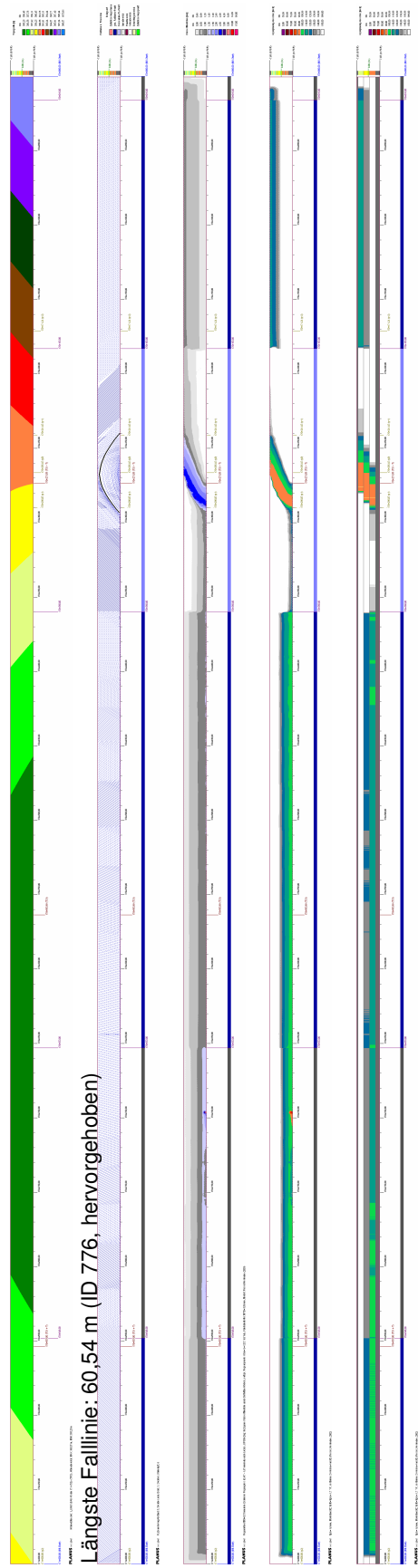
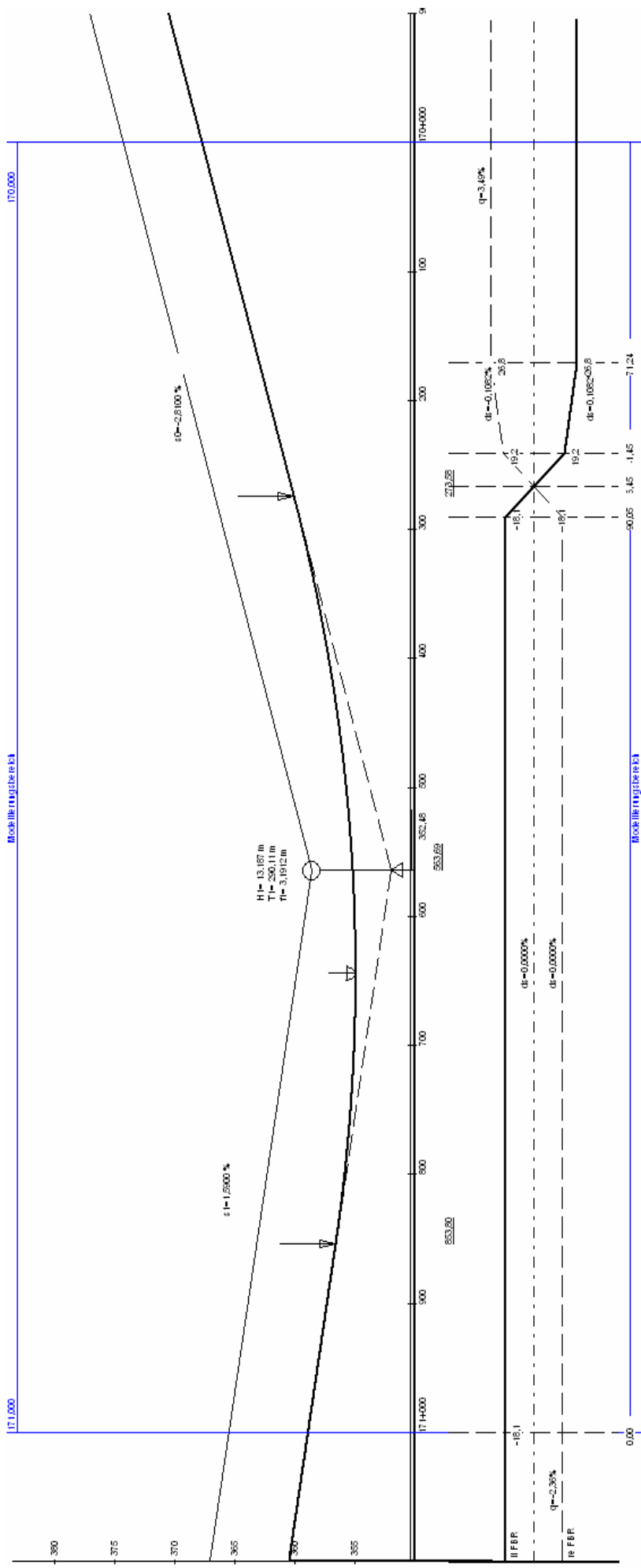


Regenhäufigkeit $n = 10$ ($r = 38,60 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$, $i = 0,2316 \text{ mm/min}$)



App. F.2

Querneigungsband-Alternative 1.1 : Geteilte Verwindung (min $\Delta s = 0,1\text{ a}$; zVWB mit 50 m Länge)

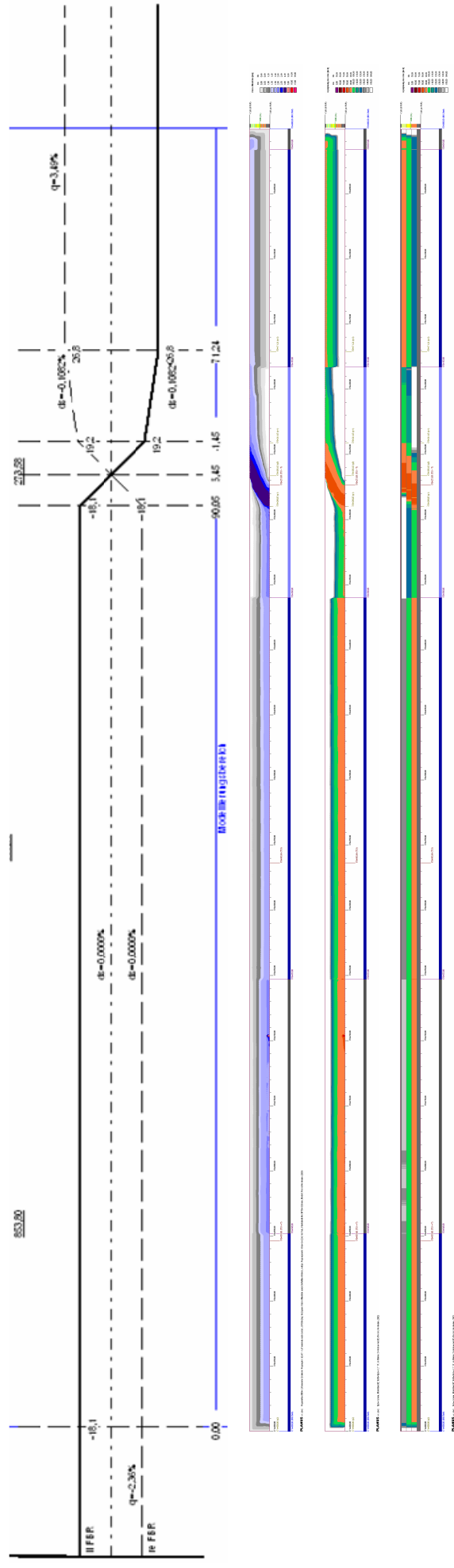


Längste Falllinie: 60,54 m (ID 776, hervorgehoben)

Fahrtstreifen 1: min Vaq = 91,5 km/h bei km 170+275,80 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 91,4 km/h bei km 170+283,00 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 92,2 km/h bei km 170+282,80

App. F.2a

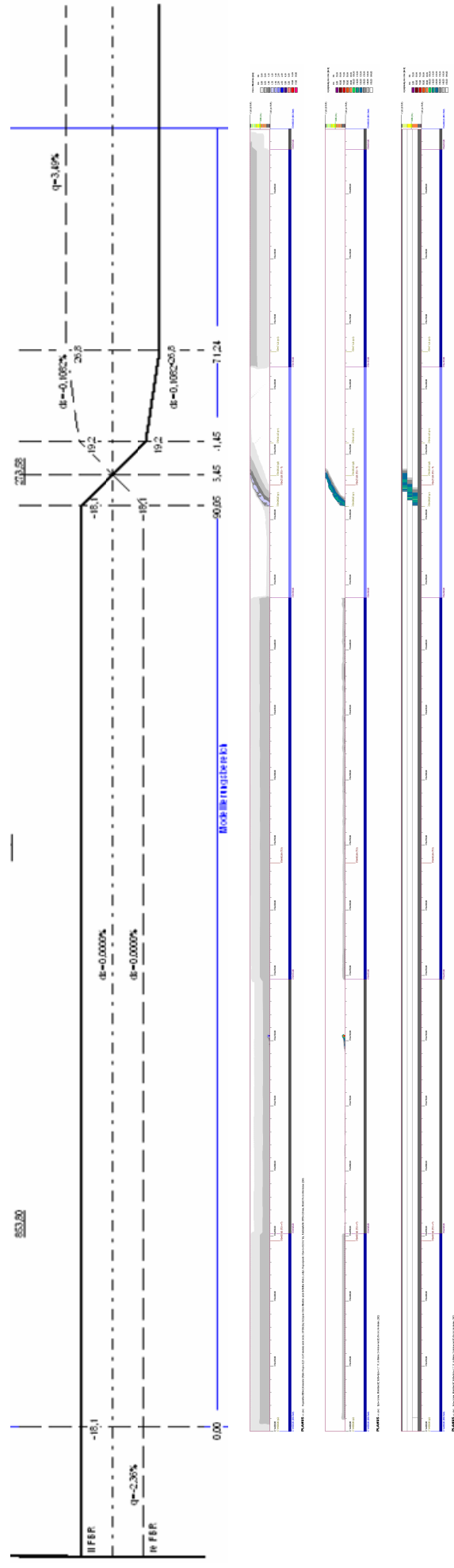
Alternative 1.1 (min Δs = 0,1-a): Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=0,20), Aquaplaning-Geschw. (n=0,20; t=1,60mm)



Fahrstreifen 1: min Vaq = 85,2 km/h bei km 170+275,80 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 85,6 km/h bei km 170+277,20 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 85,6 km/h bei km 170+283,20

App. F.2b

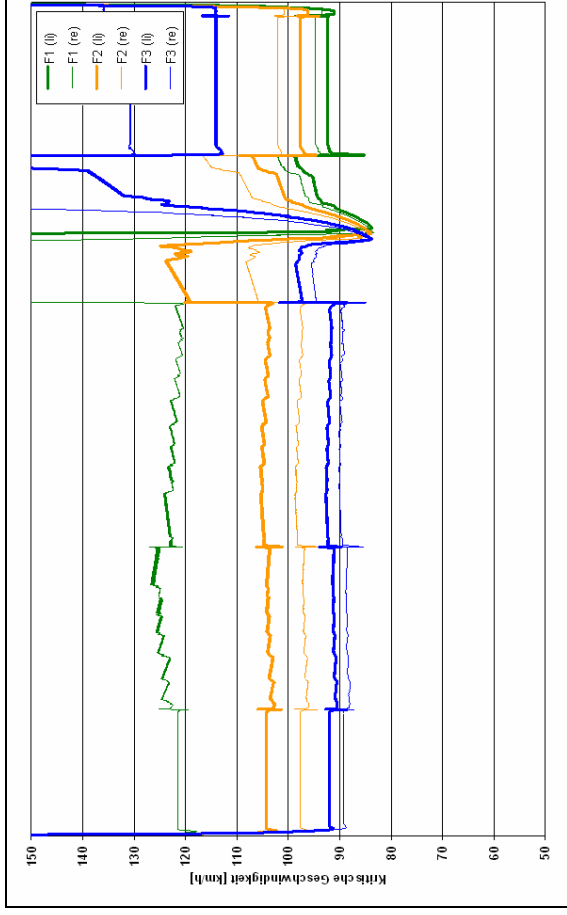
Alternative 1.1 (min Δs = 0,1-a): Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=5), Aquaplaning-Geschw. (n=5; t=1,60mm)



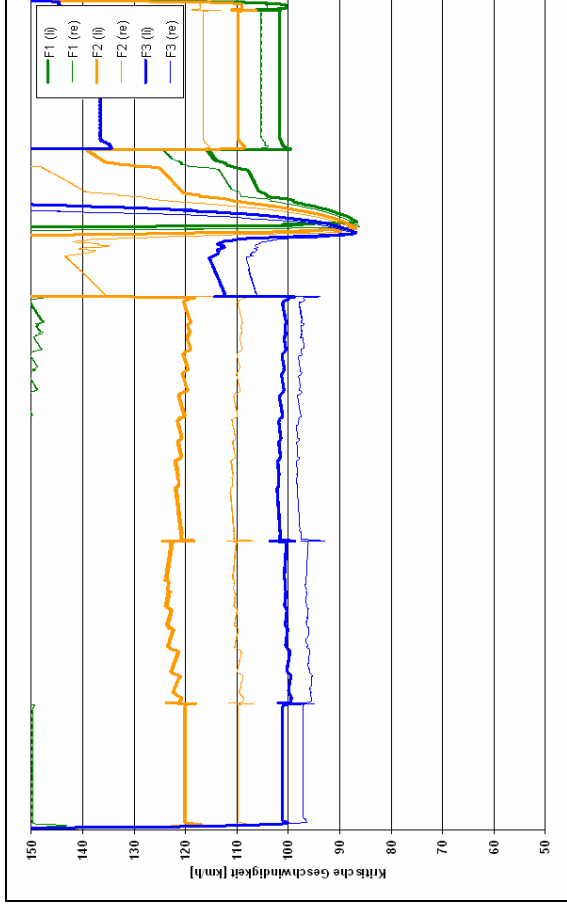
Fahrstreifen 1: min Vaq = 116,4 km/h bei km 170+275,80 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 115,8 km/h bei km 170+275,80 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 117,6 km/h bei km 170+283,60

App. F.2c Alternative 1.1 (min $\Delta s = 0,1$ a): Radspuren; Regenereignisse n = {0,05; 0,2; 1; 5}

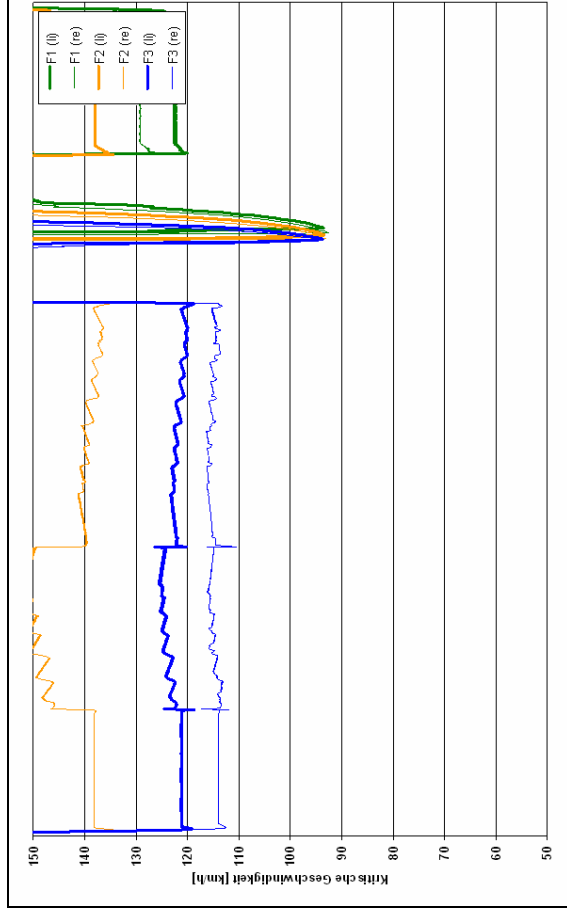
Regenhäufigkeit n = 0,05 (r = 675,129 l/(s·ha), i = 4,0508 mm/min)



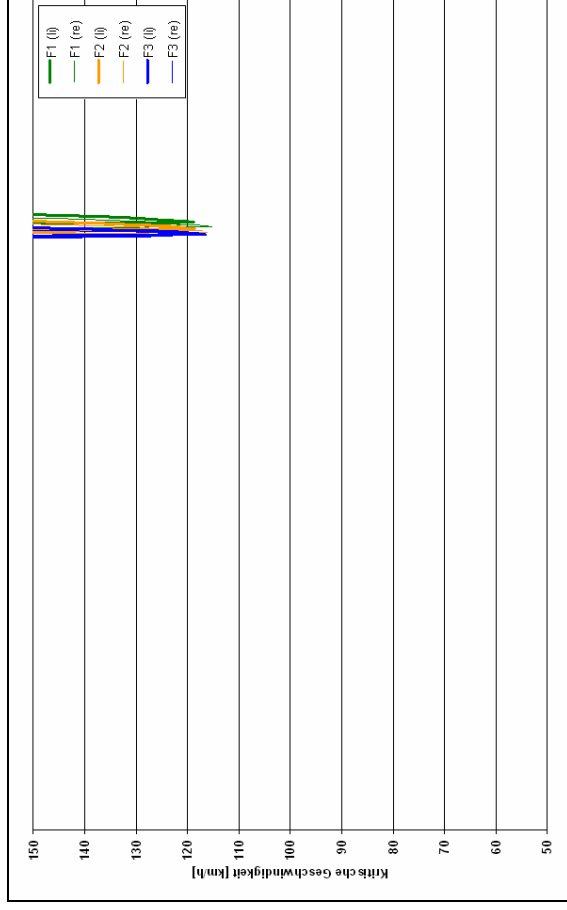
Regenhäufigkeit n = 0,2 (r = 224,287 l/(s·ha), i = 1,3457 mm/min)



