

**BEARBEITUNG DES VORENTWURFS  
FÜR AUSGEWÄHLTE VARIANTEN  
MIT DEM PROGRAMMSYSTEM TROP**

*Wilhelm CASPARY  
Hansbert HEISTER  
Walter WELSCH*

In: *CASPARY, Wilhelm / WELSCH, Walter (Hrsg.) [1982]:*

**Beiträge zur großräumigen Neutrassierung**

Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 6, S. 159-174

ISSN: 0173-1009



W. Caspary, H. Heister und W. Welsch

---

## 1. Einleitung

Die Bearbeitung großräumiger Neutrassierungen ist im dichtbesiedelten Mitteleuropa mit seinem gut ausgebauten Verkehrsnetz eine nur noch selten gestellte, dann aber höchst komplizierte Aufgabe. Die Autoren dieses Beitrags hatten Gelegenheit, im Rahmen von zwei Planungsstudien, die der BMFT finanziert hat, mitzuarbeiten, wobei ihnen die Aufgabe zufiel, für in der Vorplanung ausgewählte Varianten den Vorentwurf durchzuführen. Wegen des außergewöhnlichen Umfangs der Aufgabe - es ging darum, für ein elektromagnetisches Schnellbahnsystem (EMS) mit  $V_E = 400$  km/h und ein Rad-Schiene-System (R/S) mit  $V_E = 300$  km/h eine Städteverbindung von Frankfurt/Main nach Paris zu planen - war es geboten, die traditionelle Arbeitsweise beim Vorentwurf völlig neu zu überdenken und eine Lösung anzustreben, die die heutigen Möglichkeiten der digitalen und graphischen Datenverarbeitung nutzt, um möglichst wirtschaftlich zum Ziel zu gelangen.

Das Ergebnis dieser Vorüberlegungen war der Entschluß, ein neues Trassenoptimierungsprogrammsystem (TROP) zu entwickeln, das die Arbeit des Trassierungsingenieurs in allen Phasen des Vorentwurfs begleitet. Das Programm übernimmt alle mathematisch faßbaren Aufgaben und erweitert den Entscheidungsspielraum des Entwurfsbearbeiters, indem es im Dialog, für gewünschte Varianten, sofort die nötigen Berechnungen durchführt. Jederzeit kann der aktuelle Status des Entwurfs in Form von Tabellen und Graphiken sichtbar gemacht werden, da alle Ergebnisse und Teilergebnisse als Bestandteile des digitalen Trassensystems permanent zur Verfügung stehen.

## 2. Überblick über das Programmsystem TROP

Die rechnergestützte Bearbeitung des Vorentwurfs wurde in vier Phasen gegliedert.

Die erste Phase besteht darin, den für das Projekt bedeutsamen Inhalt der Topographischen Karte 1:25000 (TK 25) in den Rechner einzuspeisen. Diese Digi-

talisierung der Karte kann sich auf den Interessenstreifen beschränken, der in der Vorplanung festgelegt wurde. Sie umfaßt neben dem topographischen Karteninhalt alle im Zuge der Vorplanung eingetragenen Ergänzungsinformationen. Das Ergebnis ist ein digitales Informationsmodell, auf das in allen folgenden Arbeitsgängen zurückgegriffen werden muß.

In der zweiten Phase des Vorentwurfs wird der Grundriß bearbeitet. Dabei wird zunächst untersucht, wo Änderungen der aus der Vorplanung übernommenen Freihandlinie nötig und sinnvoll sind. Danach wird die Freihandlinie durch eine Folge von zulässigen Trassierungselementen (Geraden, Kreise, Übergangsbögen) ersetzt. Das Ergebnis wird in das digitale Trassenmodell übernommen.

Die Bearbeitung der Gradienten erfolgt in Phase drei. Die graphisch entworfenen Gradientenparameter werden zusammen mit einem Kostenmodell und den vorgegebenen Zwangspunkten in ein Optimierungsprogramm eingespeist, das nach dem mathematisch strengen Verfahren der dynamischen Optimierung die Folge von zulässigen Gradientenelementen ermittelt, die minimale Kosten erzeugt. Das Ergebnis wird wiederum ins digitale Trassenmodell übernommen.

Das Programmsystem erlaubt es, an dieser Stelle in die Grundrißbearbeitung zurückzuspringen, um durch Verschiebungen des Grundrisses eine eventuell noch kostengünstigere Gradientenführung zu ermöglichen. Es zeigte sich jedoch bald, daß ein solches iteratives Vorgehen nur selten sinnvoll ist, da die Gradientenführung in der Regel nach der mathematischen Kostenoptimierung noch geändert wird, um ästhetische und systemspezifische Kriterien zu erfüllen und um die Umweltverträglichkeit zu verbessern.

In der abschließenden vierten Phase des Vorentwurfs werden die Investitionskosten berechnet und zwar sowohl für die kostengünstigste Lösung als auch für die aus den genannten Gründen abgeänderte, endgültige Linienführung. Außerdem wird das Ergebnis in Grundriß und Längsschnitt dargestellt und mit den Kartenunterlagen zusammenkopiert. Statistische Auswertungen nach Kosten- und Fahrwegarten sowie eine Analyse der Achsengeometrie runden das Bild ab.

In Abbildung 1 ist der Arbeitsprozeß für den Vorentwurf dargestellt. Das digitale Trassenmodell wird durch das Programmsystem TROP Zug um Zug aufgebaut, bis es schließlich sämtliche Ergebnisse des Vorentwurfs enthält. Durch die vorhandenen Graphikprogramme können in jeder Phase der inzwischen erreichte Stand oder auch Auszüge daraus als Plots ausgegeben werden.

