

**STRASSEN, IM BESONDEREN
BETONSTRASSEN AUF WENIG
TRAGFAEHIGEM, ZU SETZUNGEN
NEIGENDEM BAUGRUND**

**COMPORTEMENT DES ROUTES ET
PARTICULIEREMENT DES ROUTES EN
BETON SUR SOLS A FAIBLE PORTANCE
ET SUJETS A CONSOLIDATION**

**Betonstrassen AG, 5103 Wildegg
ZACE Service SA, Lausanne**

**Prof. W. Wilk, dipl. Ing. ETH
Dr. sc. techn. Th. Zimmermann**

**Forschungsauftrag 22/89 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer
Strassenfachleute (VSS)**

März 1995

Vorwort

Ziel des Forschungsauftrages war die Erarbeitung eines physikalischen Modells zur Simulation langfristig ablaufender Setzungsvorgänge im Untergrund, ihrer Reflexion an die Fahrbahnoberfläche unter Berücksichtigung der Kopplung Strassenoberbau-Untergrund und die Entwicklung eines interaktiven Rechenprogramms für PC zur Lösung entsprechender Bemessungsaufgaben. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit sind in diesem Bericht und in einer separaten EDV-Applikation mit ausführlichem Handbuch festgehalten. Diese Applikation wurde als Zusatz zu einem kommerziellen Basisprogramm entwickelt. Vorliegend wird nur das numerische Modell in seinen wesentlichen Elementen soweit zusammenfassend dargestellt, als es zum Verständnis der Forschungsergebnisse nötig ist. Das EDV-Zusatzprogramm selbst (Diskette) und das umfangreiche Benutzerhandbuch (User Manual) wurden indessen nicht vervielfältigt, weil deren Anwendung bzw. Einsichtnahme nur für Spezialisten von Interesse sein dürfte. Sowohl das Handbuch als auch dieses Zusatz-EDV-Programm (ohne Basisprogramm) stehen bei der Forschungsstelle sowie bei der Fachkommission 273 zur Verfügung.

VSS-Fachkommission 273
„Beläge und Dimensionierung“

Zusammenfassung

Der *Auftrag* bestand darin, ein physikalisches Modell für das Langzeitverhalten von Strassen, im besonderen Betonstrassen, auf wenig tragfähigem, zu Setzungen neigendem Baugrund zu erarbeiten. Zu berücksichtigen war dabei die Bedingung für ersten Plattenriss. Weiter sollte ein interaktives Rechenprogramm für Personal Computers (PC) zur Lösung der Bemessungsaufgabe sowie Bemessungs-Diagramme entwickelt werden.

Das Rechenprogramm sei an bereits seit Jahren unter Beobachtung stehenden Strassenabschnitten zu eichen.

• Vorgehen/Methodik

Entwicklung eines numerischen Modells für Strukturen mit Schichtlagerung, wobei einzelne Schichten variabler Dicke kompressibel sind. Davon ausgehend, dass sogenannt starre Beläge einen dämpfenden Einfluss auf die Ondulation der Fahrbahnebene (durch den Untergrund induziert) haben, musste das numerische Modell derart entwickelt werden, dass lokales abheben des Belages von seiner Unterlage wie auch Horizontalbewegungen zwischen Belag und Unterlage nachgebildet werden können.

Für die Problemlösung stützte man sich ab auf ein Basisprogramm, welches die meisten, in der Geo- und Foundationstechnik auftretenden natürlichen Phänomene wie Stabilität, Konsolidation und Kriechen integral enthält und abzubilden vermag.

Dieses Basisprogramm wurde weiterentwickelt, indem es mit einigen neuen Elementen ausgebaut wurde insbesondere solchen, welche das abheben des Belages von der Unterlage simulieren. Darüber hinaus ist das Programm mit einem Masstab für den Fahrkomfort (Befahrbarkeitsindex zu einem beliebigen Zeitpunkt im Verlaufe der Nutzungsdauer der Oberbaustruktur) ebenso ausgerüstet wie mit einem Indikator, der auf den ersten strukturellen Riss im Fahrbahnbelaag reagiert. Damit lässt sich das Langzeitverhalten eines definierten Strassenoberbaues aus der Sicht des Strassenbenützers und des Konstrukteurs auf einer bestimmten Baugrundkonfiguration studieren und bewerten. Die Einführung des Befahrbarkeitskriteriums erlaubt, neben der „Bemessung auf Tragfähigkeit“, eine *funktionale* Bemessung des Strassenoberbaues. Der funktionale Bemessungsvorgang erfordert sukzessive Approximation, die abgebrochen wird bei Erreichen der minimal erforderlichen Befahrbarkeit.