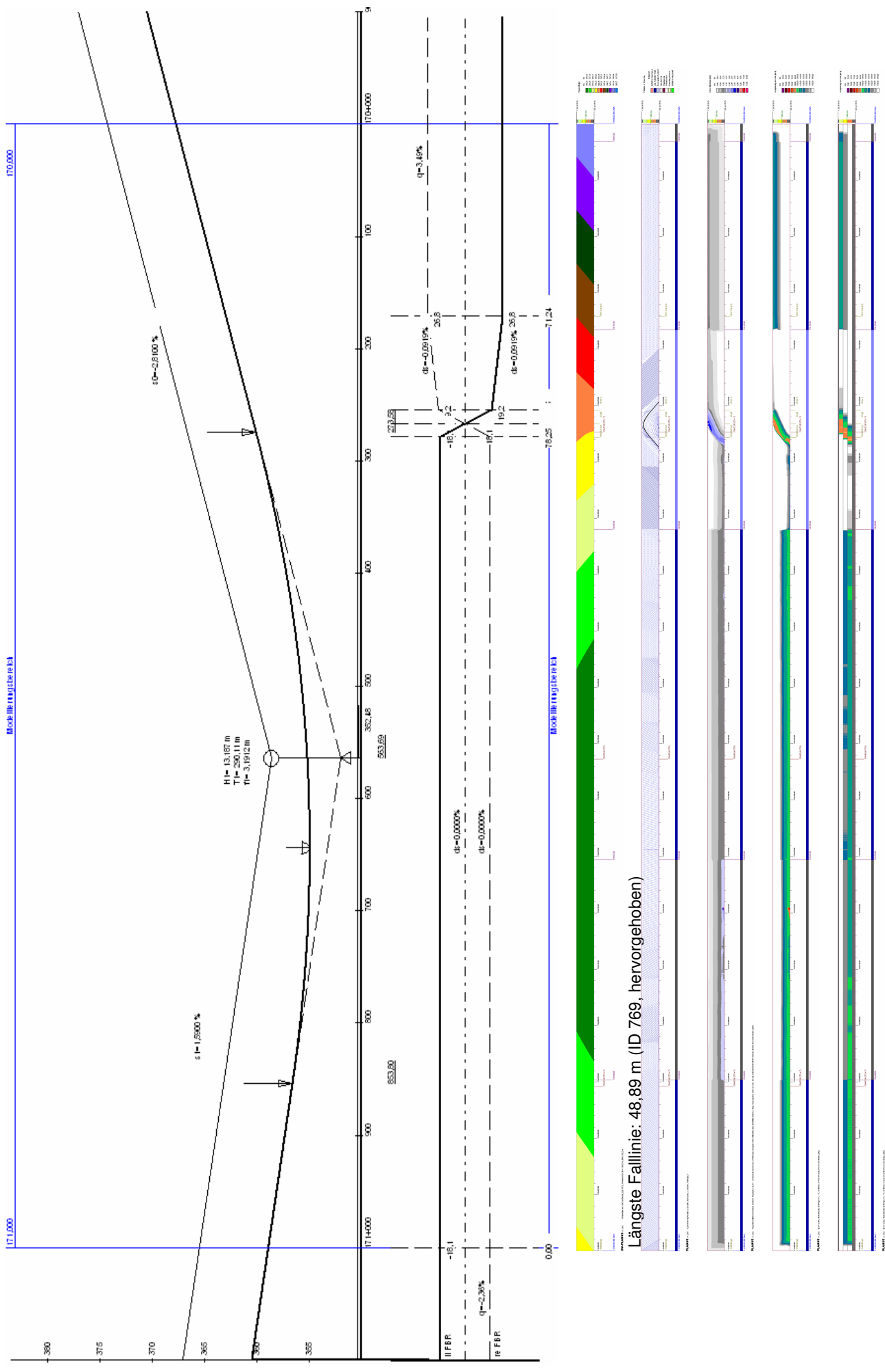
Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)



Regenhäufigkeit n = 5 (r = 59,77 l/(s·ha), i = 0,3586 mm/min)



App. F.3 Querneigungsband-Alternative 1.2: Geteilte Verwindung (min $\Delta s = 0,2\text{-a}$; zVWB mit 25 m Länge)

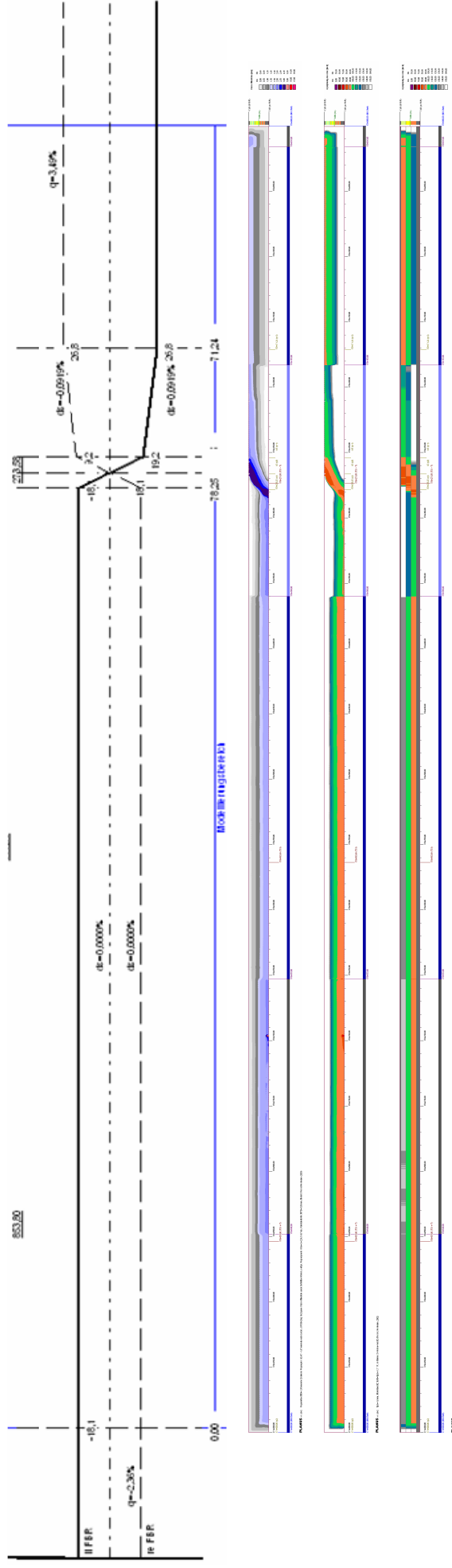


Fahrbahnen 1: min Vaq = 93,4 km/h bei km 170+269,00 / Fahrbahnen 2: min Vaq = 96,2 km/h bei km 170+273,80 / Fahrbahnen 3: min Vaq = 97,8 km/h bei km 170+279,80

Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.3a

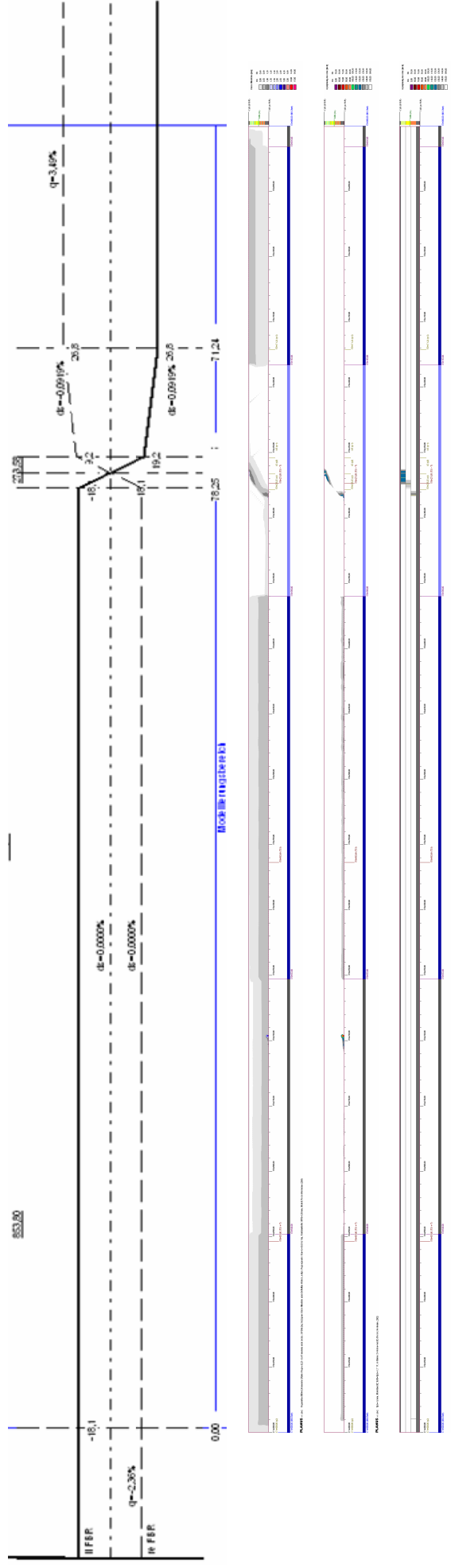
Alternative 1.2 (min Δs = 0,2-a): Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=0,20), Aquaplaning-Geschw. (n=0,20; t=1,60mm)



Fahrtstreifen 1: min Vaq = 83,0 km/h bei km 170+269,00 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 84,2 km/h bei km 170+271,60 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 83,1 km/h bei km 170+652,80

App. F.3b

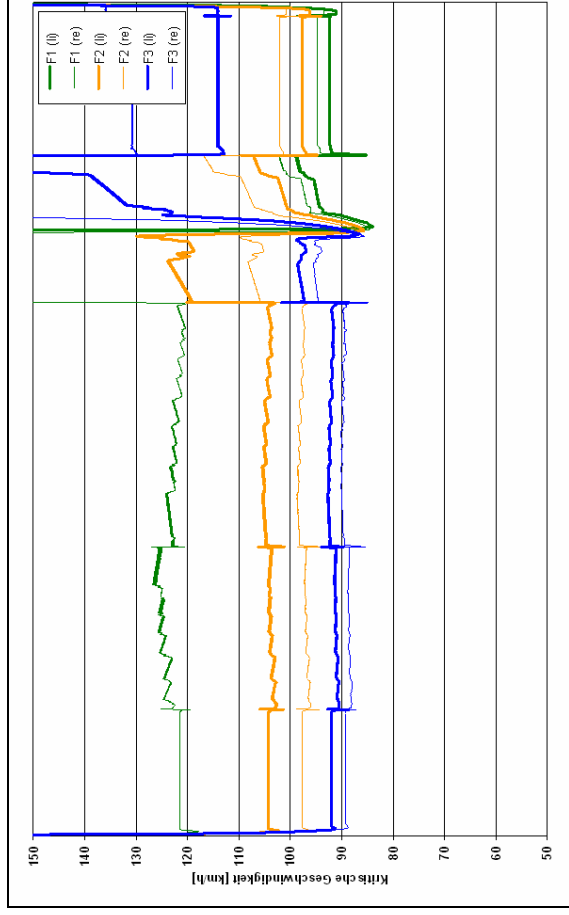
Alternative 1.2 (min Δs = 0,2-a): Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=5), Aquaplaning-Geschw. (n=5; t=1,60mm)



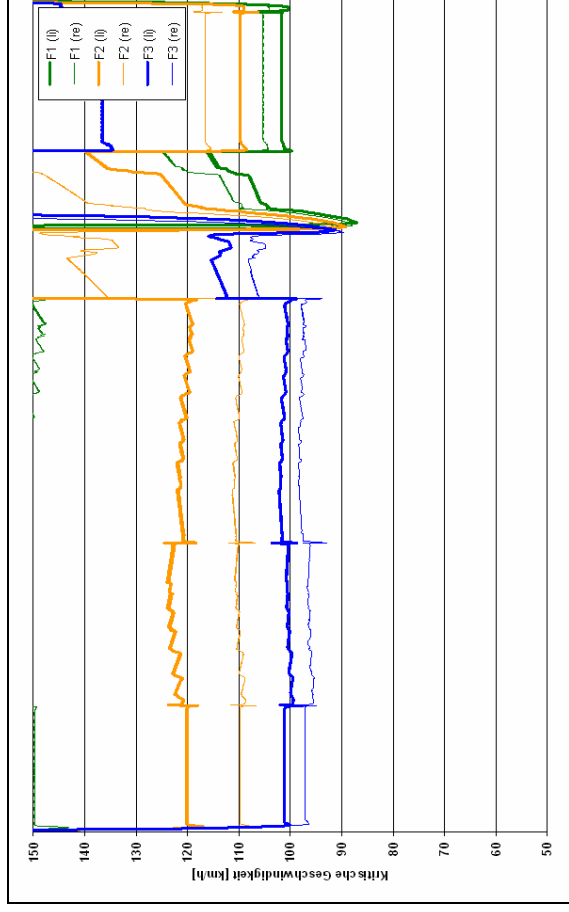
Fahrtstreifen 1: min Vaq = 121,6 km/h bei km 170+269,00 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 135,8 km/h bei km 170+273,80 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 129,8 km/h bei km 170+282,40

App. F.3c Alternative 1.2 (min $\Delta s = 0,2$ -a): Radspuren; Regenereignisse n = {0,05; 0,2; 1; 5}

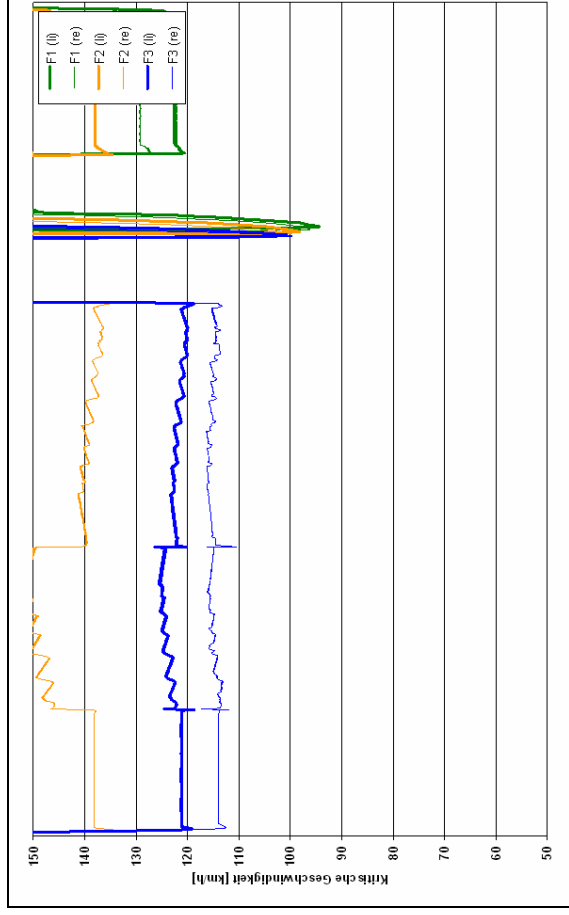
Regenhäufigkeit n = 0,05 (r = 675,129 l/(s·ha), i = 4,0508 mm/min)



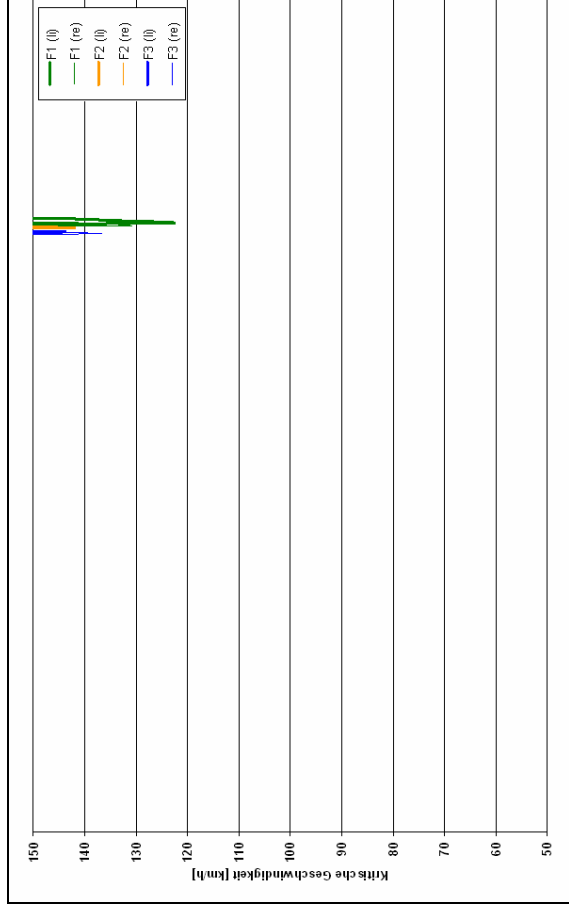
Regenhäufigkeit n = 0,2 (r = 224,287 l/(s·ha), i = 1,3457 mm/min)



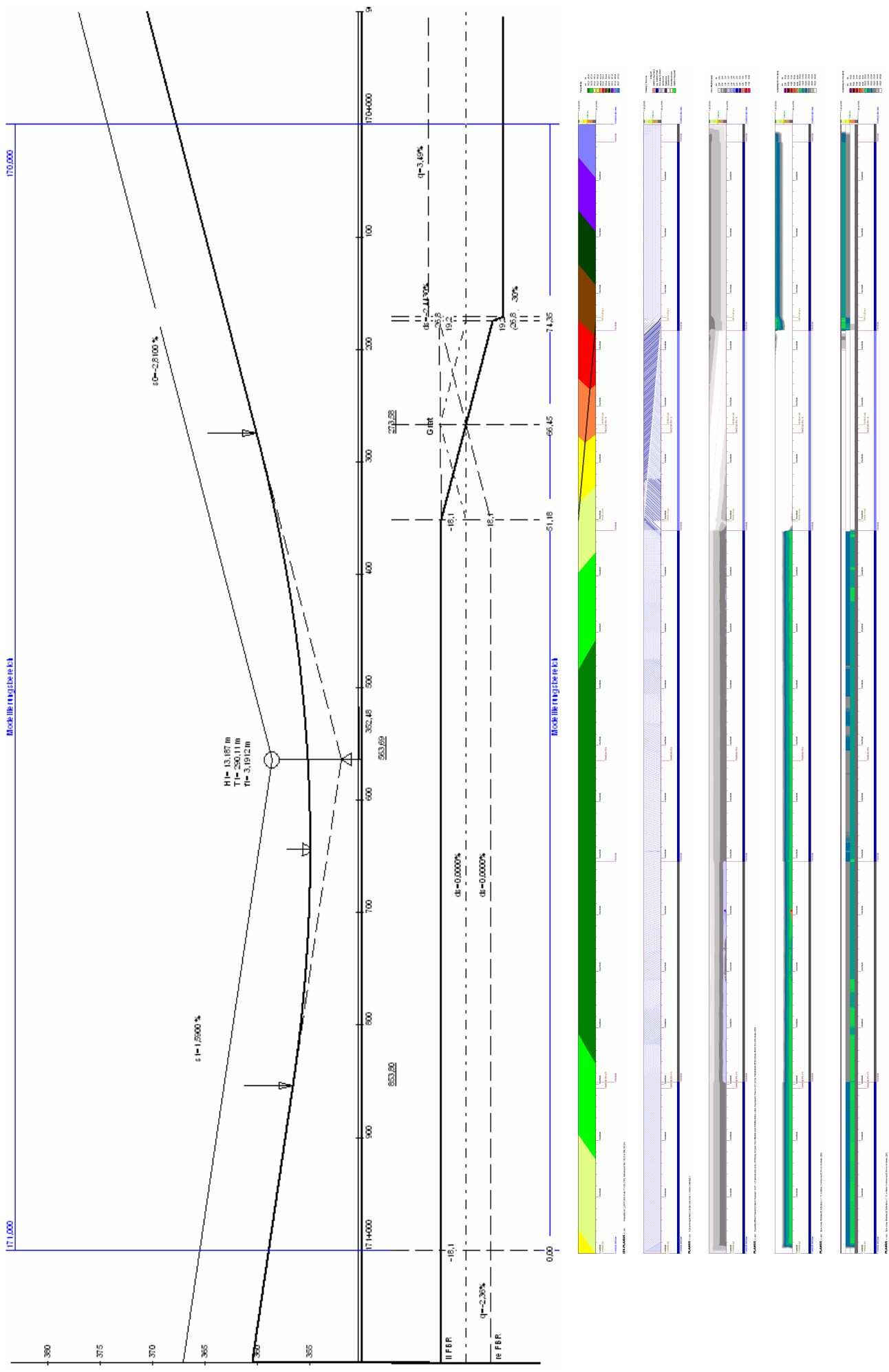
Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)