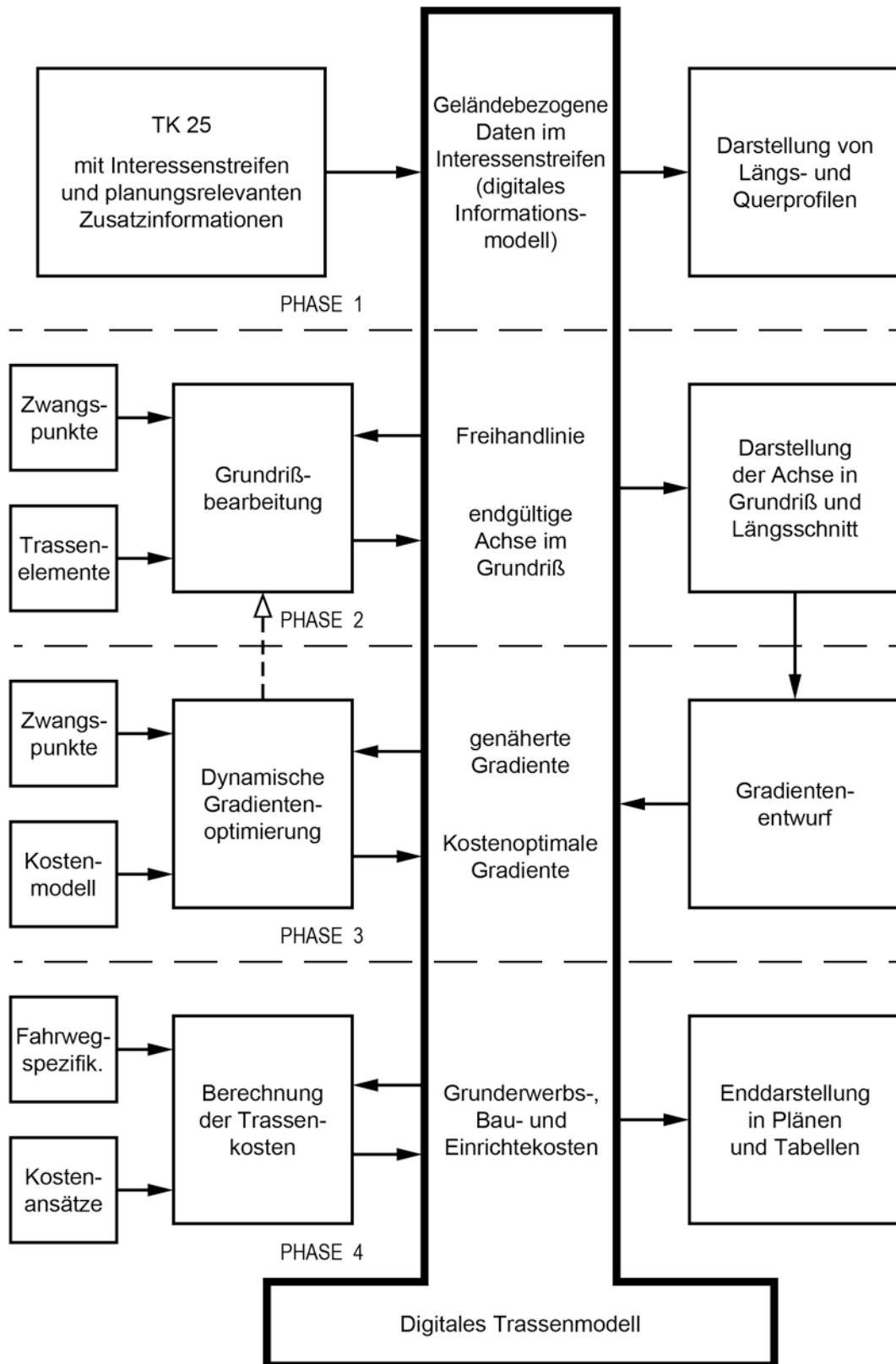


Abbildung 1: Übersicht über die Bearbeitung des Trassenvorentwurfs mit dem interaktiven Programmsystem TROP

### 3. Aufbau des digitalen Informationsmodells

Die Basis des digitalen Informationsmodells und zugleich Grundlage für alle später folgenden Bearbeitungsschritte ist der Inhalt der Topographischen Karte 1:25000, ergänzt um für die Planung bedeutsame Zusatzinformationen, die im Zuge der Vorplanung erhoben werden. Da für die Vorentwurfsbearbeitung nur der Karteninhalt benötigt wird, der im in der Vorplanung festgelegten Interessenstreifen liegt, wurde eine Modellstruktur gesucht, die besonders für langgestreckte schmale Flächen geeignet ist. Außerdem sollte das Modell so beschaffen sein, daß es zwanglos der variablen Informationsdichte der Karte angepaßt werden kann. Unter diesen Gesichtspunkten erschien die bei digitalen Höhenmodellen übliche Speicherung der Information in einem quadratischen Raster wenig geeignet. Als günstigere Lösung wurde eine Datenorganisation in Profilen quer zum Interessenstreifen angesehen. Es wurde daher das für die Geländeaufnahme im Verkehrswegebau klassische Verfahren der Längs- und Querprofile zum Vorbild für die Datenorganisation im digitalen Informationsmodell ausgewählt.

Das Programm läßt dem Bearbeiter völlig freie Hand bei der Wahl der Profilrichtung, der Profilabstände und der Anzahl der Punkte pro Profil. Daher ist es möglich, mit einer minimalen Anzahl von Punkten eine dem Problem angemessene Genauigkeit des digitalen Modells zu erzielen. Da die folgenden Bearbeitungsphasen, z.B. Gradientenentwurf oder Kostenberechnung auf das digitale Modell in der Form zurückgreifen, wie es durch Messung in der Karte entstanden ist, ohne irgendeine zwischengeschaltete Interpolation oder Strukturänderung, wird die Kartengenauigkeit uneingeschränkt während des gesamten Vorentwurfs ausgenutzt.

Der praktische Aufbau des Informationsmodells beginnt damit, daß die Profile, die digitalisiert werden sollen, im Interessenstreifen eingetragen werden. Maßgebend für den gewählten Profilabstand ist, daß die Änderung des Karteninhalts zwischen zwei Profilen eine lineare Interpolation zulassen muß. Der Profilabstand wird daher fortlaufend der Informationsdichte der Karte angepaßt. Bei der nachfolgenden Digitalisierung der Profile werden zunächst Anfangs- und Endpunkte eingestellt und damit jedes Profil eindeutig im Landeskoordinatensystem lokalisiert. Alle weiteren Daten werden in einem profilbezogenen Spezialsystem bestimmt. Es sind dies die Lage der Freihandlinie und eine ausreichende Anzahl von Höhenpunkten (in der Regel Schnittpunkte des Profils mit Höhenlinien), so daß das Gelände durch eine zweidimensionale ku-