• Ergebnisse

- Das entwickelte zweidimensionale Modell (Finite Element Programm) wurde am Fallbeispiel der ausgeprägten Setzungsmulde (Zentrum bei km 190.06) der N3 Zürich-Chur im Abschnitt Fiums-Heiligkreuz, getestet. Trotz grober geometrischer Modellierung lässt sich das Konsolidationsverhalten über eine Dauer von 6000 Tagen (~ 15 Jahre) in guter Näherung abbilden.

Das Modell zeigt, dass sich die Ingenieuraufgabe „Bemessung von Strassen auf zu differentiellen Setzungen neigendem Untergrund“ numerisch abbilden lässt.

- Durch Erhöhung der Steifigkeit des Strassenoberbaues werden die Auswirkungen differentieller Setzungen im Untergrund auf die Fahrbahnebene gedämpft.

- Starre Beläge bieten deshalb für solche Bedingungen im Untergrund, unter den Aspekten Fahrkomfort/Befahrbarkeit, Vorteile.
- Die Tests haben ergeben, dass alle angewandten Benutzerkriterien empfindlicher auf kurze Wellenlänge (< 10 m) reagieren.

Die maximale vertikale Beschleunigung ist das massgebliche Kriterium für langwellige Fahrbahndeflektionen.

- Ein gefugter Betonbelag mit Platten der Länge 5 m und Dicken zwischen 0,22-0,28 m hat eine „glättende“ Wirkung für kleine Deflektionen und kurze Wellenlängen. Keine spürbare Auswirkung indessen für grosse Wellenlängen.
- Die erarbeitete Methode (Anwendung des PC-Programms [8]) ist tauglich für die „funktionelle Bemessung von Strassenoberbauten“.
- Nomogramme zu erarbeiten, im Sinne genereller Anwendung, erweist sich wegen der enormen Variabilität möglicher Baugrundkonfigurationen als untaugliches Bemessungsinstrument. Jede einzelne Situation ist als Individualproblem zu lösen.

Résumé

Le mandat consistait à développer un modèle du comportement à long terme de routes, et particulièrement des routes en béton situées sur des sols à faible portance, et sujets à consolidation. Un logiciel PC interactif devait par ailleurs être développé pour résoudre le problème du dimensionnement de telles structures et des abaques de dimensionnement devaient être développées.

De plus le logiciel devait être validé sur des tronçons de routes sous observation continue depuis un certain temps.

Approche adoptée

Il s'agit de développer un modèle numérique pour des structures en couches d'épaisseurs variables, compressibles ou non. Partant du point de vue qu'un revêtement rigide a un effet égalisateur sur les ondulations de la surface de roulement induites par la fondation, il était nécessaire de pouvoir reproduire des phénomènes de décollement et de mouvements relatifs entre le revêtement et la fondation.

Pour la solution du problème on se réfère à un logiciel de base qui contient intégralement et qui peut modéliser la majeure partie des phénomènes naturels survenant dans la géotechnique et les techniques de fondation comme p. ex. la stabilité, la consolidation et le fluage.

Ce logiciel de base a évolué en ajoutant quelques éléments nouveaux, notamment ceux qui simulent le décollement du revêtement de sa fondation. En outre, divers critères de confort de roulement ont été introduits (index de confort permettant d'évaluer le confort à un instant quelconque de la durée de vie). On a également introduit un indicateur de fissuration qui permet d'identifier la première fissure qui apparaît. On peut ainsi évaluer le comportement à long terme d'une superstructure routière du point de vue de l'utilisateur et du point de vue du constructeur. L'introduction d'un critère de confort permet d'ajouter au dimensionnement purement constructif de la superstructure un dimensionnement fonctionnel, ce dernier demandant un processus d'approximations successives, jusqu'à ce qu'un confort de roulement satisfaisant soit atteinte.

Résultats

- Le modèle bidimensionnel (Programme d'éléments finis) a été testé sur l'exemple de l'affaissement (centre au km 190.06) de la N3 Zürich-Coire, tronçon Flums-Heiligkreuz. Malgré une modélisation géométrique grossière, le phénomène de consolidation secondaire a pu être simulé de manière satisfaisante.
- Le modèle montre que la problématique du dimensionnement des routes situées sur des sols sujets à des tassements différentiels est à la portée d'une simulation numérique.
- En augmentant la rigidité du revêtement on amortit les effets des tassements différentiels de la fondation sur le revêtement.
- Les revêtements rigides présentent de ce fait des avantages du point de vue confort de roulement, lorsque de telles conditions prévalent.

- Les tests ont montré que la sensibilité des critères de confort utilisés était meilleure pour des longueurs d'ondes inférieures à 10 m. L'accélération verticale maximum restant le critère le plus critique pour des ondes plus longues.
- Un revêtement constitué de plaques en béton de 5 m d'épaisseur (0,22-0,28 m) a un effet de lissage pour de courtes longueurs d'ondes. Aucune influence sensible, par contre, pour des ondes plus longues.
- La méthodologie développée (à savoir l'utilisation du logiciel PC [8]) est appropriée pour le „dimensionnement fonctionnel des revêtements routiers“.
- La réalisation d'abaques s'avère inappropriée, suite surtout à la grande variabilité des sols de fondation rencontrés. Chaque situation est donc un cas particulier.