Regenhäufigkeit n = 5 (r = 59,77 l/(s·ha), i = 0,3586 mm/min)

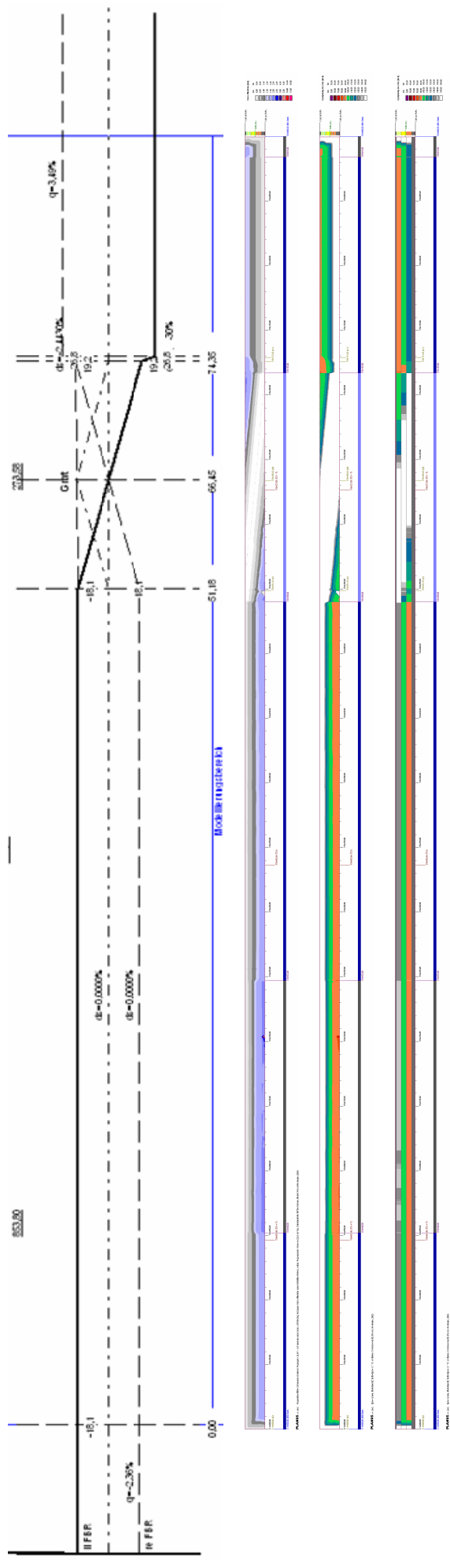


App. F.4 Querneigungsband-Alternative 2: Schrägverwindung (Wandernder Grat)



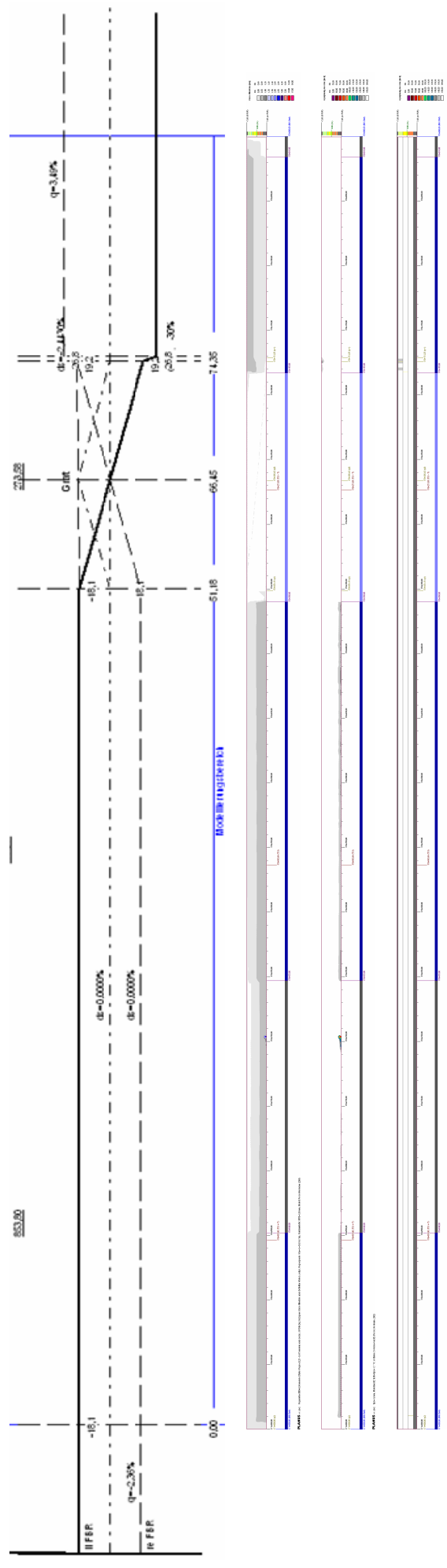
Fahrtstreifen 1: min Vaq = 105,8 km/h bei km 170+174,00 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 118,5 km/h bei km 170+181,00 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 105,8 km/h bei km 170+652,80
 Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.4a Alternative 2 (Schrägverwindung): Querneigungsband, Wasserfilmdicken, Aquaplaning-Geschw. (n=0,20; t=1,60mm)



Fahrtstreifen 1: min Vaq = 89,1 km/h bei km 170+182,80 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 97,4 km/h bei km 170+182,80 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 89,9 km/h bei km 170+652,80

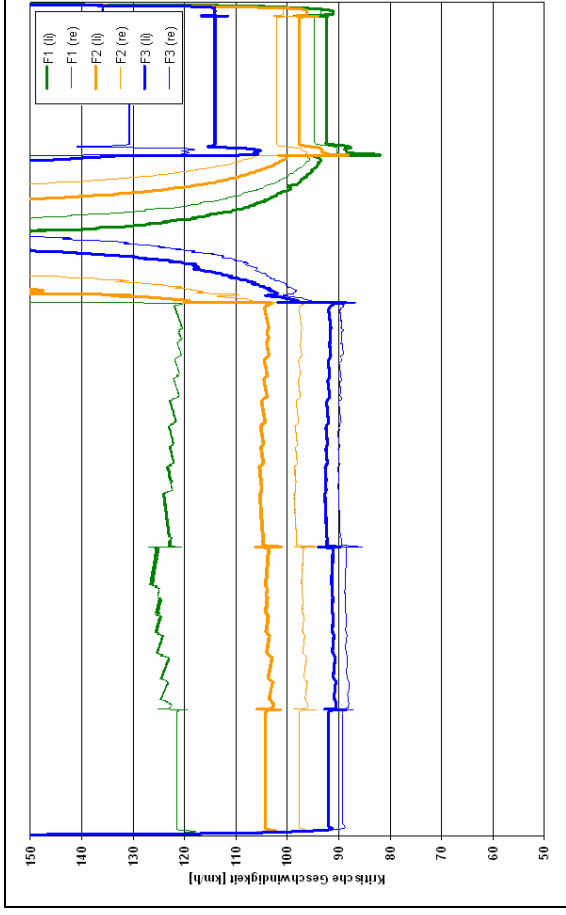
App. F.4b Alternative 2 (Schrägverwindung): Querneigungsband, Wasserfilmdicken (n=5; t=1,60mm)



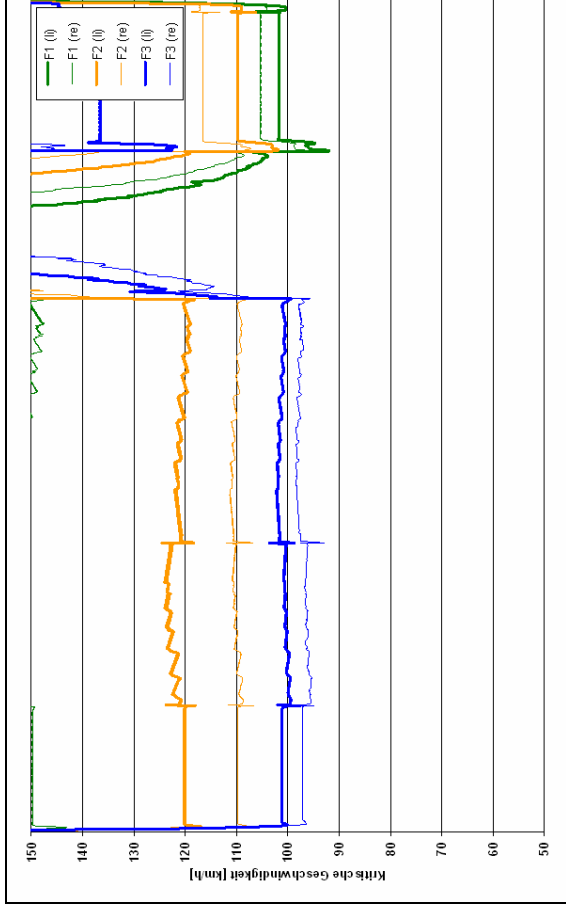
Fahrtstreifen 1: min Vaq = 142,5 km/h bei km 170+174,00 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 173,9 km/h bei km 170+181,00 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 149,7 km/h bei km 170+989,20

App. F.4c Alternative 2 (Schrägverwindung): Radspuren; Regenereignisse n = {0,05; 0,2; 1; 5}

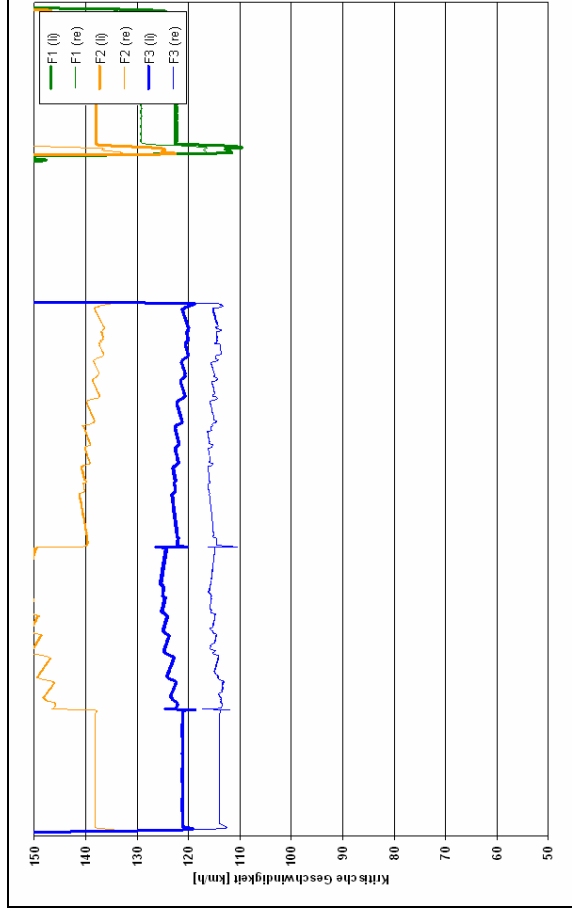
Regenhäufigkeit n = 0,05 (r = 675,129 l/(s·ha), i = 4,0508 mm/min)



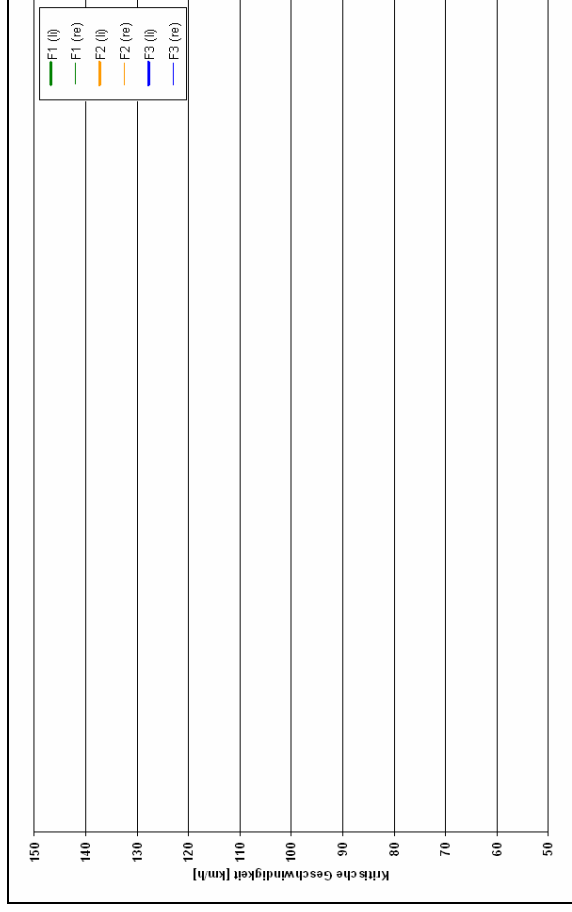
Regenhäufigkeit n = 0,2 (r = 224,287 l/(s·ha), i = 1,3457 mm/min)



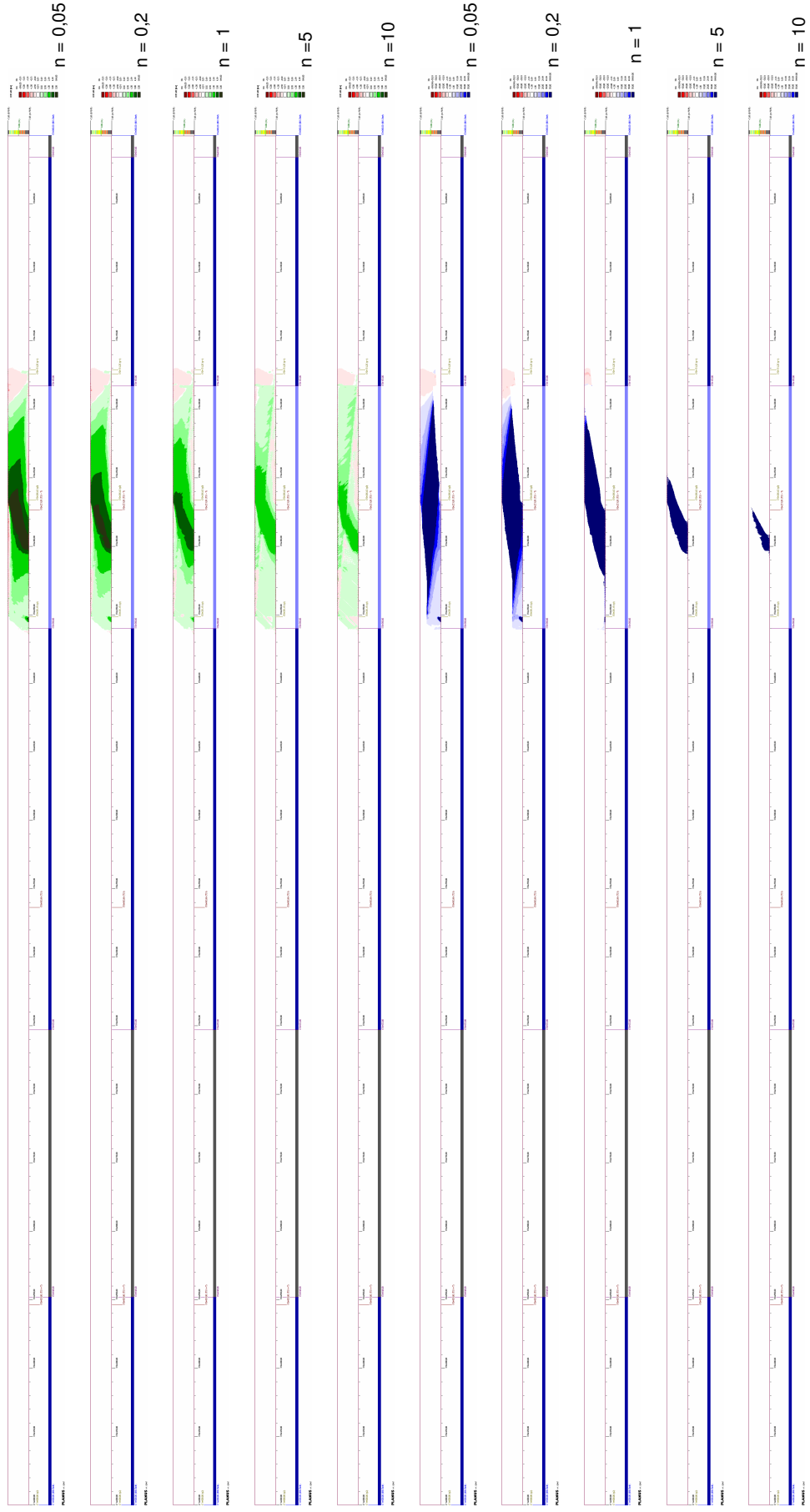
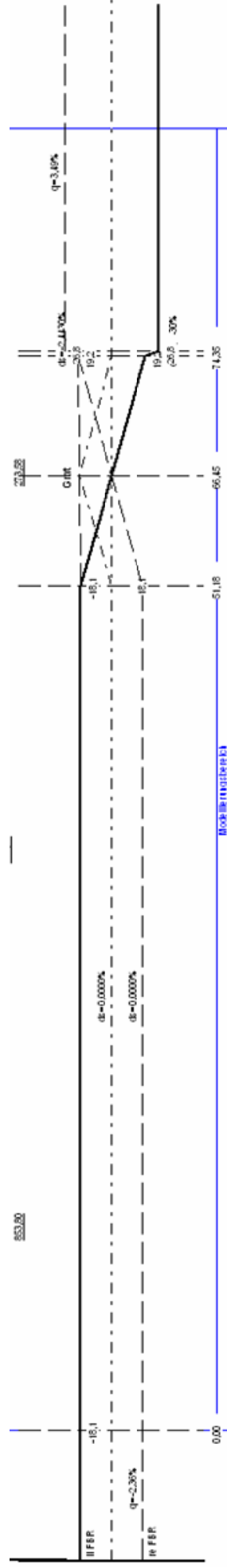
Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)