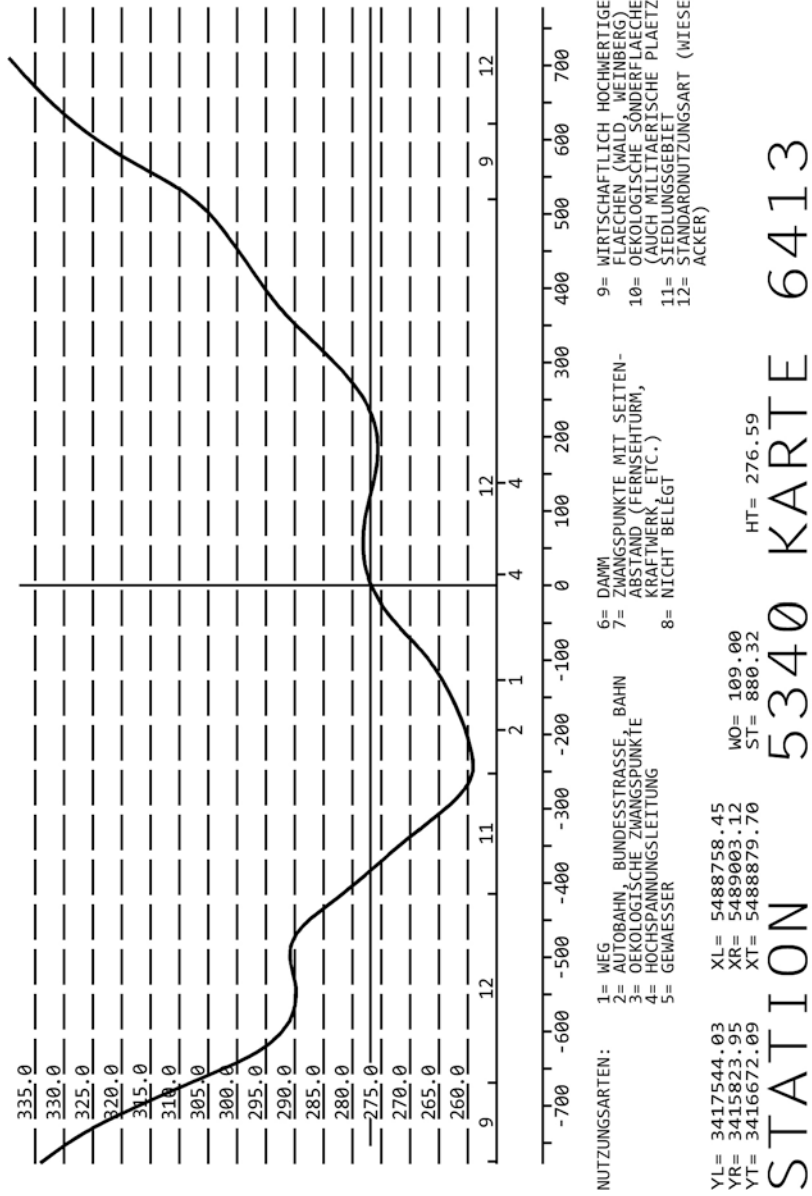


Abbildung 2: Kontrollausgabe eines digitalisierten Profils am Bildschirm

bische Spline-Funktion approximiert werden kann. Außerdem werden Flächen- und Liniennutzungen mit erfaßt. Bei Flächennutzungen werden die Schnittpunkte des Profils mit den Flächengrenzen digitalisiert und bei Liniennutzungen die Schnittpunkte des Profils mit dem Objekt selbst, bei dem es sich um eine Straße, Eisenbahnlinie, Flußlauf oder ähnliches handeln kann. Die verschiedenen Nutzungsarten werden im digitalen Modell durch Kennziffern unterschieden.

Sind alle auf einem Profil liegenden Informationen erfaßt, so wird am graphischen Bildschirm eine Profildarstellung gemäß Abbildung 2 erzeugt, die zur Kontrolle der erfaßten Information dient. Erst wenn sich der Bearbeiter von der Vollständigkeit und Richtigkeit der Daten überzeugt hat, erfolgt die Übernahme in den Datenspeicher. Zu Dokumentationszwecken kann das Profil als Hardcopy oder Plot ausgegeben werden.

Die Digitalisierung des Karteninhalts (Phase 1 in Abbildung 1) ist einer der aufwendigsten Arbeitsabschnitte im Rahmen der Vorentwurfsbearbeitung. Deshalb wurde versucht, durch den Einsatz der Menüfeldtechnik und durch Rechnerüberwachung des Ablaufs im Dialog mit dem Bearbeiter eine möglichst wirtschaftliche Lösung zu erzielen.

Um das weitere Arbeiten mit den Profilen übersichtlich zu gestalten, werden sie zu Gruppen zusammengefaßt, die jeweils einem Abschnitt der Trasse angehören. Diese Abschnitte werden so definiert, daß man daraus die Freihandlinie und alle Nebenvarianten lückenlos zusammensetzen kann. In den folgenden Bearbeitungsphasen können dann immer Trassenabschnitte angesprochen werden, womit eine erhebliche Vereinfachung erzielt wird.

#### 4. Bearbeitung des Trassengrundrisses

Die Weiterentwicklung der Linienführung im Grundriß geht von der Freihandlinie aus, die in der Voruntersuchung festgelegt wurde und bereits in digitaler Form als Folge von kubischen Splines im Rechner zur Verfügung steht. Zunächst wird dabei versucht, eine Verbesserung der Anpassung der Trasse an das Gelände zu erzielen. Dies ist von der Natur der Sache her ein räumliches Problem, das eigentlich die gleichzeitige Bearbeitung von Grundriß und Gradienten erfordert. Aus praktischen Gründen ist jedoch eine getrennte Bearbeitung von Lage und Höhe geboten, da der Entwurfsingenieur trotz Rechnerunterstützung überfordert wäre, wenn man von ihm verlangte, alle örtlichen und geome-