INHALT

	<u>Seiten</u>
I. Einleitung	1
II. Aufgabenstellung	2
III. Charakterisierung des Problems	2
IV. Entwicklung und Kurzbeschreibung des numerischen Modells	4
V. Fallstudie	10
VI. Ergebnisse	13
VII. Folgerungen/Ausblick	15
Literatur	16
Bildverzeichnis	17
Figurenverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	17
Katalog ausgeführter Betonstrassen auf wenig tragfähigem Baugrund in der Schweiz	18
Benutzeranleitung für PC-Programm ZSOIL.PC-BEAG (in Englisch)	

I. Einleitung

Die grösste Herausforderung für Ingenieure im Strassenbau ist die Schaffung leistungsfähiger, *gesamtwirtschaftlich* betrachtet optimaler Verkehrsflächen über Baugrund, der sehr geringe Tragfähigkeit, ungleichmässige Schichtenfolge aufweist und meist zu lang andauernden differentiellen Setzungen neigt.

Der Schlüssel zur Lösung dieser Ingenieuraufgabe liegt nicht darin, dass der Strassenoberbau auf *Tragfähigkeit*, auf Grund von Spannungsanalysen, bemessen wird. Insbesondere nicht bei sogenannt „starr“ Belägen (Betonstrassen).

Ende der zwanziger Jahre bereits erkannte Robert Maillart, einer der bedeutendsten Bauingenieure dieses Jahrhunderts, dass „die *Beanspruchung* eines Betonbelages neben der Verkehrslast lediglich von seiner *Dicke*, kaum jedoch von der Tragfähigkeit des Baugrundes abhängt. Demzufolge sollen Betonbeläge vorwiegend auf wenig tragfähigem Baugrund eingesetzt werden. Dort erweise sich ihre besondere Eignung“ (1).

Diese Erkenntnisse wurden ab 1931 in die Strassenbaupraxis der Schweiz gezielt und erfolgreich umgesetzt (s. Katalog ausgeführter Beispiele, p. 18). Über die damit gemachten Langzeiterfahrungen in der Schweiz wurde in (3) berichtet.

Bestätigt wurde diese Maillart'sche Bewertung rund 40 Jahre später durch umfangreiche Untersuchungen der Bundesanstalt für Strassenbau (BAST) in Deutschland (2).

Eine der Aussagen in den Folgerungen aus jenen Untersuchungen der BAST stellt fest, dass für das Langzeitverhalten von Betonstrassen die Tragfähigkeit des Baugrundes in ihrer absoluten Grösse von untergeordneter Bedeutung sei. Entscheidend hingegen sei, die *Gleichmässigkeit* der Tragfähigkeit, egal ob auf niedrigem oder höherem Niveau.

Böden mit geringer Tragfähigkeit sind meist auch diejenigen mit ausgeprägter Tendenz zu Konsolidations-Setzungen, die *nicht* gleichmässig erfolgen. Die Ingenieuraufgabe besteht deshalb darin, den Strassenoberbau so auszulegen, dass er zwar die erforderliche strukturelle Tragfähigkeit aufweist, darüber hinaus in dessen über den Zeitraum der definierten Nutzungsdauer operationell (Befahrbarkeit + operative Sicherheit) tauglich bleibt:

- Wegen differentieller Setzungen nicht vorzeitig Schaden nimmt.
- Wellenbildungen im Untergrund infolge unterschiedlicher Setzungen, in ihrer Auswirkung auf die Deflektionen der Fahrbahn möglichst glättet.

II. Aufgabenstellung

- Entwicklung eines numerischen Modells für geschichteten, tragenden Halbraum. Dieser enthalte auch kompressible Schichten unterschiedlicher Dicke und Lage.
- Quantitative Bestimmung des Einflusses der Biegesteifigkeit des Stassenoberbaues auf das Deflektions-Langzeitverhalten der Fahrbahnebene.
- Der Grad des Dämpfungsvermögens biegesteifer Oberbauten bezüglich Reflexion der Wellenbildung im Untergrund an die Fahrbahnebene, soll durch einen funktionellen Massstab (Fahrkomfort/Befahrbarkeit) beschrieben werden.
- Ein solcher Dämpfungseffekt kann nur zustande kommen unter der Voraussetzung, dass ein lokales abheben des Belages von seiner Bettung und damit auch horizontale Relativverschiebungen zwischen Belag und Unterlage zugelassen werden.
- Das Modell soll an Strukturen, deren Langzeitverhalten durch Beobachtungen bekannt sind, getestet werden.
- Erarbeitung von Nomogrammen für die funktionale Bemessung von Strassenoberbauten, insbesondere Betonstrassen, auf solchem Baugrund.