Regenhäufigkeit n = 5 (r = 59,77 l/(s·ha), i = 0,3586 mm/min)

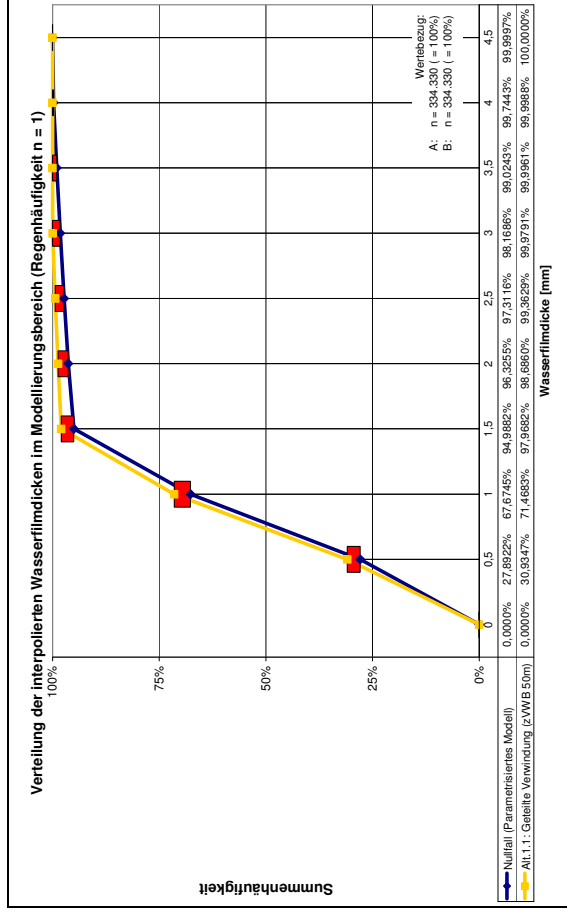


App. F.4d Alternative 2 (Schrägverwindung): Differenzwerte

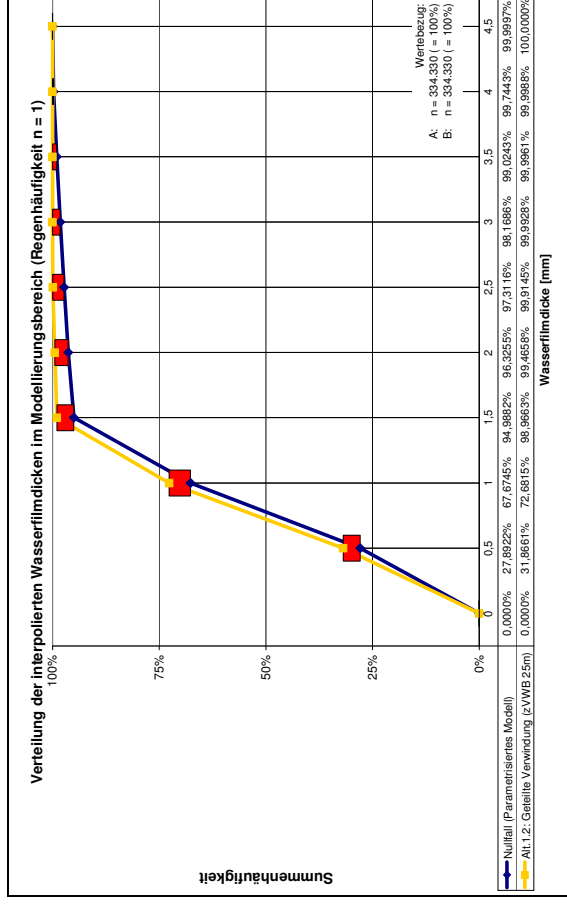


App. F.5 Wasserfilmdicken-Summenhäufigkeitsverteilungen für die Alternativen 1.1, 1.2 und 2 für Regenhäufigkeit n = 1

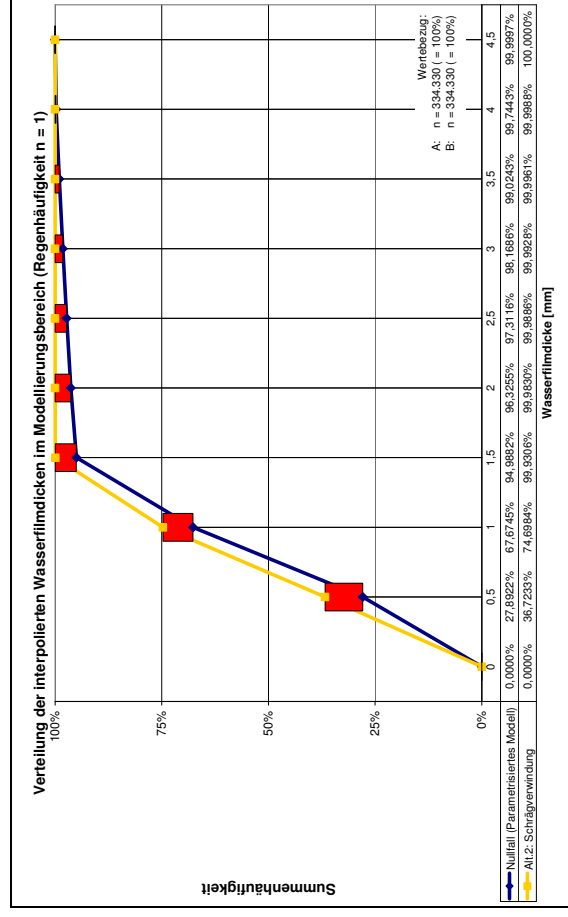
Alt. 1.1: Geteilte Verwindung (zVWB 50m)



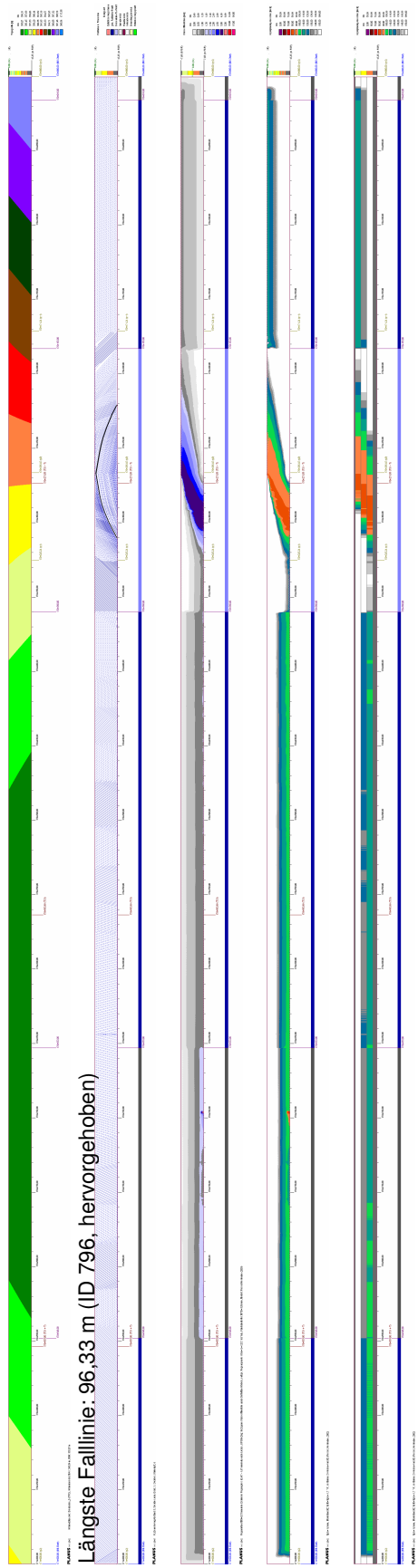
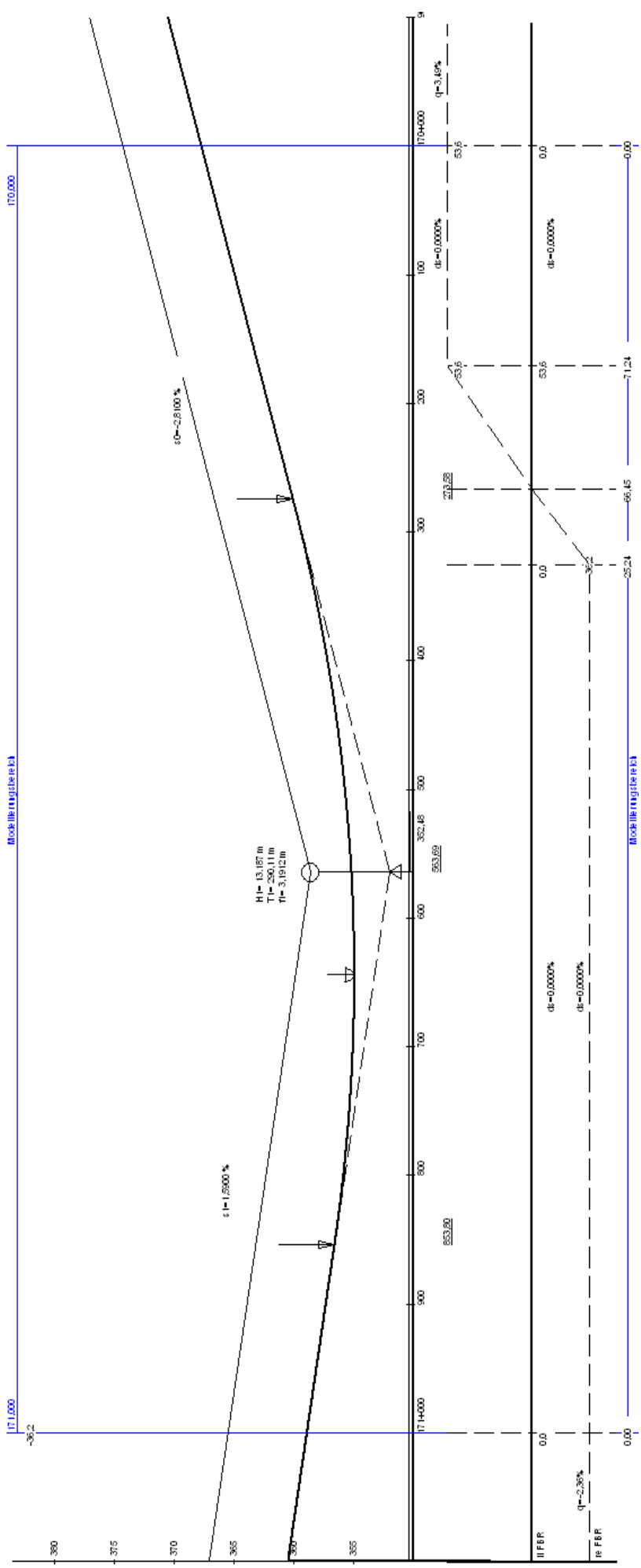
Alt. 1.2: Geteilte Verwindung (zVWB 25m)



Alt. 2: Schrägverwindung



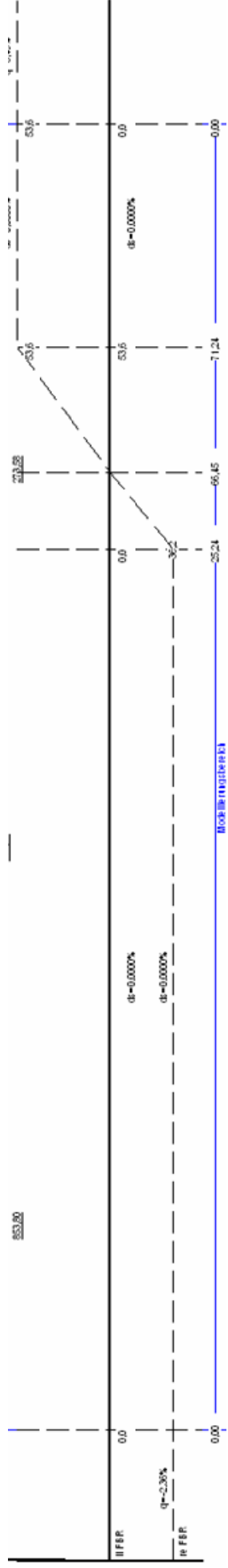
App. F.6 Querneigungsband-Alternative 3.1 : Veränderte Gradientenlage im Querschnitt (linker Fahrbahnrand, DAA = 0,00)



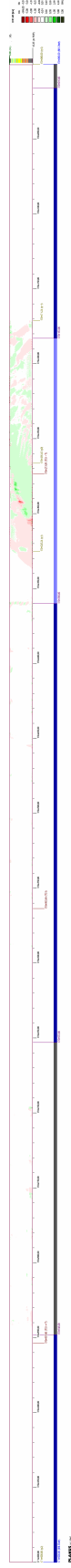
Fahrstreifen 1 : min Vaq = 88,0 km/h bei km 170+278,40 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 87,2 km/h bei km 170+290,40 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 86,4 km/h bei km 170+298,60

Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.6a Alternative 3.1: Veränderte Gradientenlage im Querschnitt (linker Fahrbahnrand, DAA = 0,00): Differenzwerte

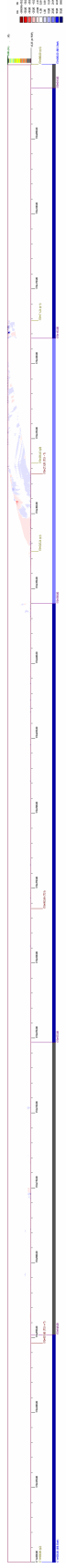


Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



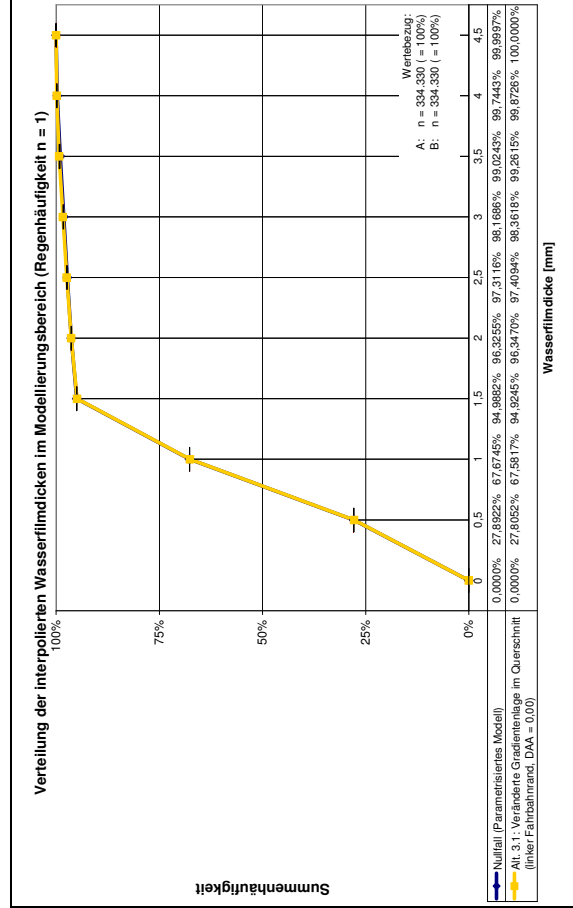
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | nur dargestellt, wenn V₀ ≤ 130 km/h)

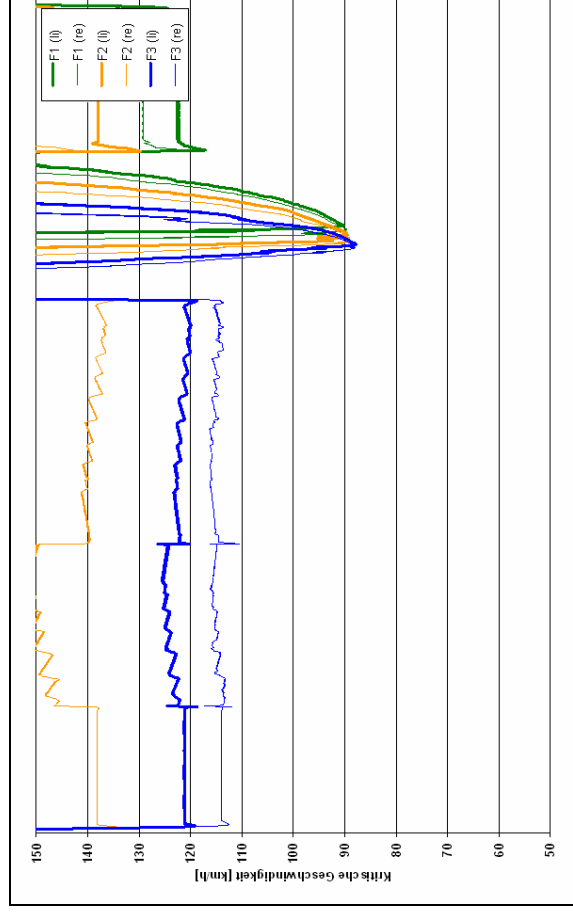


n = 1

Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)

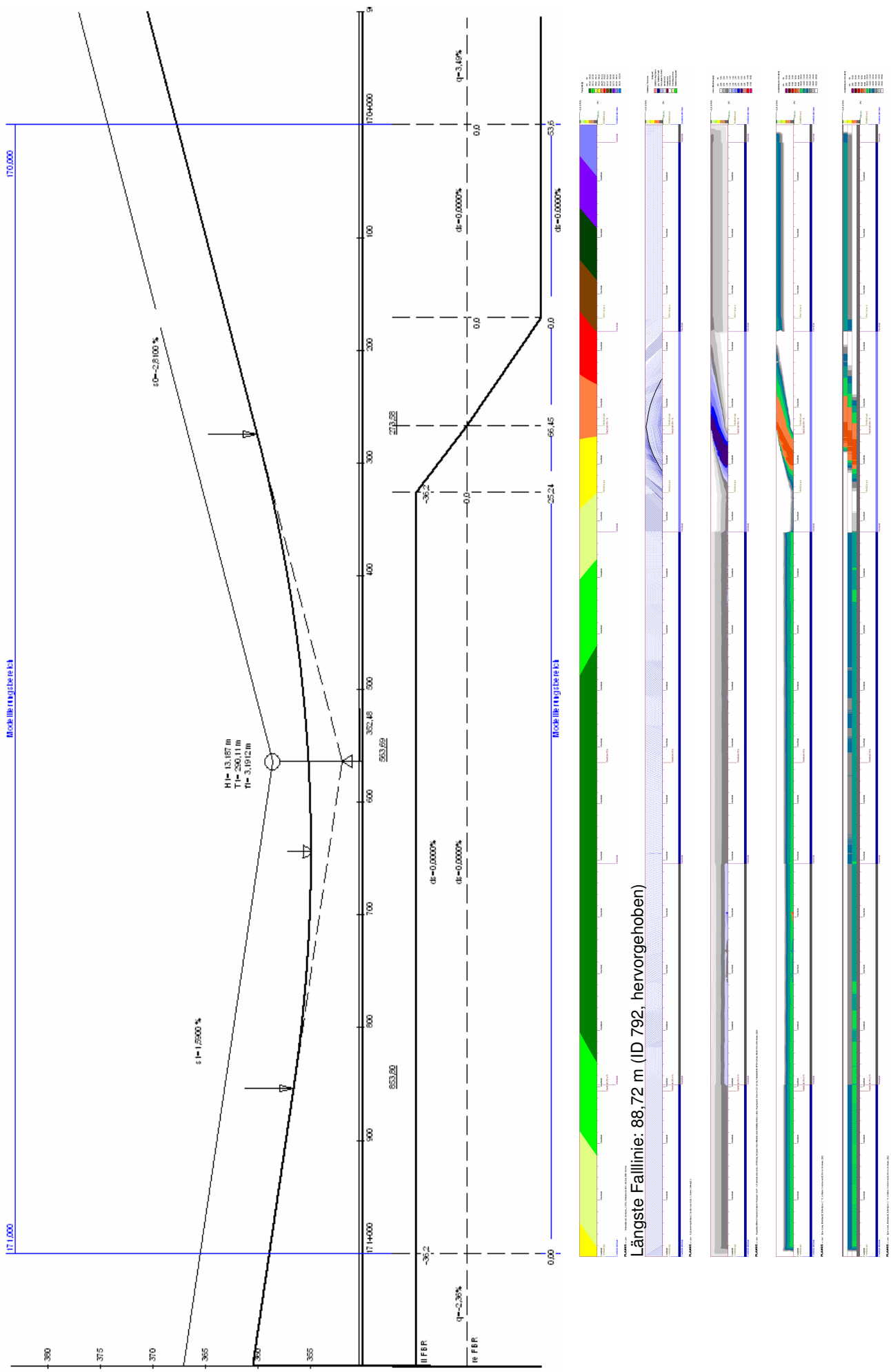


Radspuren (t=1,60 mm), Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)