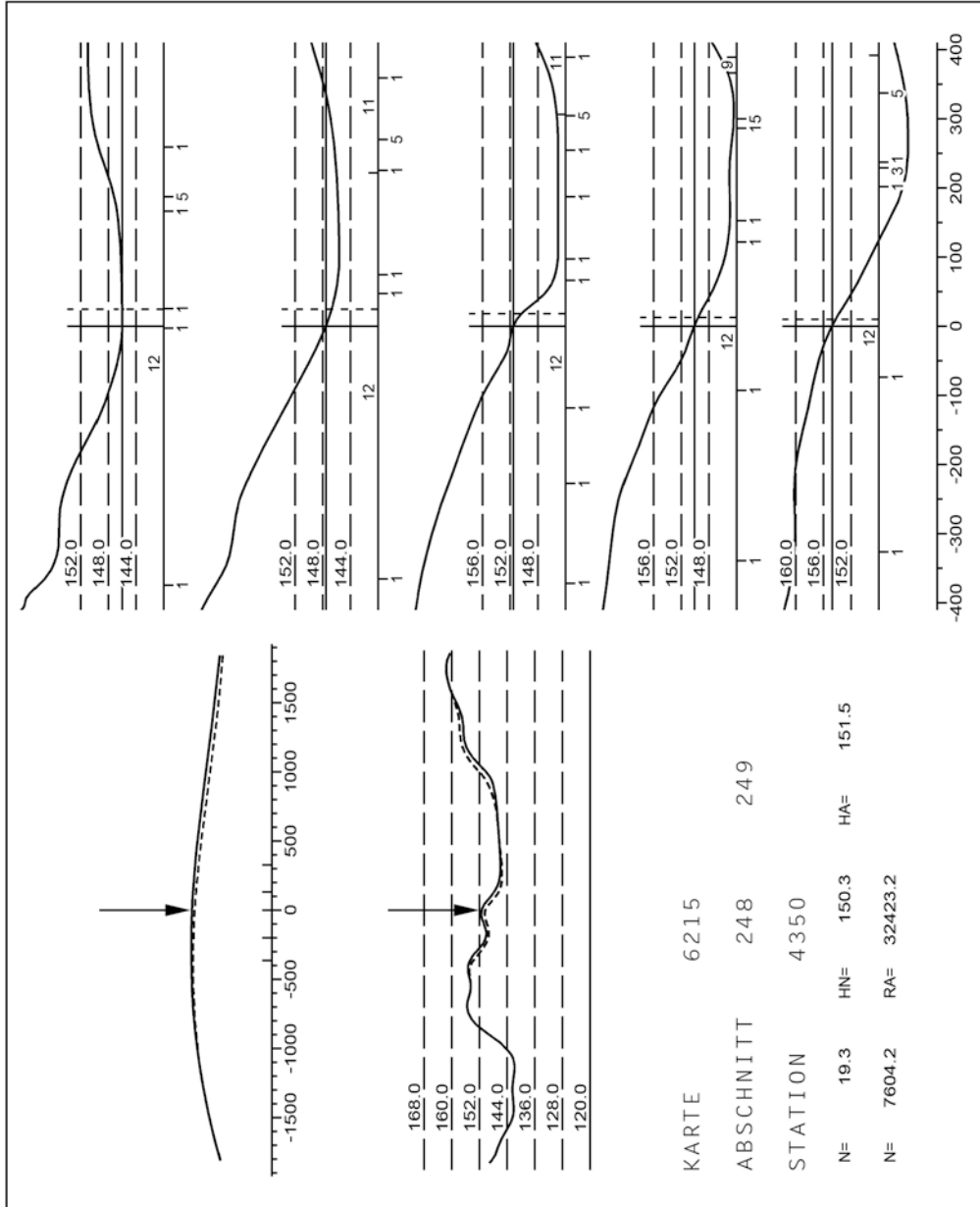


Abbildung 3: Bildschirmgraphik zur Unterstützung der Grundrißbearbeitung

trischen Restriktionen sowie die Kriterien Baukosten, Landschaftsschutz und Ästhetik gleichzeitig entsprechend ihrer Bedeutung zu berücksichtigen. Auch bei der Entwicklung von Programmsystemen ist eine Teilung des räumlichen Problems notwendig, um einerseits die Entwicklungs- und Bearbeitungskosten zu begrenzen und andererseits eine übersichtliche Bedienung des Programms im Dialogverkehr zu ermöglichen.

Um trotz dieser vereinfachenden Bearbeitung der Forderung nach räumlicher Lösung der Trassierungsaufgabe gerecht zu werden, bietet sich ein iteratives Vorgehen an, bei dem nach der Festlegung der Gradienten eine erneute Bearbeitung des Grundrisses erfolgt, danach einer Verbesserung der Gradienten durchgeführt wird und so fort, bis schließlich die optimale Lage der räumlichen Achsen festliegt. Dieses sehr aufwendige schrittweise Vorgehen läßt sich nun, wie die Erfahrung mit dem Programmsystem TROP gezeigt hat, weitgehend vermeiden, indem man bei der Grundrißbearbeitung sowohl das Längsprofil als auch die in der Nähe des betrachteten Abschnittes liegenden Querprofile als Entscheidungshilfen einbezieht.

Für die praktische Arbeit kommt es nun darauf an, diese Geländeinformationen in geeigneter Weise verfügbar zu machen. Im Programmsystem TROP geschieht dies mittels einer Bildschirmgraphik gemäß Abbildung 3. In der linken Bildhälfte werden für einen etwa drei Kilometer langen Trassenabschnitt Grundriß und Längsschnitt dargestellt. Auf der rechten Seite werden fünf Querprofile gezeigt, die so angeordnet sind, daß ihr Schnittpunkt mit der Freihandlinie lagerichtig abgebildet ist. Im linken Grundrißbild ist die Position der dargestellten Querprofile ebenfalls gekennzeichnet. Das mittlere Profil befindet sich genau an der durch den Pfeil angezeigten Stelle. Diese Graphik enthält alle wesentlichen Informationen, die zur Beurteilung und eventuellen Verbesserung der Freihandlinie wichtig sind.

Wenn nun eine Lageveränderung der Freihandlinie vorgenommen werden soll, so wird dies zweckmäßig am Bildschirm durchgeführt, da das Programm dann sofort rechnet und in allen Elementen der Abbildung 3 neben dem ursprünglichen auch den neuen Trassenverlauf zeigt. Die Verschiebung kann mit Hilfe des Bildschirmfadekreuzes in den einzelnen Querprofilen erfolgen oder günstiger für Trassenstücke durch Angabe des Verschiebungsbetrages und der zugehörigen Länge oder des neuen Krümmungsradius. Vom Programm wird dann der veränderte Trassenabschnitt an den Rändern mit der alten Achse unter Einhaltung der Mindestparameter so verbunden, daß ein glatter Übergang entsteht.