III. Charakterisierung des Problems

Typisch für die hier in Betracht gezogenen Böden ist, dass sie ein mehr oder weniger ausgeprägtes Konsolidationsverhalten zeigen. Der Verlauf solcher Setzungsvorgänge weist stets zwei zeitlich, ihrer Charakteristik nach unterscheidbare Phasen auf, die bautechnisch von Bedeutung sind (*Fig. 1*).

Eine erste Phase, deren sog. „Primärsetzungen“ relativ gross sind und zeitlich einen überblickbaren Verlauf nehmen. Sie sind durch bautechnische Massnahmen (temporäre Vorbelastung des Terrains u.a.) beeinflussbar und wenn es das Bauprogramm zulässt, wenn immer möglich „vorweg“ zu nehmen.

Die zweite Phase mit ihren sog. „Sekundärsetzungen“ weist ausgeprägt langdauernde Verformungsvorgänge auf, die im Ausmass zwar geringer aber erdbautechnisch in ihrem zeitlichen Ablauf *nicht* beeinflussbar sind. Der Konstrukteur im Strassenbau hat sie deswegen in seine Projektaufgabe einzubeziehen.

Grundsätzlich stehen ihm dazu drei alternative Wege offen:

- Entweder verschiebt er das Problem auf die *Ebene der Strassenerhaltung*: Er wählt einen möglichst „flexiblen“ Oberbau mit geringem Widerstandsvermögen gegen Verformungen des Untergrundes, *Figur 2*.

Wenn die an die Fahrbahnoberfläche reflektierte Setzung ein gewisses Mass erreicht hat, wird die Setzungsmulde durch „aufschiften“ gefüllt,

oder aber:

- Er konzentriert sich auf die erd-, grundbautechnischen Möglichkeiten wie es (4) beschreibt:

- Bauverfahren *ohne* Bodenaustausch mit Massnahmen *in* und *auf* dem Untergrund (Vorbelastungen, Knüppeldämme, Geotextilien, Kunststoffgitter, Leichtbaustoffe, Vertikaldrains, Verdichten mit schweren Fallplatten, Grundwassersenkung, Säulen aus Boden- Kalk-Gemischen u.a.m.),

- Bauverfahren mit *vollständigem* oder *teilweisem* Bodenaustausch,

oder aber:

- Das Problem wird als *Bemessungsaufgabe* für den Strassenoberbau verstanden im technischen und gesamtwirtschaftlichen Sinne, und zwar so, dass am Untergrund selbst, hinsichtlich Sekundärsetzungen, keine erdbautechnischen Massnahmen, sondern allenfalls Bauhilfsmassnahmen (Bodenverbesserung mix in place etwa) vorgenommen werden.

Diese erweiterte Bemessungsaufgabe besteht nicht mehr nur im Nachweis der Tragfähigkeit (Gesamtzahl normierter Achslastübergänge während einer zu definierenden Gebrauchsdauer), sondern vielmehr in der Berücksichtigung funktioneller (operationeller) Kriterien aus der Sicht des Benützers. Konkret bedeutet dies: Der Strassenoberbau wird in seiner Verformungssteifigkeit (Widerstand gegen Verformungen) so ausgelegt, dass über eine definierte Nutzungsdauer die Verformung der Fahrbahnoberfläche einen vorgegebenen, noch akzeptablen Grenzwert (z.B. als max. zul. Beschleunigung definiert, die auf den Automobilisten beim Befahren der Mulde einwirkt) nicht überschreitet (*Fig. 3*).

Analytisch wird dieses Problem in (5) beschrieben aber nur im *qualitativen* Sinn. Um die konkrete, *quantitative* Bemessung mit dem Ziel, die an die Fahrbahnebene reflektierte Wellenbildung im Untergrund zu dämpfen durchführen zu können bedarf es:

- eines physikalischen Modells unter Berücksichtigung der das Problem bestimmenden Randbedingungen und
- der Entwicklung eines interaktiven Rechenprogrammes, welches die Anpassung an die individuellen Fälle ermöglicht.

Das erstere wurde in (6) bereits erarbeitet mit der entscheidenden Einschränkung aber, dass das Modell nicht „funktionell“ (durch Befahrbarkeitskriterien) gesteuert wird, sondern durch das Bruchkriterium „erster Riss in Betonplatte“ allein.

In den USA hat dieselbe Problemstellung mit Bezug auf *quellfähige* Böden erhebliche Bedeutung. Es wurden auf diesem Gebiet über länger Zeiträume mehrere Forschungsprojekte bearbeitet. In (7) sind die angewandten Methoden, Ergebnisse und Konsequenzen als Schlussbericht zusammengefasst.

Sekundärsetzungen im Untergrund haben *Kriech*charakter. Das Modell hat diesem Umstand sowohl auf der Seite Belastung des Systems (durch die Langzeitverformung) als auch auf Seite des (Verformungs-) Widerstandes durch den Strassenoberbau Rechnung zu tragen. Auf beiden Seiten sind also die *Kriech*moduli einzusetzen.