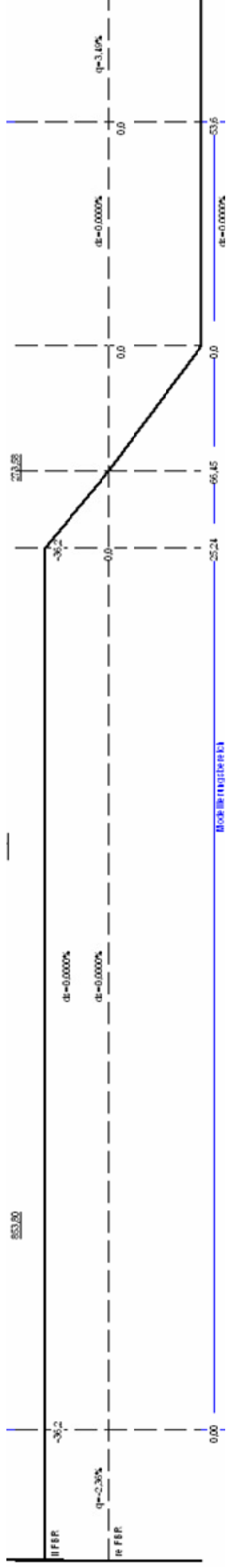
App. F.7

Querneigungsband-Alternative 3.2: Veränderte Gradientenlage im Querschnitt (rechter Fahrbahnrand, DAA = 1,00)

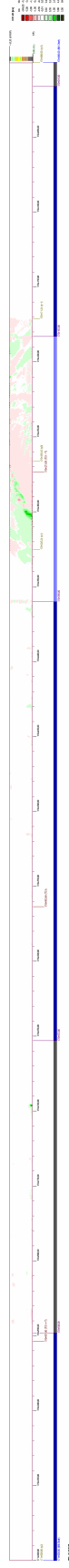


Fahrbahnrand 1: min Vaq = 87,0 km/h bei km 170+276,20 / Fahrbahnrand 2: min Vaq = 86,7 km/h bei km 170+284,40 / Fahrbahnrand 3: min Vaq = 85,5 km/h bei km 170+296,40

App. F.7a Alternative 3.2: Veränderte Gradientenlage im Querschnitt (rechter Fahrbahnrand, DAA = 1,00): Differenzwerte

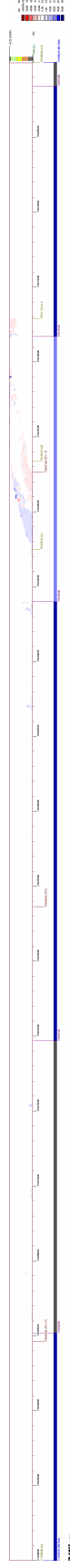


Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



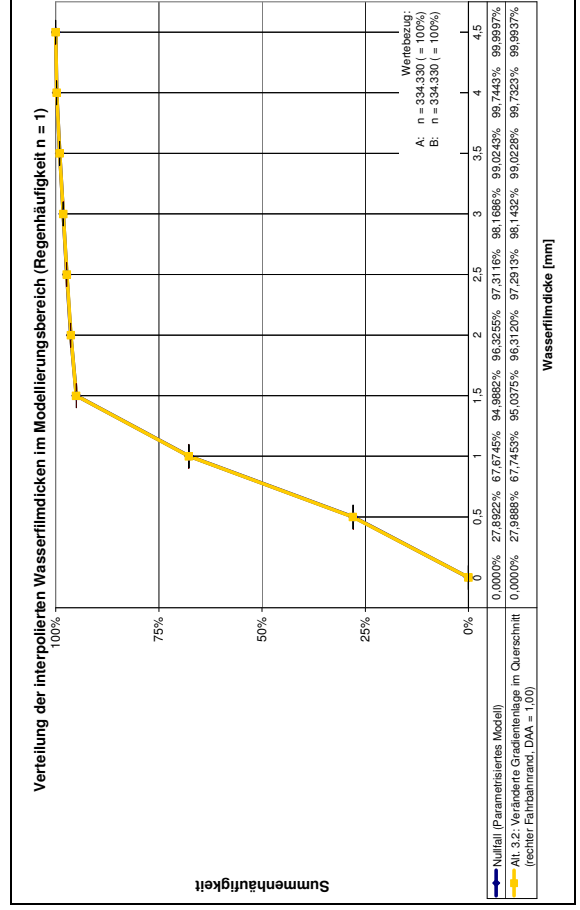
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | wenn V₁ > 130 km/h)

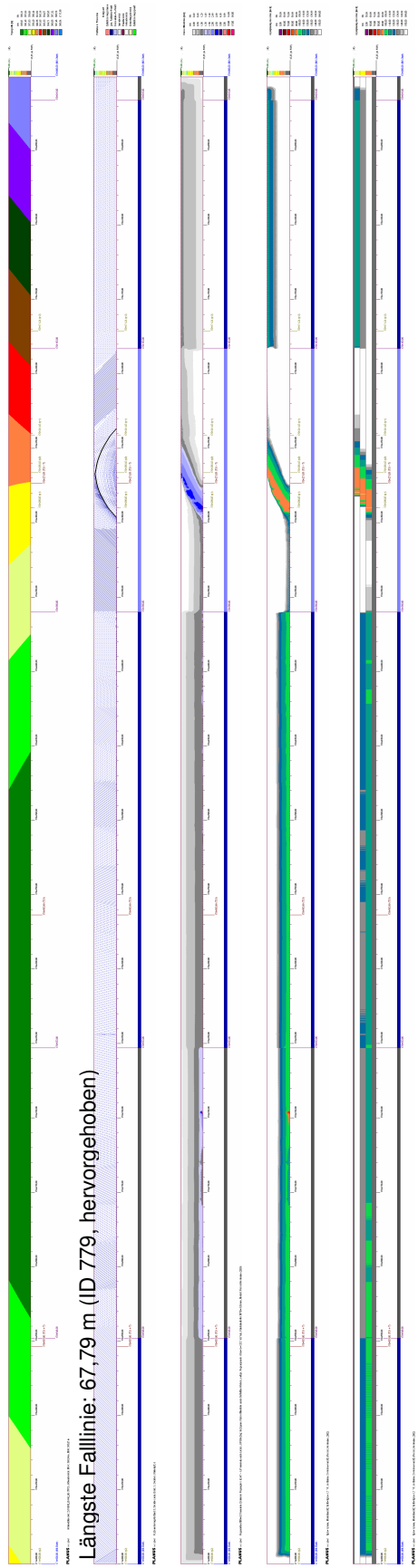
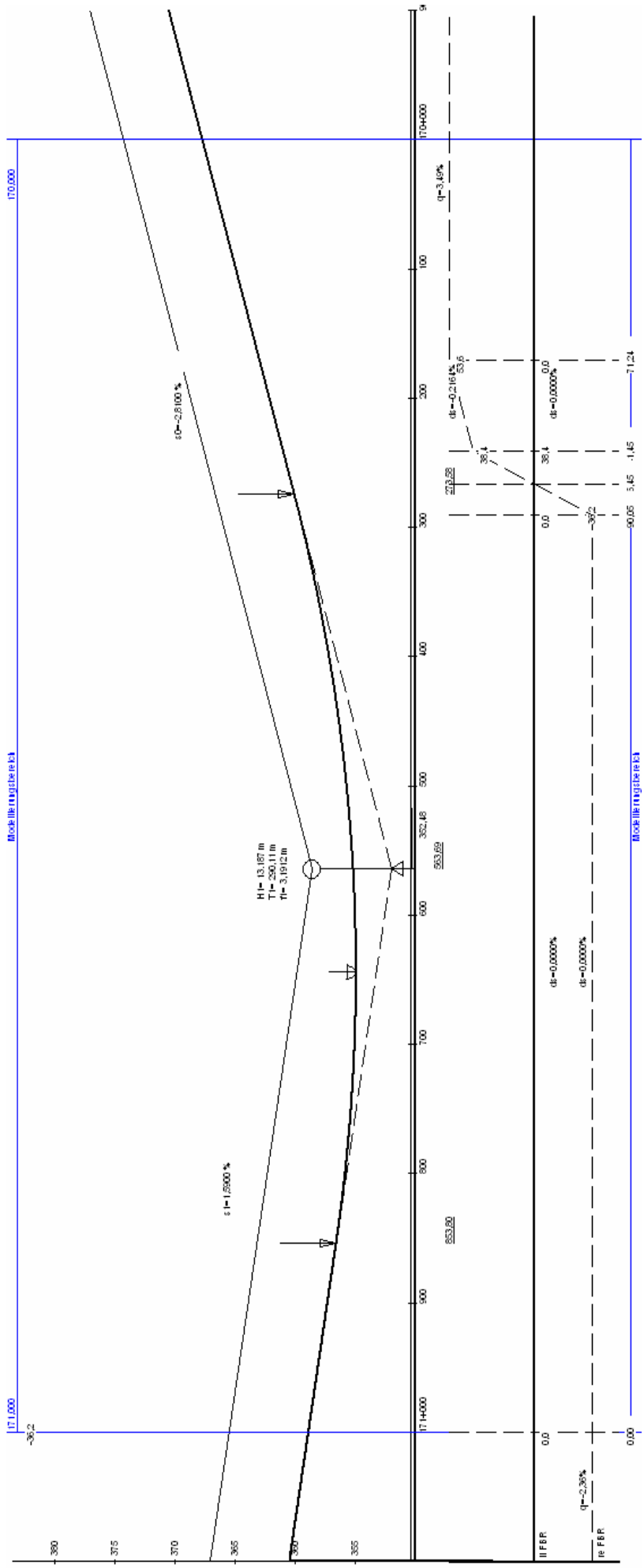


n = 1

Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)

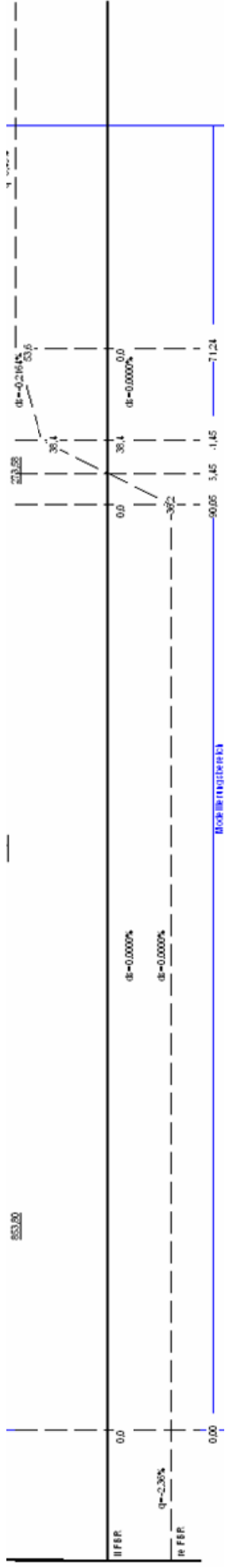


App. F.8 Querneigungsband-Alternative 4.1: Veränderte Gradientenlage und geteilte Verwindung (zVWB = 50 m; DAA = 0,00)

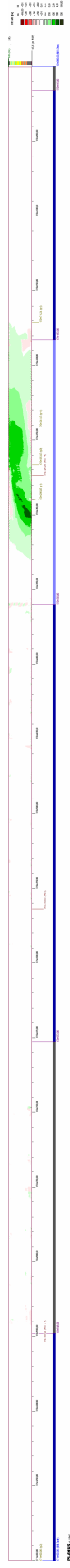


Fahrstreifen 1: min Vaq = 92,9 km/h bei km 170+279,60 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 92,8 km/h bei km 170+280,60 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 94,1 km/h bei km 170+289,80
 Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.8a Alternative 4.1: Veränderte Gradientenlage und geteilte Verwindung (zVWB = 50 m; DAA = 0,00): Differenzwerte

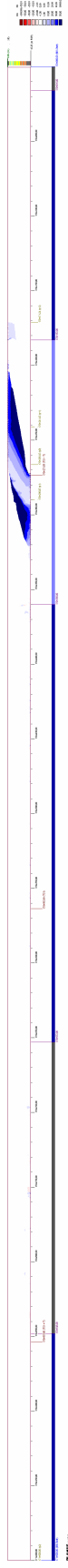


Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



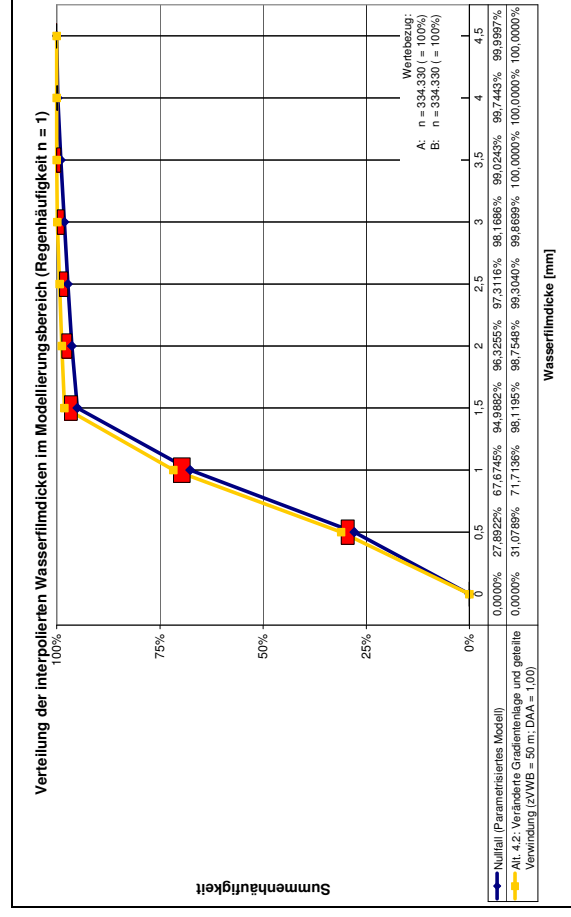
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | wenn V₁ > 130 km/h)