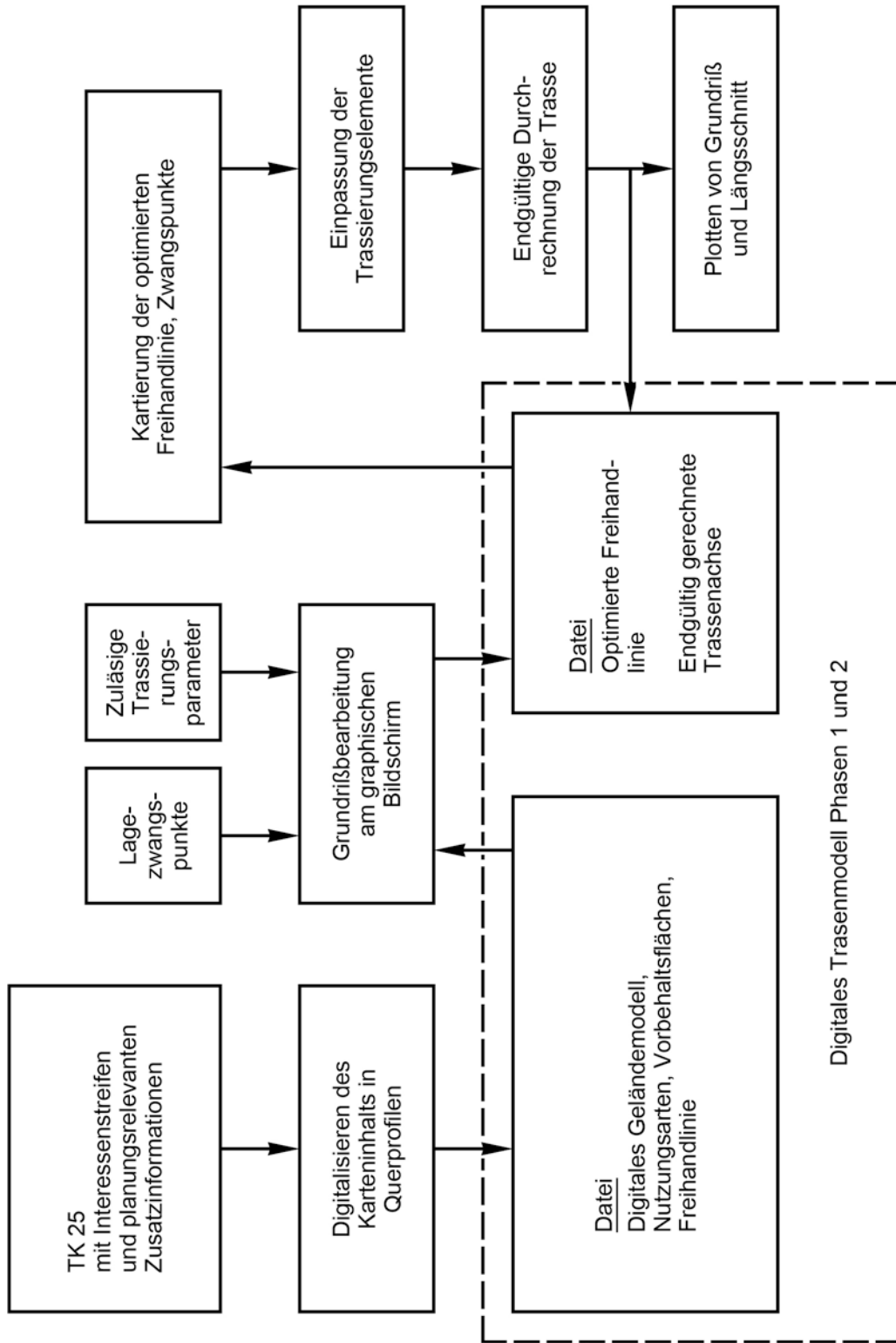


Abbildung 4: Blockdiagramm zu Phase 1 (Digitalisierung) und Phase (Grundriß) der Vorentwurfsbearbeitung

Neben der Geländeanpassung ist in diesem Arbeitsgang für die Realisierung aller betrieblichen Anforderungen an die Trasse zu sorgen. So sind bei der EMS-Trasse in regelmäßigen Abständen Geradenstücke geringer Längsneigung für die Einrichtung von Überleitstellen vorzusehen. Die Anbindungsstellen und Bahnhofsbereiche mit ihren Einschränkungen an die zulässige Gradientenführung sind einzuplanen. Weiterhin sind die Möglichkeiten für besondere systemspezifische Bauweisen, z.B. Aufständigung, zu schaffen.

Im folgenden Arbeitsschritt wird die Freihandlinie durch eine Trassenachse ersetzt, die aus den zulässigen Elementen Geraden, Übergangsbögen und Kreise besteht. Die eindeutige Verknüpfung der Trassierungselemente geschieht durch das Programmsystem TROP. Als Eingabe sind Zwangspunkte und sogenannte Fest-, Schwenk-, Puffer- und Koppелеlemente zulässig, deren Lage- und Formparameter aus der Grundrißdarstellung abgegriffen werden. Die Güte der Anpassung der Achse an die Freihandlinie hängt wesentlich von der Geschicklichkeit des Trassierungsingenieurs bei der graphischen Festlegung der Elemente ab.

Die geometrisch definierte Achse wird anschließend ins digitale Trassenmodell übernommen und mit den Querprofilen zum Schnitt gebracht. In Grundriß- und Längsprofildarstellungen wird das Ergebnis der Grundrißbearbeitung für die folgende Gradientenbearbeitung bereitgestellt.

Der Arbeitsfluß von der Digitalisierung des Inhalts der TK 25 bis zum Abschluß der Grundrißbearbeitung ist in Abbildung 4 dargestellt. Weitere Einzelheiten können CASPARY, HEISTER, WELSCH (1980a) entnommen werden.

## 5. Bearbeitung der Gradienten

Wichtigstes Hilfsmittel bei der Gradientenbearbeitung (Phase 3 des Vorentwurfs) ist der Programmbaustein EGO, der in CASPARY, HEISTER, WELSCH (1980b) ausführlich beschrieben ist. Ein dynamisches Optimierungsverfahren, zugeschnitten auf die Aufgabe der Gradientenwahl, ist in diesem Programm realisiert. Es führt auf mathematisch strengem Weg zu der kostenoptimalen Gradientenführung.