IV. Entwicklung und Kurzbeschreibung des numerischen Modells

Die Erarbeitung des Modells „Strassen auf wenig tragfähigem, zu Setzungen neigendem Baugrund“ baute auf einem damals bereits verfügbaren Basisprogramm aus dem Bereich Bodenmechanik auf. Dieses war leistungsfähig und ausbaufähig genug, um die spezifische Problemstellung numerisch zu beschreiben.

Die im Rahmen des Kreditgesuchs vom 9.3.1988 beschriebenen Zielvorstellungen enthielten die Absicht, allenfalls auch Bemessungsnomogramme zu erarbeiten. Die enorme Variabilität möglicher Schichtlagerungstypen (*Fig. 4*) weist darauf hin, dass für jeden individuellen Fall ein Nomogramm verfügbar sein müsste. Deshalb wurde diese ursprüngliche Zielvorstellung, entwickelt im Hinblick auf allfällig später sich darauf abstützende Normen, nicht weiter verfolgt.

Die Anpassung an die unzähligen anzutreffenden Schichtkonfigurationen müssen durch ein leistungsfähiges Rechenprogramm ermöglicht werden.

Das numerische Modell wird hier, die wesentlichen Elemente enthaltend, zusammengefasst dargestellt. Die vollständige Beschreibung, alle Einzelheiten umfassend gibt (8).

Das finite Element-Modell beschreibt zwei Phasen gesättigter oder teilweise gesättigter Böden:

Ein plastisches Modell für die Feststoff-Phase sowie ein Kriechmodell zur Nachbildung von Langzeitvorgängen.

Das 2-Phasen-Modell

Um Primärsetzungsvorgänge simulieren zu können, ist der Boden als 2-Phasensystem abzubilden.

Die grundlegenden Beziehungen hierfür gibt *Tafel 1*.

Gleichung (1) steht für Gleichgewicht im Gesamtspannungszustand t . Dieser ist definiert als Summe aus effektiver Spannung t' und Porenwasserdruck t_w (Gl. 3.). Gleichung (2) drückt das Gleichgewicht der flüssigen Phase aus:

ε_{kk} ist die volumetrische Verformungsgeschwindigkeit die im Gleichgewicht steht mit der Zunahme des Porenwasserdrucks und der Divergenz der Fließgeschwindigkeit, n steht für die Porosität und β_f ist die Kompressibilität der flüssigen Phase.

$t_{ij,j} + f_i = 0,$	in $\Omega \times T$	$[N/m^3]$	(1)
$\dot{\varepsilon}_{kk} + q_{k,k} - n/\beta_f \dot{t}_w = 0,$	in $\Omega \times T$	$[1/s]$	(2)
$t_{ij} = t'_{ij} + t_w \delta_{ij} = -(\underline{\sigma}'_{ij} + p_w \delta_{ij}) = -\underline{\sigma}_{ij}^{tot}$		$1/$	(3)

Randbedingungen :		Ausgangsbedingungen :	
$t_{ij} n_j = \bar{t}_i$	on $\Gamma_t \times T$	(4)	$u_i(t_0) = u_{i0}$ on Ω (9)
$u_i = \bar{u}_i$	on $\Gamma_u \times T$	(5)	$t_w(t_0) = t_{w0}$ on Ω (10)
$q_j n_j = \bar{q}$	on $\Gamma_q \times T$	(6)	
$t_w = \bar{t}_w$	on $\Gamma_t \times T$	(7)	
and $\Gamma = \Gamma_t + \Gamma_n = \Gamma_{t_w} + \Gamma_q$		(8)	

Grundgleichungen :

$\varepsilon_{ij} = 1/2 (u_{i,j} + u_{j,i})$;

$\dot{\varepsilon}_{ij} = 1/2 (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})$

$\dot{t}'_{ij} = C'_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}$

$q_i = -k_{ij} \Phi_{,j}$ [m/s]

$\Phi = (-t_w/\gamma_w + z)$ [m]

(11)

(12)

(13)

(14)

1/Unterstrichene Variablen sind positiv für Druck

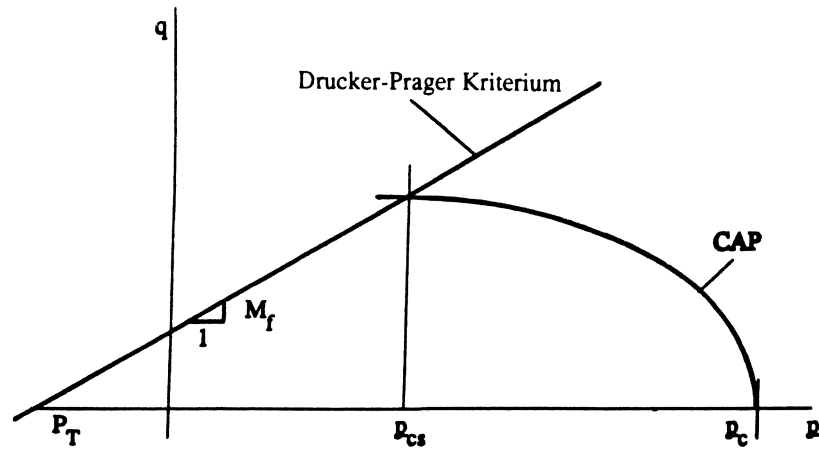
Tafel 1 Grundlegende Beziehungen des 2-Phasenmodells