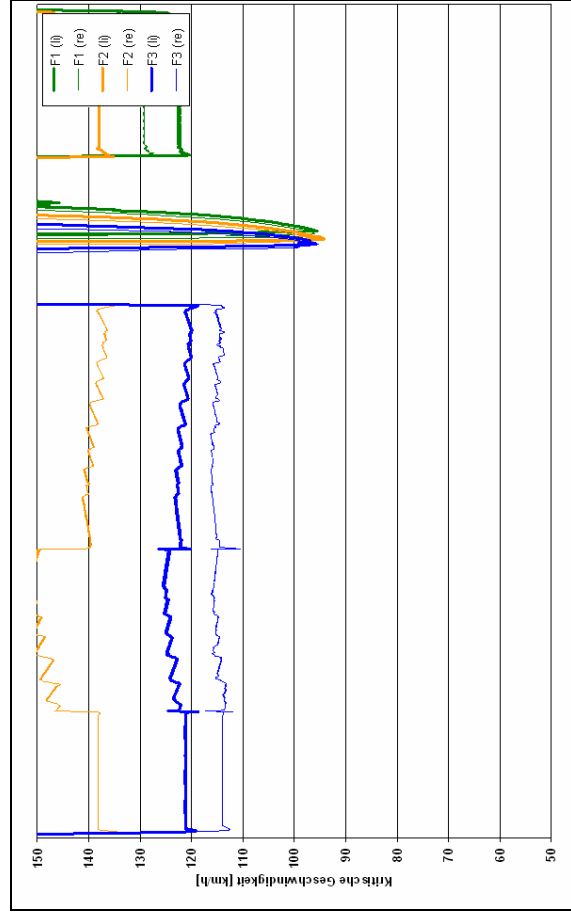


n = 1

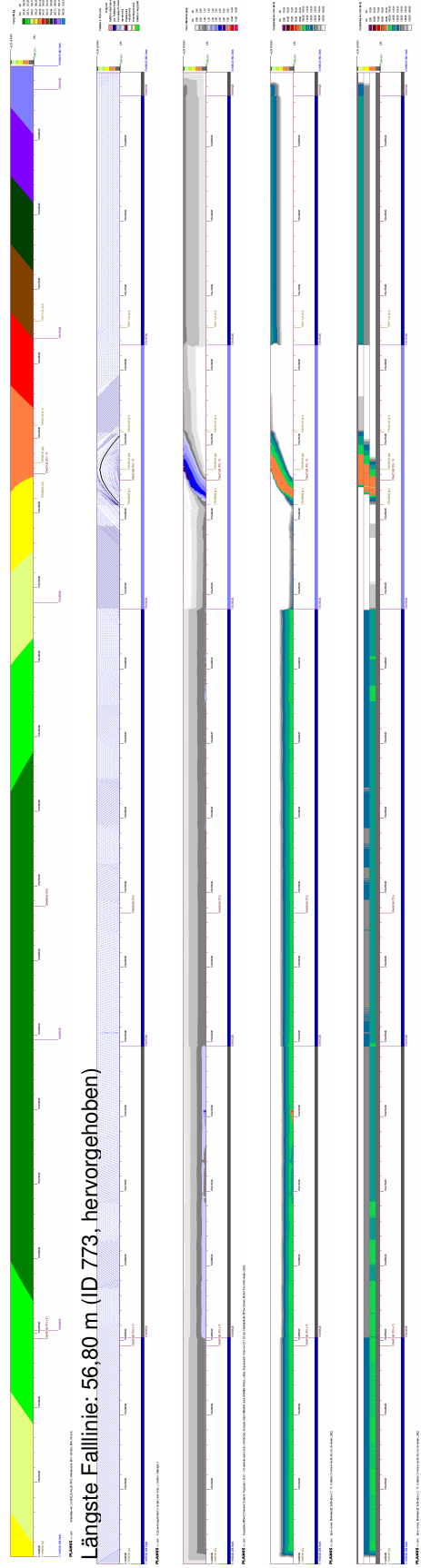
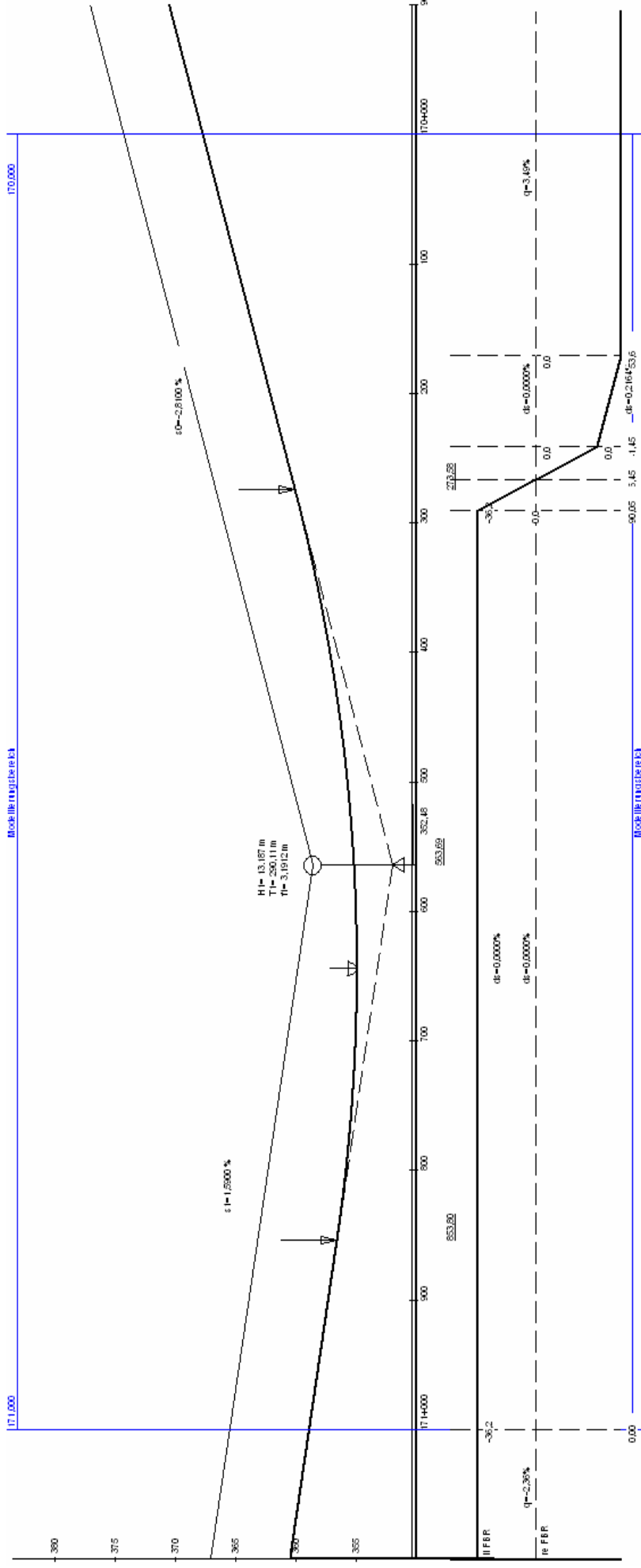
Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)



Radspuren (t=1,60 mm), Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)

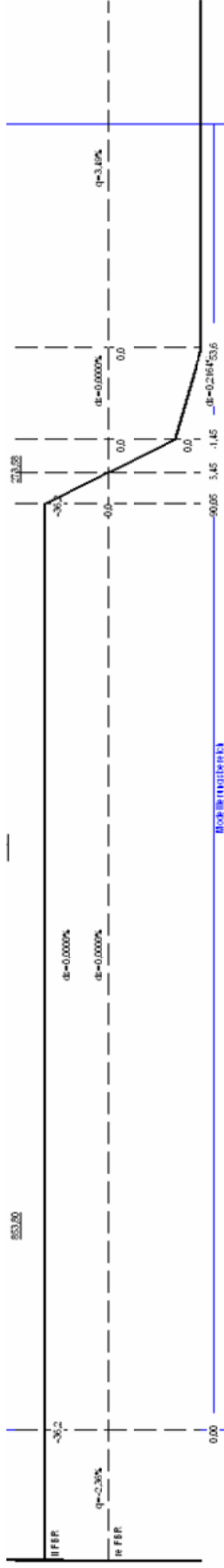


App. F.9 Querneigungsband-Alternative 4.2: Veränderte Gradientenlage und geteilte Verwindung (zVWB = 50 m; DAA = 1,00)

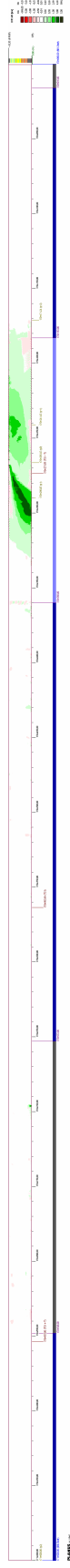


Fahrstreifen 1: min Vag = 89,9 km/h bei km 170+266,60 / Fahrstreifen 2: min Vag = 90,5 km/h bei km 170+277,60 / Fahrstreifen 3: min Vag = 92,2 km/h bei km 170+278,20
 Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.9a Alternative 4.2: Veränderte Gradientenlage und geteilte Verwindung (zVWB = 50 m; DAA = 1,00): Differenzwerte

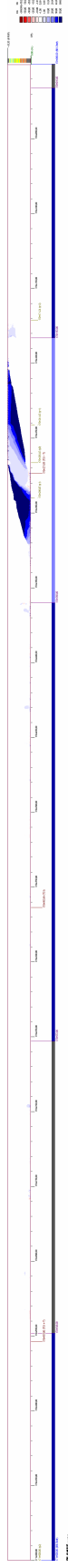


Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



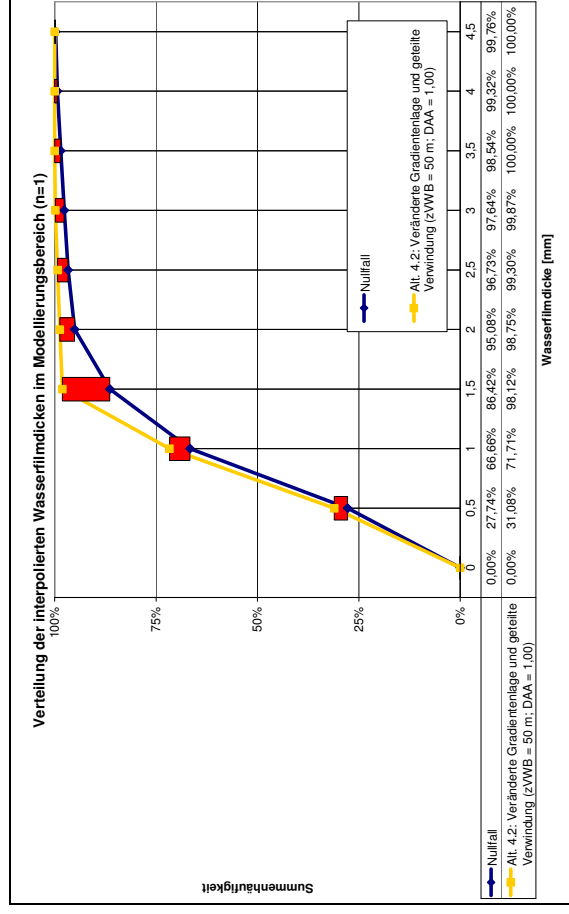
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | wenn V₁ > 130 km/h)

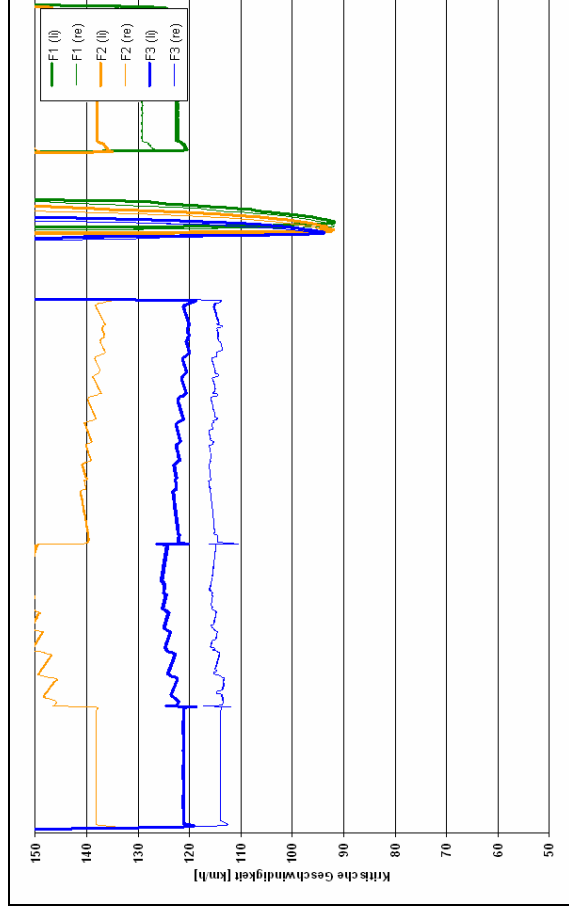


n = 1

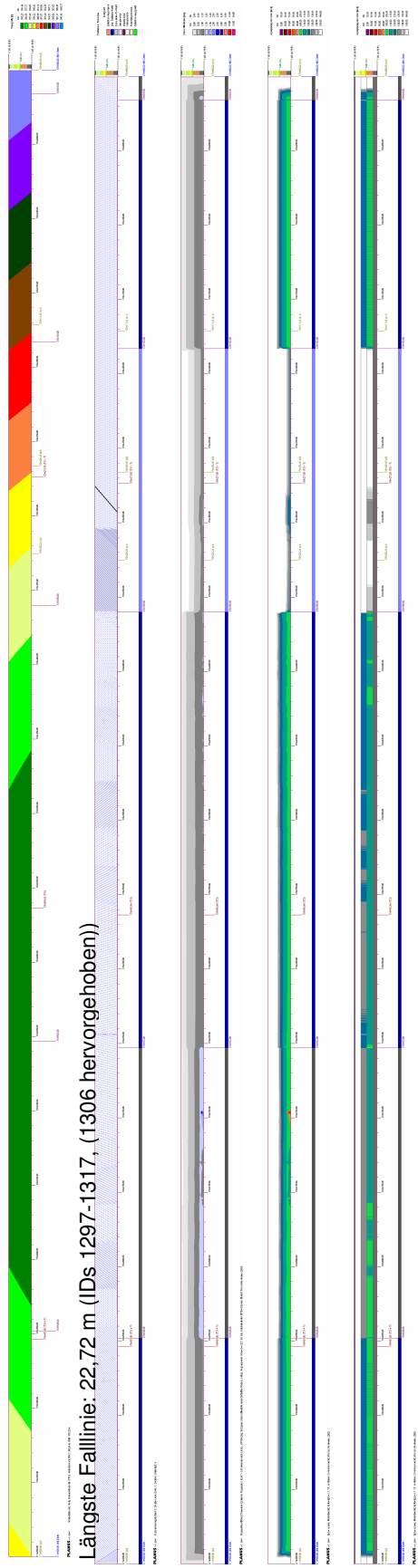
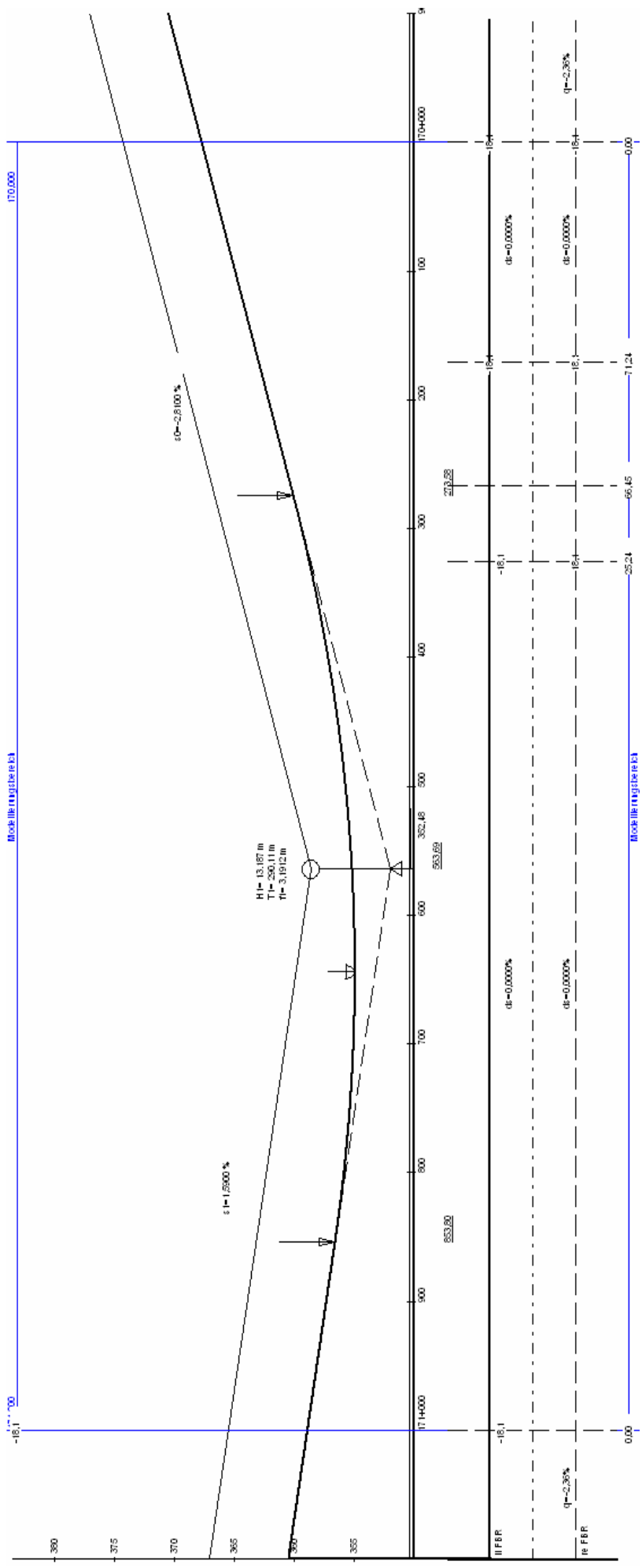
Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)



Radspuren (t=1,60 mm), Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)

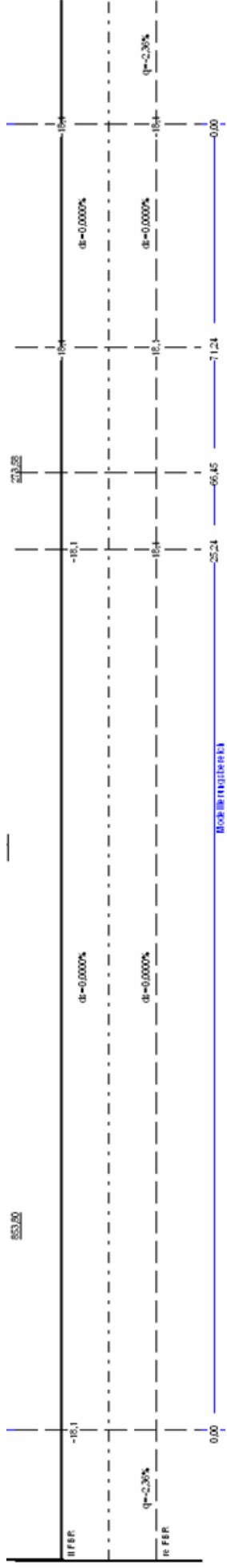


App. F.10 Querneigungsband-Alternative 5.1 : Querneigung zur Kurvenaußenseite (linker Fahrbahnrand oben)

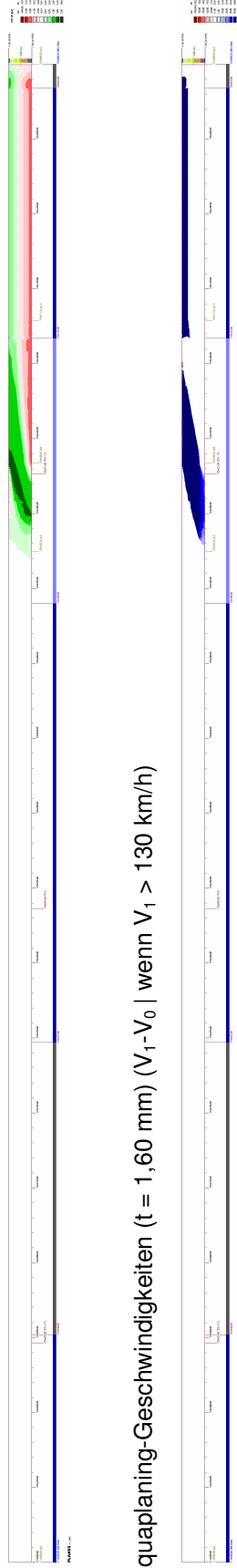


Fahrtstreifen 1 : min Vaq = 177,3 km/h bei km 170+182,40 / Fahrtstreifen 2 : min Vaq = 124,0 km/h bei km 170+016,00 / Fahrtstreifen 3 : min Vaq = 105,8 km/h bei km 170+652,80
 Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.10a Querneigungsband-Alternative 5.1 : Querneigung zur Kurvenaußenseite (linker Fahrbahnrand oben): Differenzwerte