Eingabegrößen für die dynamische Optimierung sind Anfangswerte für den iterativen Algorithmus, die graphisch dem Längsprofil entnommen werden. An diese Startwerte werden keine Genauigkeitsforderungen gestellt. Das Konvergenzziel ist jedoch schneller erreicht, wenn die Näherungswerte nahe bei der optima-

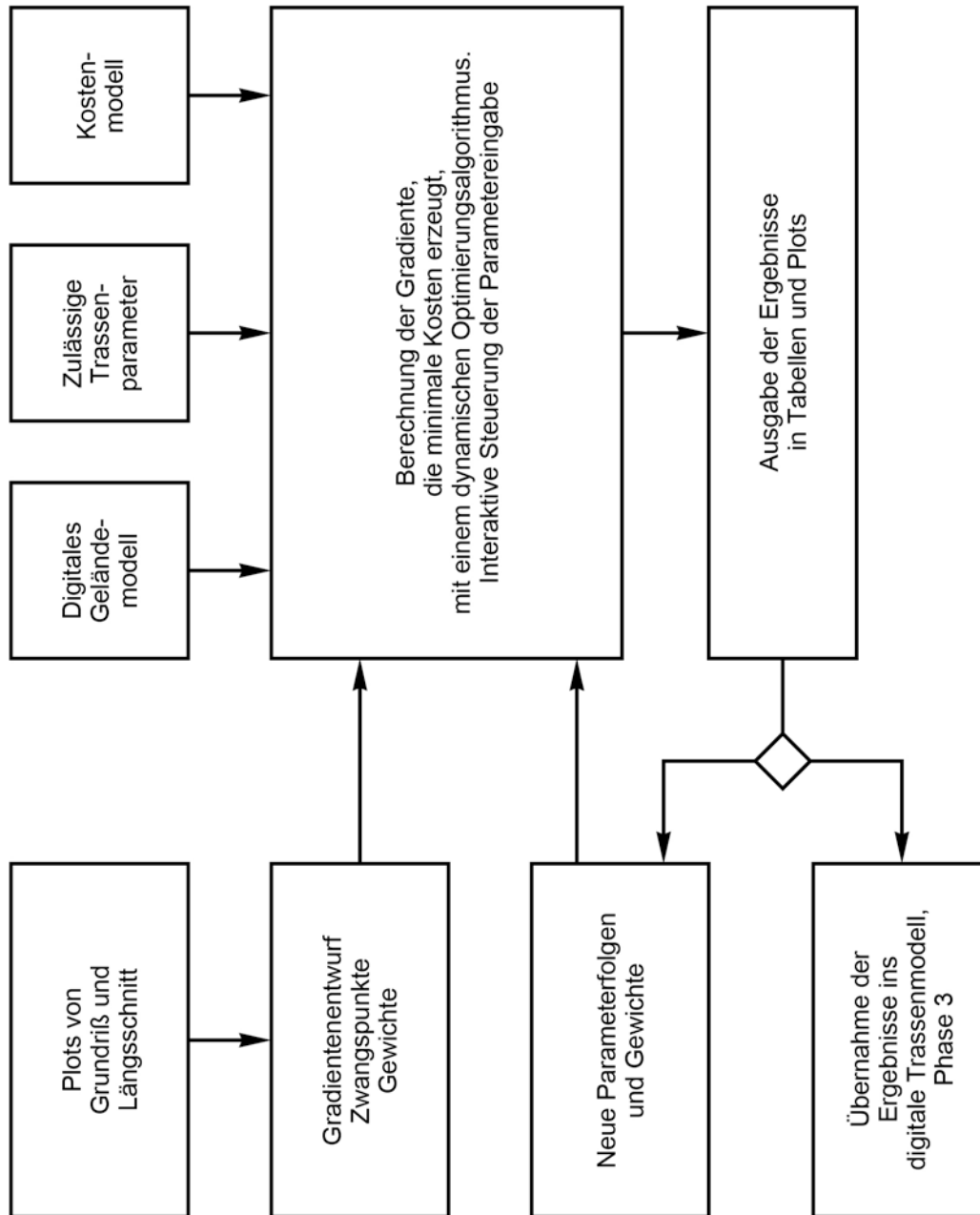


Abbildung 5: Blockdiagramm zu Phase 3 (Gradiente) der Vorentwurfsbearbeitung

len Lösung liegen.

Zur Berechnung der Zielfunktion greift das Programm auf die Geländeparameter Höhe und Querneigung des digitalen Informationsmodells zurück. Ferner wird ein Kostenmodell bereitgestellt, das in Form einer Tabelle aufgebaut ist, aus der mit den zwei Eingängen Geländehöhe minus Gradientenhöhe und Geländequerneigung die Kosten eines Trassenquerschnittes entnommen werden. Ehe nach der Querschnittsmethode die Gesamtkosten berechnet werden, werden die Stationskosten mit einem wählbaren Gewicht multipliziert. Für den Normalfall ist das Gewicht mit eins vorbesetzt. Muß ein Zwangspunkt eingehalten werden, so wird ein sehr hohes Gewicht gewählt und zugleich die Geländehöhe so verändert, daß minimale Investitionskosten in der geforderten Trassenhöhe entstehen. Durch ähnliche Manipulationen ist es möglich, in Abschnitten, wo dies sinnvoll erscheint, einen aufgeständerten oder einen in einem Einschnitt liegenden Fahrweg zu begünstigen. Ferner werden die Kosten für die Kreuzungsbauwerke, die nach der Klassifizierung des kreuzenden Verkehrsweges gestaffelt sind, bei der Berechnung der Zielfunktion einbezogen.

Alle vom Optimierungsprogramm berücksichtigten Lösungsmöglichkeiten für die Gradientenführung bestehen aus einer Folge zulässiger Trassierungsparameter. Die Restriktionen bezüglich Längsneigung und Ausrundungshalbmesser für Kuppen und Wannen werden laufend eingehalten. Das Ergebnis dieses sehr aufwendigen Bearbeitungsschrittes ist die unter Berücksichtigung aller Zwänge kostengünstigste Gradientenführung. Weitere Einzelheiten zur dynamischen Gradientenoptimierung sind in einem eigenen Beitrag dieses Heftes dargestellt.