Die Gleichungen (4) bis (8) definieren die dem Problem entsprechenden Randbedingungen, (9) und (10) die Ausgangsbedingungen, (11) bis (14) die grundlegenden Beziehungen mit C' als effektivem Tensor. Φ ist das Fließpotential, γ_w das spezifische Gewicht von Wasser und z steht für die vertikale Ordinate.

Die Plastizität des Bodens

Das Verformungsverhalten des Feststoff-Skeletts wird mit Hilfe eines plastischen Modells im Spannungsraum beschrieben. Es wird charakterisiert durch die kegel-förmige Drucker-Prager Bruchbedingung, gekoppelt mit einer elliptischen Be-randung (CAP), Fig. 5.

a)



$$F = M_f p + q - \sqrt{3}k = 0 \quad \text{and} \quad M_f = 3\sqrt{3} a_\varphi$$

$$3J_2 + M_f^2(p - p_c)(p + p_T) = q^2 + M_f^2(p - p_c)(p + p_T)$$

b)

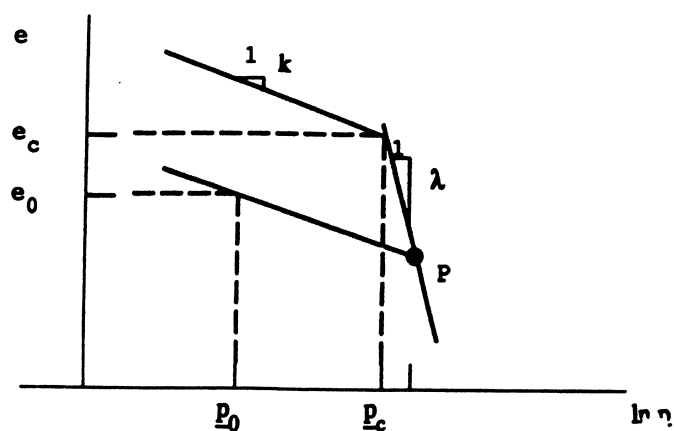
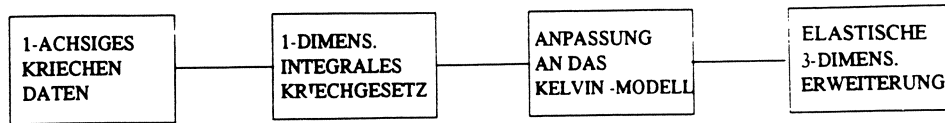


Fig. 5 a) Formulierung der Bruchbedingungen
b) Oedometer-Test

Kriechen

Die Kriechformulierung ist die essentielle Komponente des hier simulierten Verhaltenstyps. Weil nur begrenzte Kenntnis über das Kriechphänomen von Böden besteht, sind einige vereinfachende Annahmen zur Ausarbeitung des numerischen Modells notwendig.

Dieses Modell wird in folgender Weise entwickelt:



Oft sind sogar Daten für das einachsige Kriechen nicht verfügbar, deshalb behilft man sich mit mehr oder weniger groben Annahmen.

Hier wird ein sehr einfaches integrales Kriechgesetz angewandt (Gl. 1):

$$\varepsilon^{cr} = D_0^{-1} \sigma E A(t-t_0)^m \quad (1)$$

ε^{cr} ist der einachsige Tensor für die Kriechverformung. D_0 die durch E dividierte Matrix des Elastizitätsmoduls, σ die Spannung, E der Elastizitätsmodul, t die Zeit, A und m sind Kriechparameter.

Die Erweiterung auf den Spannungsraum erfolgt mit Hilfe der Matrix D des Elastizitätsmoduls. Damit ist die Anwendung auf in situ-Beobachtungen möglich. Es sei ein typischer Spannungszustand (Gl. 2) angenommen mit σ als vertikale Spannung. Man schreibt:

$$\sigma = [K_0 \sigma, \sigma, 0, K_0 \sigma] \quad \text{mit} \quad K_0 = (\nu/1-\nu) \quad (2)$$

Weiter ergibt sich für $D_0^{-1} \cdot \sigma$ dieses spezifischen Spannungszustandes:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 & -\nu \\ -\nu & 1 & 0 & -\nu \\ & & 2(2+\nu) & 0 \\ -\nu & -\nu & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_0 \sigma \\ \sigma \\ 0 \\ K_0 \sigma \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Die vertikale Kriechverformung ergibt sich daraus als:

$$\varepsilon_2^{cr} = \varepsilon_{vertic}^{cr} = (1 - 2\nu K_0) \sigma A(t - t_0)^m \quad (4)$$

Wenn zwei verschiedene Werte für ε_2^{cr} von in situ-Beobachtungen eingeführt werden, lassen sich die beiden Kriechparameter A und m bestimmen.