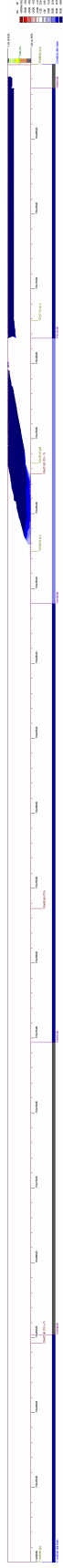


Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



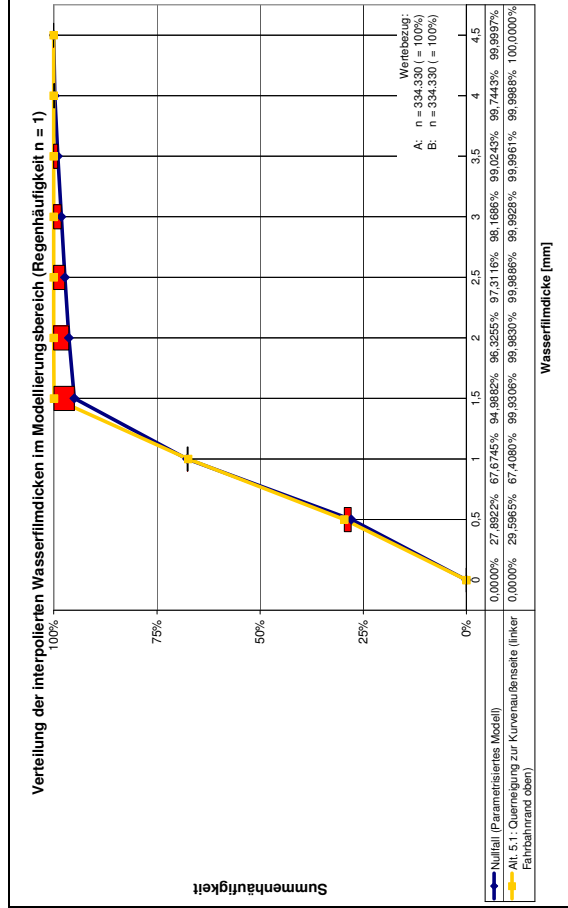
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | wenn V₁ > 130 km/h)

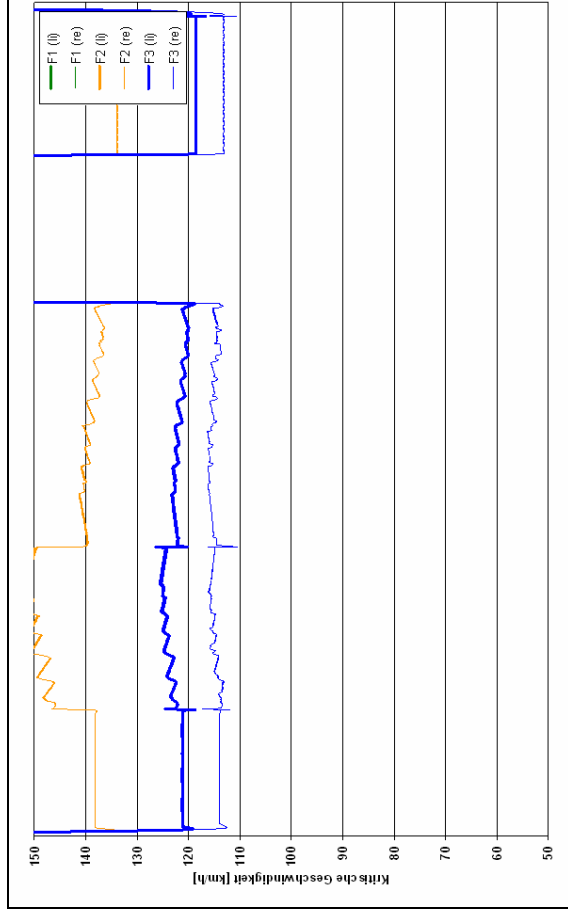


n = 1

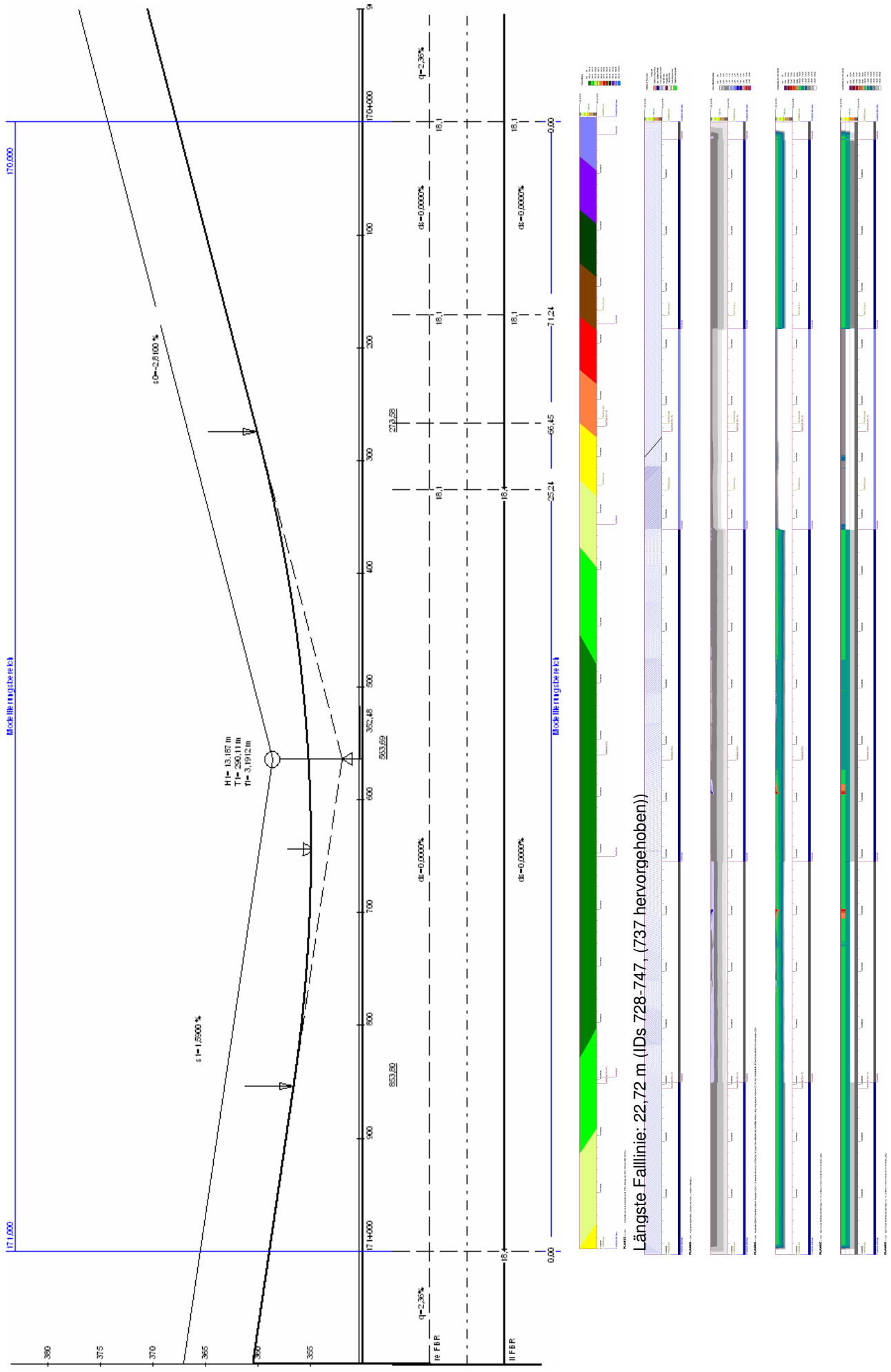
Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)



Radspuren (t=1,60 mm), Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)



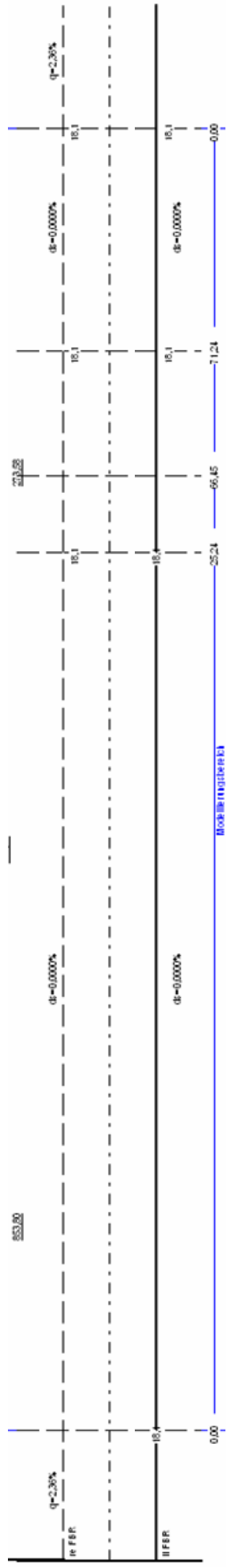
App. F.11 Querneigungsband-Alternative 5.2: Querneigung zur Kurvenaußenseite (rechter Fahrbahnrand oben)



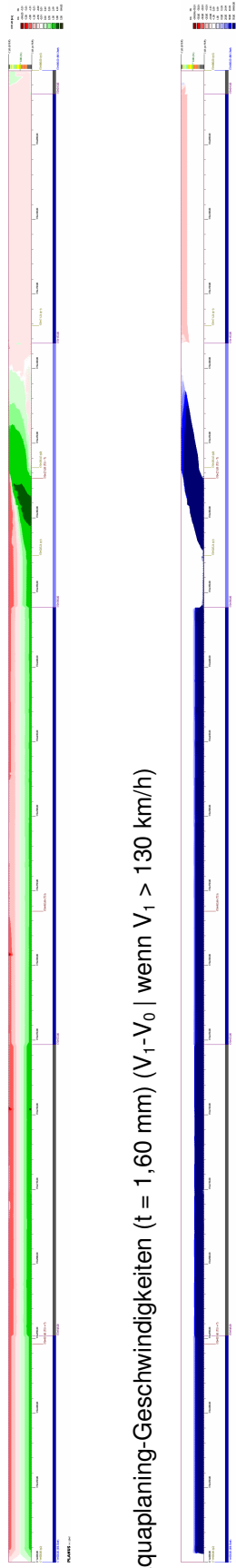
Fahrbahn 1: min Vaq = 73,6 km/h bei km 170+592,20 / Fahrbahn 2: min Vaq = 112,2 km/h bei km 170+016,00 / Fahrbahn 3: min Vaq = 139,5 km/h bei km 170+180,20

Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen

App. F.11a Querneigungsband-Alternative 5.2: Querneigung zur Kurvenaußenseite (rechter Fahrbahnrand oben): Differenzwerte

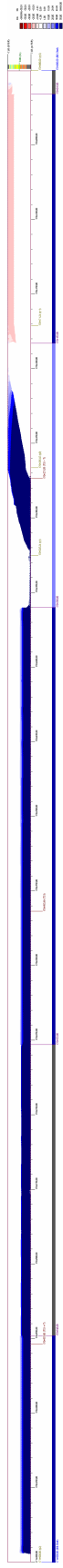


Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



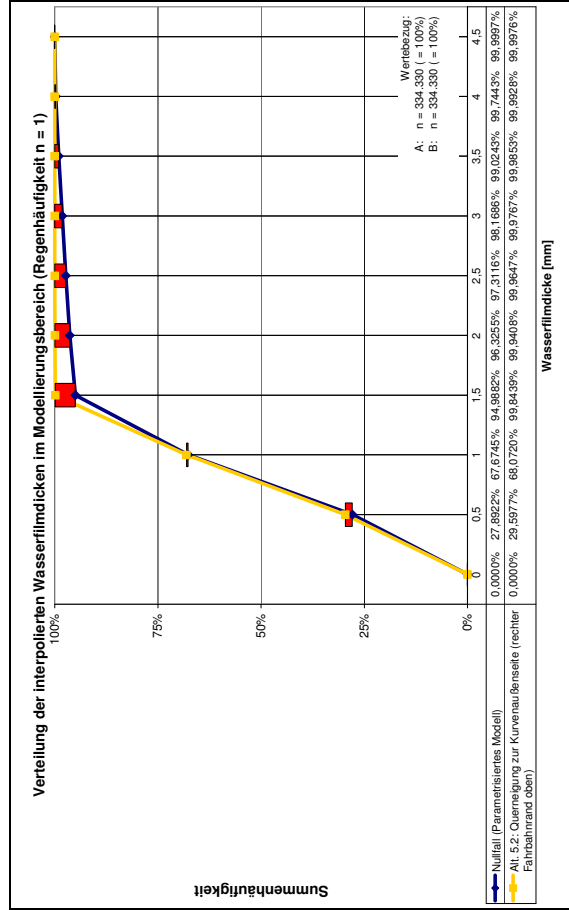
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten ($V_1 - V_0$) | wenn $V_1 > 130$ km/h

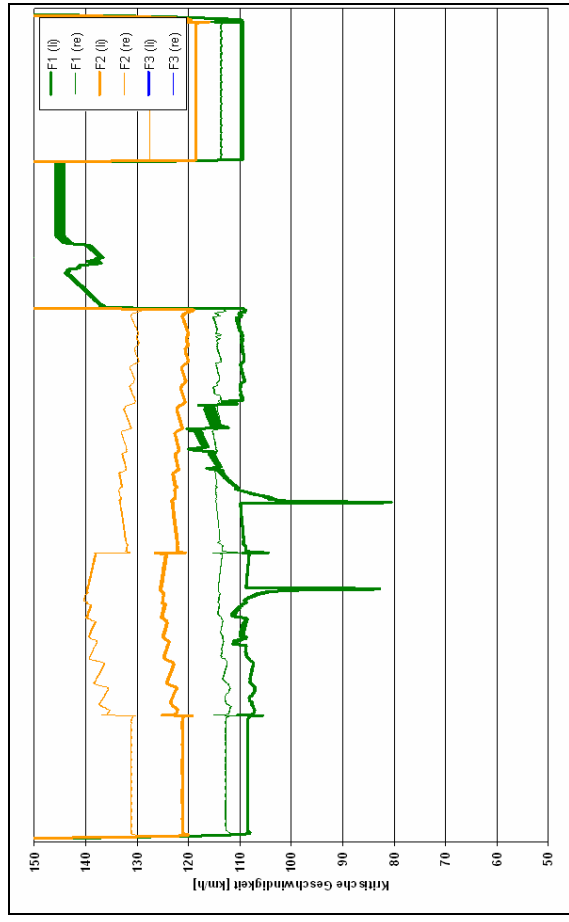


n = 1

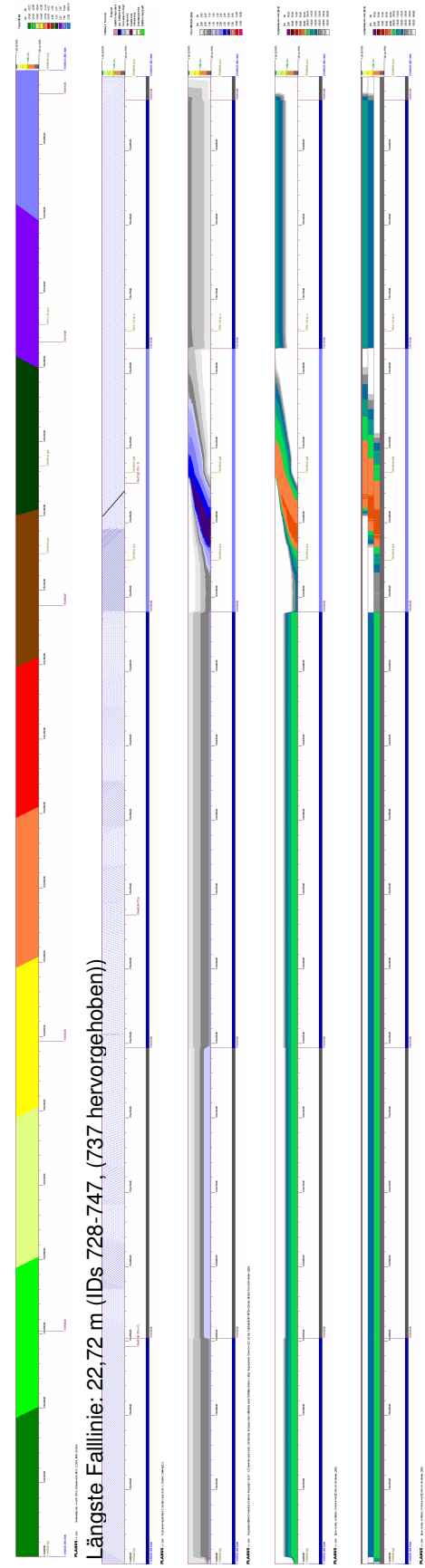
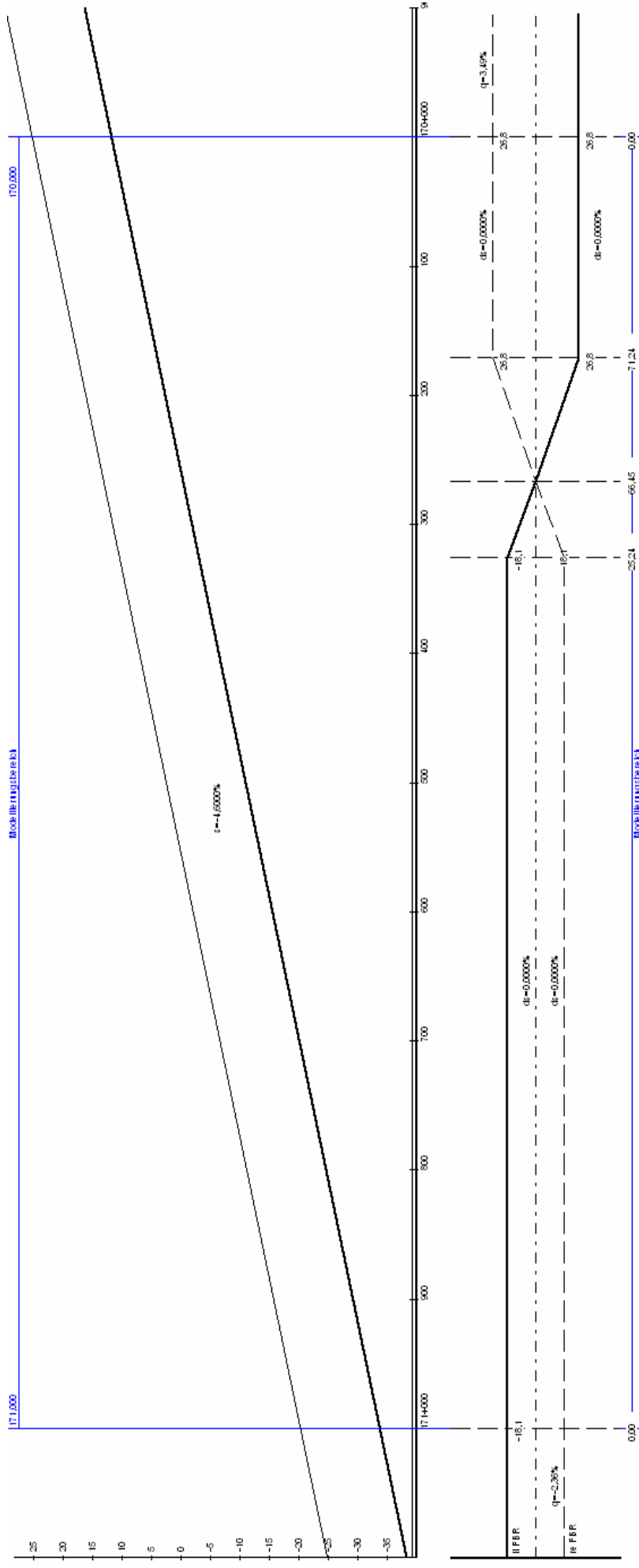
Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)