Wie aus dem in Abbildung 5 dargestellten Ablaufplan der Gradientenbearbeitung ersichtlich ist, wird das Ergebnis in Plänen und Tabellen dargestellt. Vor der Übernahme ins digitale Trassenmodell erfolgt eine sorgfältige Überprüfung, die dazu führen kann, daß die Optimierung mit geänderten Gewichten oder einer geänderten Anzahl von Parameterfolgen wiederholt werden muß.

## 6. Kostenberechnung und Enddarstellung

Für die in Phasen zwei und drei der Vorentwurfsbearbeitung festgelegte Trassenführung wird mit der größt möglichen Genauigkeit eine Investitionskostenberechnung durchgeführt. Das Ergebnis hängt natürlich in starkem Maße von den gewählten Kostensätzen für Grunderwerb, Erdmassenbewegung, Baumaßnahmen und anderem ab. Solange es jedoch lediglich zum Vergleich konkurrierender Varianten benutzt wird, ist diese Unsicherheit nahezu bedeutungslos.

Der zweite wesentliche Einflußfaktor auf die Sicherheit der Kostenrechnung ist die Höhengenaugigkeit der TK 25. Bei der realistischen Annahme einer Standardabweichung von  $\pm 2$  m für die digitalisierten Höhen ergab eine detaillierte Genauigkeitsschätzung einen relativen mittleren Fehler von 1-2 % für die Kosten eines 20 km langen Trassenstückes, das in 100 Querprofilen digitalisiert vorlag. Bei längeren Trassenabschnitten nimmt der relative Fehler wie  $1/\sqrt{n}$  ab, wenn n das Vielfache von 20 km ist. Einzelheiten zur Kostenberechnung sind in dem Beitrag "Kostenmodelle" von SCHWINTZER, STÖCKL in diesem Heft erläutert.

Für die Durchführung der Kostenermittlung wurde der Programmbaustein TRAKO entwickelt, der zugleich eine Reihe von statistischen Auswertungen zur Trassenbeschreibung erledigt. Insbesondere wird eine Massenbilanz aufgestellt und eine Aufschlüsselung der Kosten nach Kostenarten durchgeführt. Ferner wird der Anteil der Fahrwegarten in dem bearbeiteten Abschnitt und der Flächenverbrauch ermittelt.

Diese Ergebnisse sind zusammen mit den Trassenplänen in Grundriß und Längsprofil und der TK 25 Grundlagen der Endbegutachtung. Hierbei stehen system-spezifische Gesichtspunkte und Kriterien der Ästhetik und der Umweltbelastung im Vordergrund, die bisher, insbesondere bei der Gradientenfestlegung, dem Kostenkriterium untergeordnet wurden. Entscheidungen zur Änderung der Gradientenführung, die in vielen Fällen an dieser Stelle getroffen werden, führen zu einer Erhöhung der Investitionskosten, die durch eine erneute Kostenberechnung nachgewiesen werden.

Abbildung 6 zeigt den Arbeitsfluß in der letzten Phase der Vorentwurfsbearbeitung und in Abbildung 7 ist ein verkleinerter Ausschnitt aus der graphischen Darstellung des Endergebnisses wiedergegeben. Diese Darstellung ist so aufgebaut, daß Grundriß und Längsprofil gleichzeitig mit eindeutiger Zuordnung betrachtet werden können. Sie ist durch eine Vielzahl von Zusatzinformationen ergänzt, die sich selbst erklären. Vor der Ausgabe wird der Grundrißteil mit der TK 25 zusammenkopiert, so daß für die Gesamtbeurteilung des Ergebnisses alle wünschenswerten Daten in Grundriß und Profil bereitstehen und damit eine weitgehend räumliche Betrachtung ermöglichen.