Gleichung (1) definiert Kriechen unter konstanter Spannung. Kriechen bei variablen Spannungszuständen lässt sich mit der Einführung des Kelvin-Modells mit angepassten Komponenten, die den unterschiedlichen Verformungscharakteristiken anzupassen sind, formulieren: Die erste Komponente gibt die kurzzeitige Antwort, die zweite die mittelfristige etc. (Fig. 6).

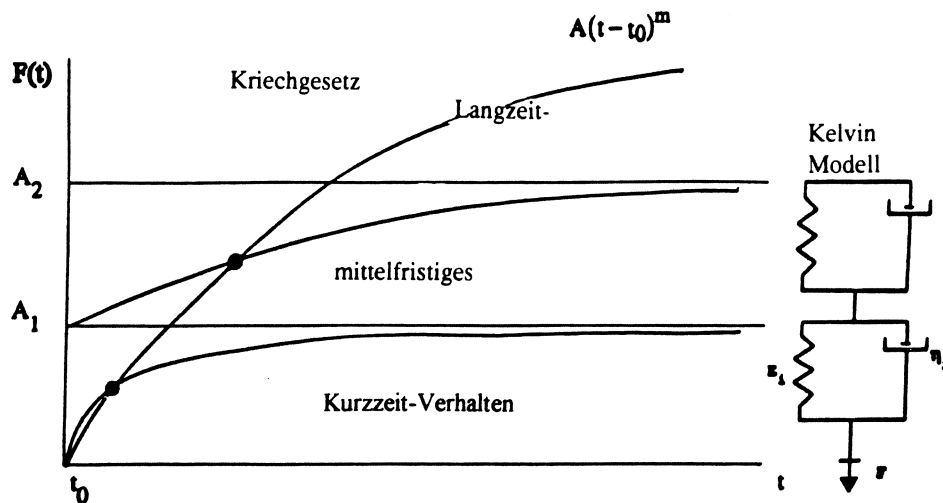


Fig. 6 Näherung für Kriechgesetz mit Hilfe des Kelvin-Modells

Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine Kelvin-Kette mit 6 Elementen eine gute Näherung für jede Belastungs-Entlastungs-Sequenz des Typs $[A(t-t_0)]^m$ gibt, wenn angenommen wird, dass die Superposition zulässig ist.

Die Approximation gegeben durch die Kelvin-Kette lässt sich schreiben als:

$$A(t-t_0)^m \cong \sum \frac{1}{E_i} \left(1 - \exp \left(-\frac{G_i}{\eta_i} (t-t_0) \right) \right) \quad (5)$$

mit E_i und η_i als Konstante des Kelvin Elements i . Die Summation erstreckt sich über die Anzahl Elemente der Kelvin-Kette.

Das Befahrbarkeits-Kriterium im numerischen Modell

Die Gebrauchsqualität der Fahrbahnebene wird über drei verschiedene Kriterien bewertet: „ARS“ (Average rectified slope), „Sicherheit gegen abheben des Rades von der Fahrbahnebene“ und die „maximale Vertikalbeschleunigung“ (auf die Insassen) beim Befahren einer welligen Strassenoberfläche. Diese Kriterien sind wie folgt definiert:

$$ARS = \frac{1}{L} \int_0^T |z_u - z_s| dt$$

z_u = Vertikalgeschwindigkeit der ungefederten Masse

z_s = Vertikalgeschwindigkeit der gefederten Masse

L = Streckenlänge, befahren während der Zeit T

Die Messungen erfolgen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h (Fig. 7)