Radspuren ($t=1,60$ mm), Regenhäufigkeit $n = 1$ ($r = 125,7$ l/(s•ha), $i = 0,7542$ mm/min)



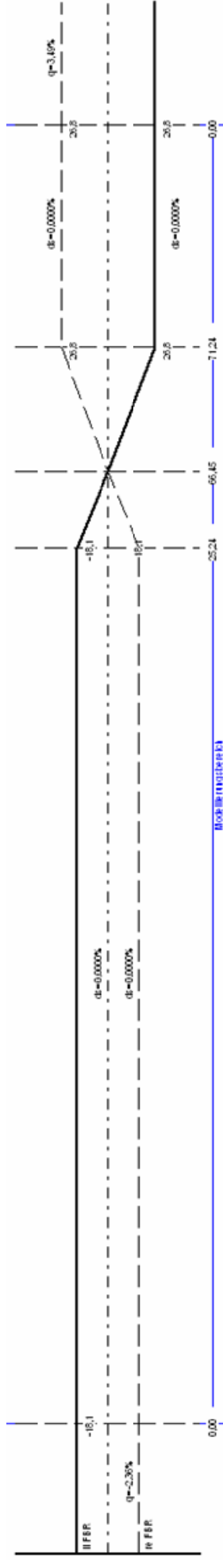
App. F.12 Alternative 6.1: Erhöhung der Längsneigung s um 1,80% (auf s = -4,60%)



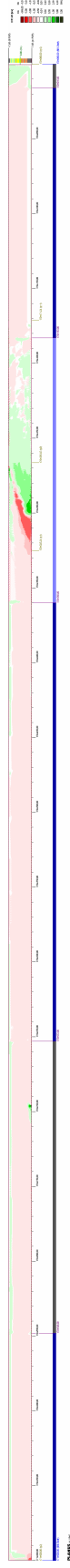
Längste Falllinie: 22,72 m (IDs 728-747, (737 hervorgehoben))

Fahrstreifen 1: min Vaq = 89,8 km/h bei km 170+281,80 / Fahrstreifen 2: min Vaq = 88,8 km/h bei km 170+297,60 / Fahrstreifen 3: min Vaq = 87,7 km/h bei km 170+308,00

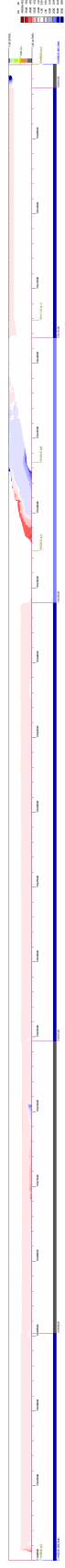
App. F.12a Alternative 6.1: Erhöhung der Längsneigung s um 1,80% (auf s=-4,60%): Differenzwerte



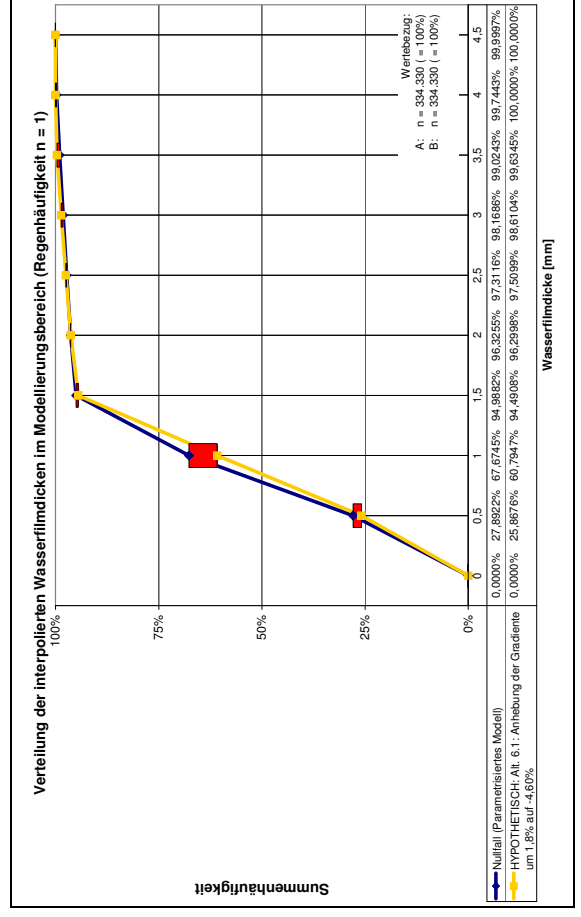
Differenzen Wasserfilmdicken (WFD₁ – WFD₀)



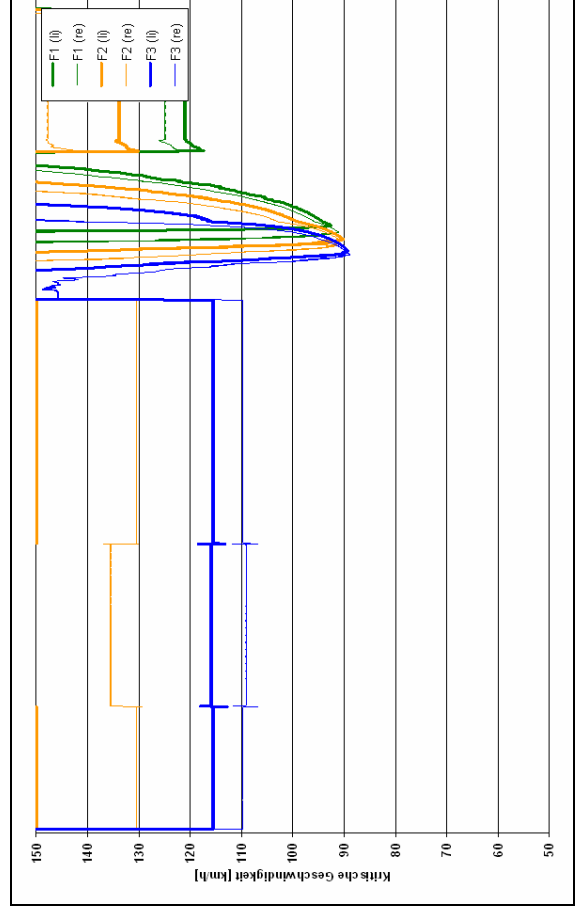
Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | wenn V₁ > 130 km/h)



Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdicken (Vgl. zum Ohne-Fall)

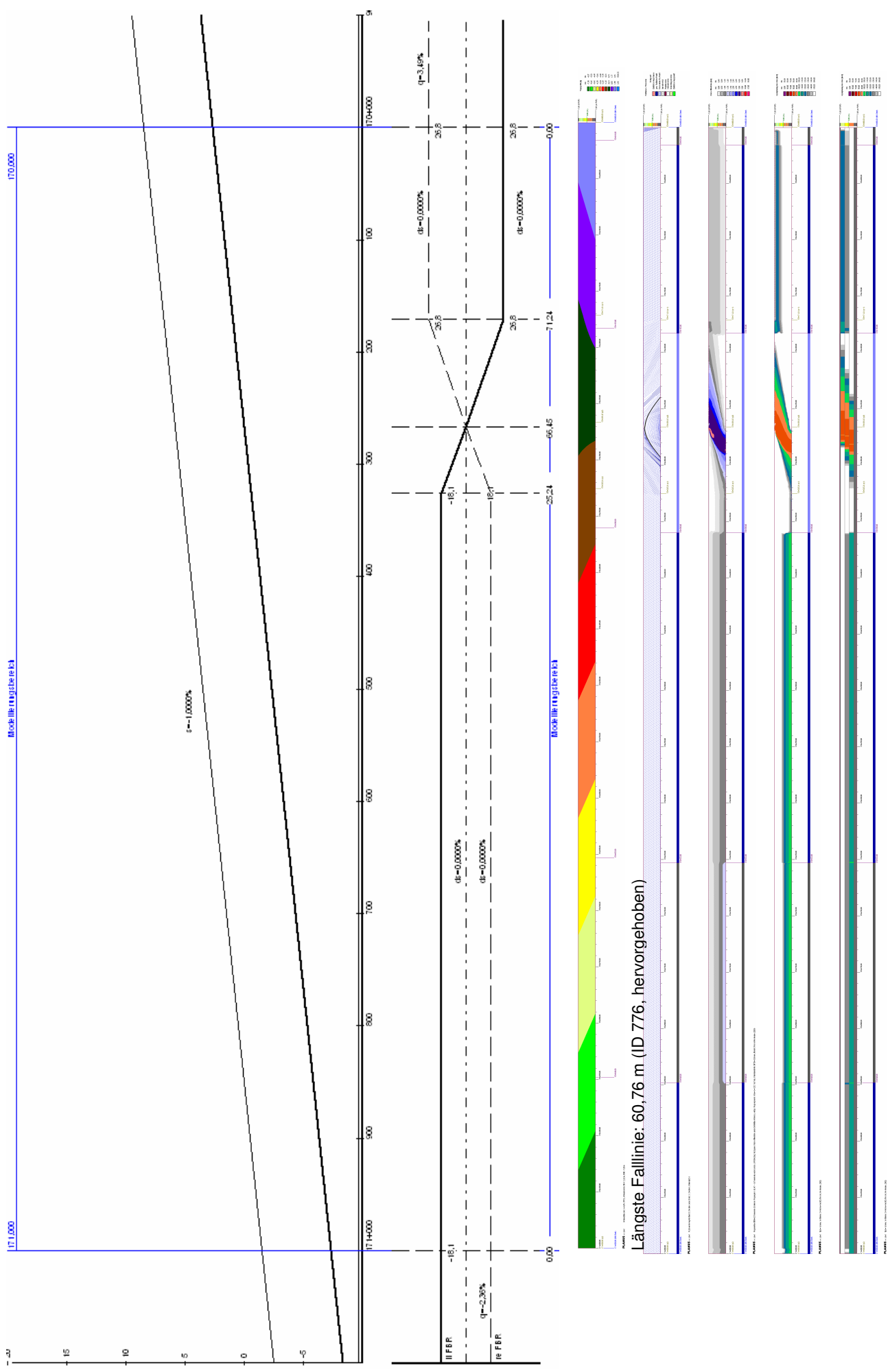


Radspuren (t=1,60 mm), Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s•ha), i = 0,7542 mm/min)



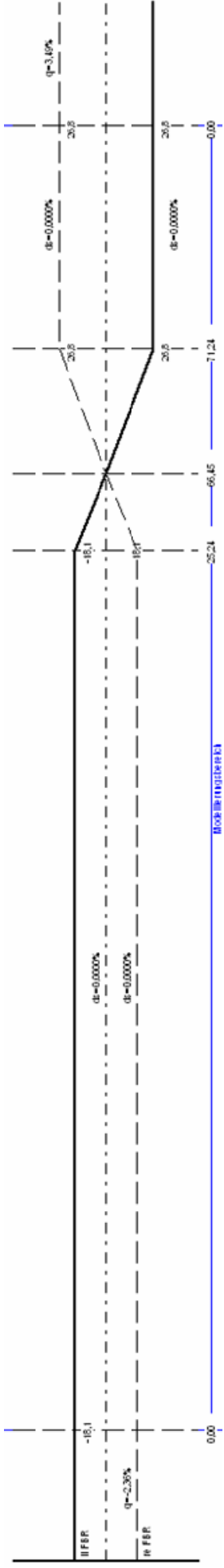
App. F.13

Alternative 6.2: Abmilderung der Längsneigung s um 1,80% (auf s = -1,00%)

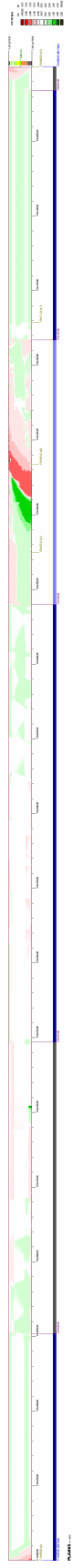


Fahrtstreifen 1: min Vaq = 83,6 km/h bei km 170+273,00 / Fahrtstreifen 2: min Vaq = 84,2 km/h bei km 170+273,80 / Fahrtstreifen 3: min Vaq = 84,5 km/h bei km 170+281,40

App. F.13a Alternative 6.2: Abmilderung der Längsneigung s um 1,80% (auf s = -1,00%): Differenzwerte

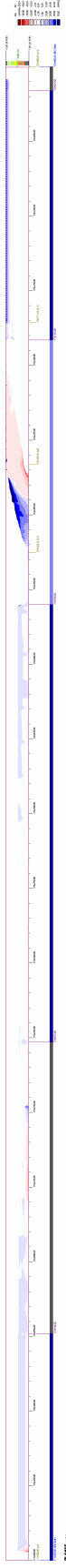


Differenzen Wasserfilmdecken (WFD₁ – WFD₀)



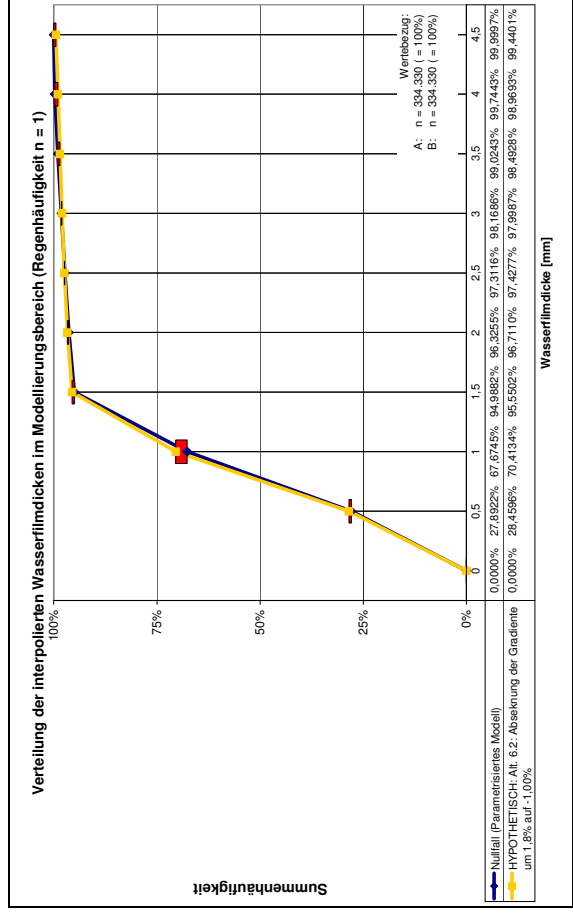
n = 1

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten (t = 1,60 mm) (V₁-V₀ | wenn V₁ > 130 km/h)

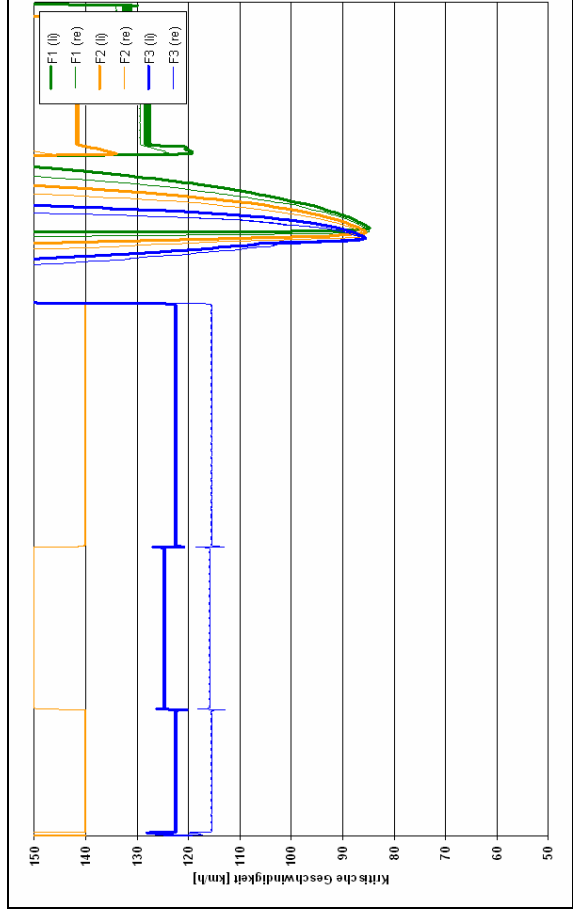


n = 1

Summenhäufigkeiten interpolierte Wasserfilmdecken (Vgl. zum Ohne-Fall)

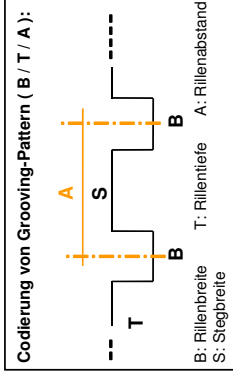


Radspuren (t=1,60 mm), Regenhäufigkeit n = 1 (r = 125,7 l/(s·ha), i = 0,7542 mm/min)



APP. G LEGENDEN

Codierungsschema für Grooving-Pattern im Text:



Wasserfilmdicken [mm]

Klasse Farbcode	von	bis
0	0,00	0,49
1	0,50	0,99
2	1,00	1,29
3	1,30	1,49
4	1,50	1,99
5	2,00	2,49
6	2,50	2,99
7	3,00	4,99
8	5,00	9,99
9	10,00	14,99
10	15,00	99,00

Geschwindigkeiten Längs-Aquaplaning [km/h]

Klasse Farbcode	von	bis
0	0,00	59,99
1	60,00	69,99
2	70,00	79,99
3	80,00	89,99
4	90,00	99,99
5	100,00	109,99
6	110,00	119,99
7	120,00	129,99
8	130,00	139,99
9	140,00	149,99
10	150,00	99999,00

Differenzen Wasserfilmdicken [mm] (Vorher – Nachher)

Klasse Farbcode	von	bis
0	-999,00	-5,01
1	-5,00	-3,01
2	-3,00	-1,01
3	-1,00	-0,51
4	-0,50	-0,02
5	-0,01	0,01
6	0,02	0,49
7	0,50	0,99
8	1,00	2,99
9	3,00	4,99
10	5,00	999,00

Differenzen Aquaplaning-Geschwindigkeiten [km/h] (Vorher – Nachher)

Klasse Farbcode	von	bis
0	-99999,00	-50,01
1	-50,00	-30,01
2	-30,00	-20,01
3	-20,00	-10,01
4	-10,00	-1,01
5	-1,00	0,99
6	1,00	9,99
7	10,00	19,99
8	20,00	29,99
9	30,00	49,99
10	50,00	99999,00