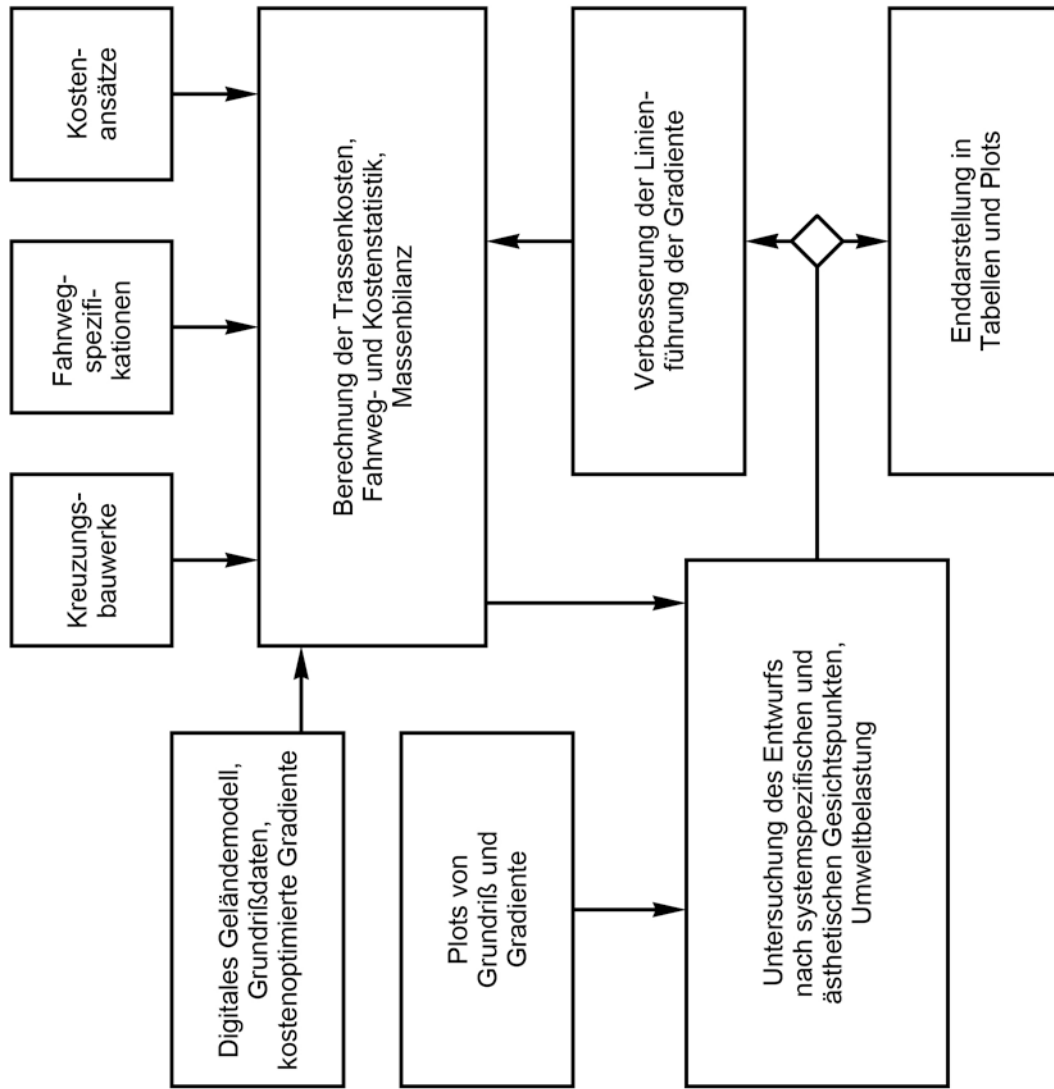


Abbildung 6: Blockdiagramm zu Phase 4 (Kostenberechnung und Enddarstellung) der Vorentwurfsbearbeitung



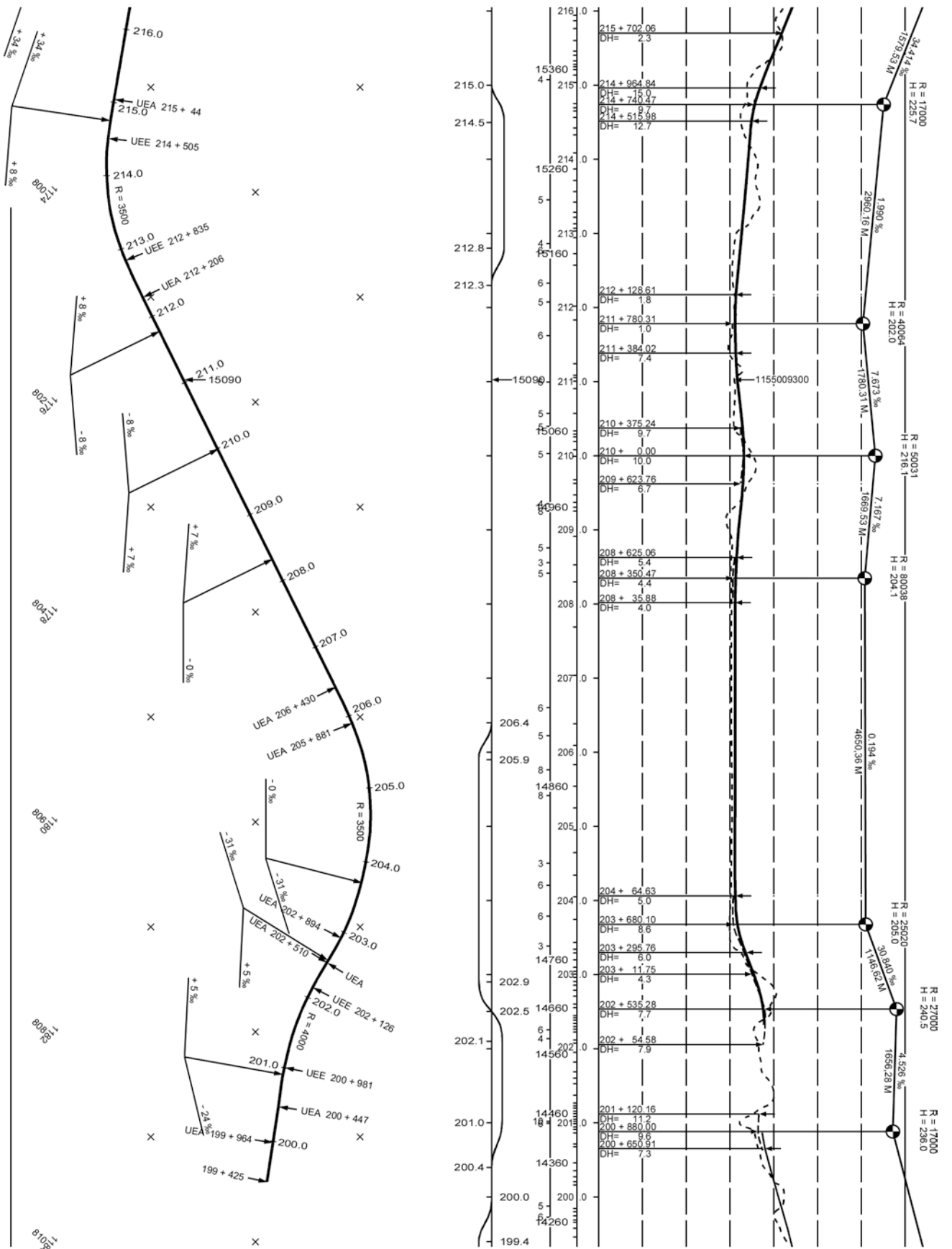


Abbildung 7: Verkleinerter Ausschnitt aus der Darstellung des Endergebnisses

## 7. Zusammenfassung

Mit dem Programmsystem TROP wird eine weitgehend interaktive Entwicklung eines Trassenvorentwurfs ermöglicht. Der Trassierungsingenieur wird von allen Routinearbeiten befreit und kann sich verstärkt auf die erforderlichen Entscheidungen konzentrieren, die mit TROP fundierter getroffen werden können, da einerseits die rechnerisch darstellbaren Entscheidungskriterien schnell zur Verfügung stehen und andererseits eine weitgehend räumliche Beurteilung ermöglicht wird, weil Grundriß und Profil stets gemeinsam betrachtet werden können.

Das Programm hat sich in zwei Trassierungsstudien von je etwa 500 km Länge gut bewährt.

## Literatur

- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1980a), Ein interaktives Programmsystem zur Entwicklung einer optimalen Trasse auf der Grundlage topographischer Karten, Allgemeine Vermessungsnachrichten 87 (1980) 4, S. 178-191
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1980b), Die dynamische Optimierung und ihre Anwendung bei der optimalen Gradientenführung, Allgemeine Vermessungsnachrichten 87 (1980) 4, S. 166-178
- Caspary, W., H. Heister und W. Welsch (1980c), Erfahrungen mit einem interaktiven Programmsystem bei der Trassenoptimierung für schienengebundene Hochgeschwindigkeitsstrecken, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, paper C4, Zürich 1980