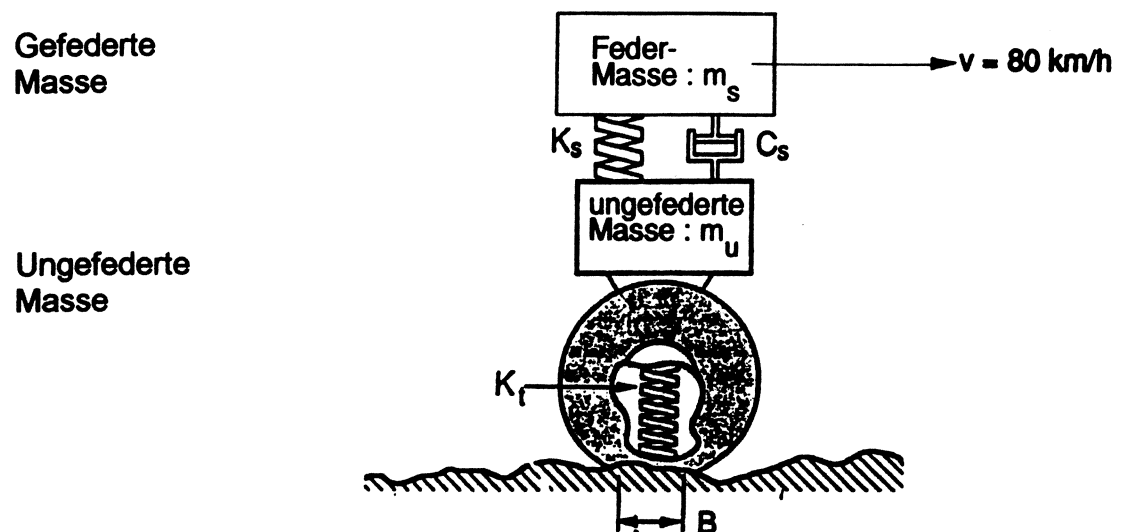


Fig. 7 Modell eines „Viertelfahrzeuges“ (quarter car)

- „Sicherheit gegen abheben“ = $\frac{\text{Reaktion}}{(m_s + m_u) \cdot g}$

(Reaktion = jene der Fahrbahnebene auf die Radlast)

- Die „maximale Vertikalbeschleunigung“ z_s lässt sich direkt über Beschleunigungsgeber messen.

V. Fallstudie N3/SG-Flums-Heiligkreuz

Dieser Abschnitt der Nationalstrasse N3 (rd. 7 km lang, Verkehrsfreigabe 1970) ist in bester Weise als Fallbeispiel, an dem das numerische Modell ausgetestet werden konnte, geeignet:

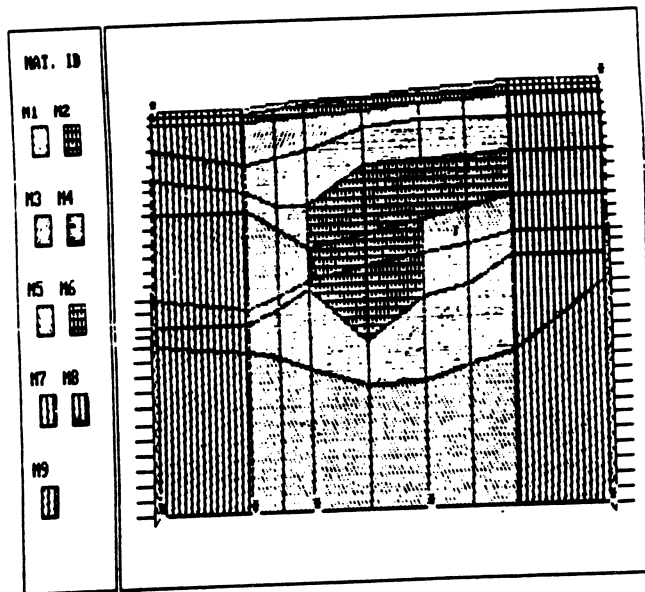
- Es zeigten sich bald nach Verkehrsfreigabe in einem Abschnitt von rd. 120 m Länge ausgeprägte Nachsetzungen (*Bild 1*).
- Dieser Konsolidierungsverlauf wurde von Beginn an über mehrere Jahre periodisch vermessen.
- Von geotechnischen Aufschlüssen her, sind die Bodenkennziffern gut einzuschätzen.
- An der Setzungsmulde selbst wurde bis dato nichts verändert, weder Hebungen noch Aufschiftungen vorgenommen.

Tafel 2 gibt schematisch ein geotechnisches Längenprofil in diesem, durch die Nachsetzung betroffenen Streckenabschnitt. Die darin anzutreffenden Böden sind durch:

- das spezifische Gewicht γ
- den Elastizitätsmodul E
- die Poisson-Zahl ν
- die Kohäsion C
- die anfängliche Porenziffer e_0 und
- den Zusammendrückungsindex λ

definiert.

Die Kriechzahlen wurden wie vorstehend beschrieben bestimmt.



STOFFDATEN						
	Beton	Fundations- schicht	Damm	Silt:	Sand	Torf
No Material	1	2	3	4	5	6
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	22.00	17.50	17.20	17.00	18.15	14.6
$E(\text{kN/m}^2)$	$20 \cdot 10^6$	$300 \cdot 10^2$	$250 \cdot 10^2$	$200 \cdot 10^2$	$360 \cdot 10^2$	$50 \cdot 10^2$
ν	0.2	0.3	0.30	0.30	0.27	0.35
$C(\text{kN/m}^2)$	-	0	10	10	0	6
$\phi(^{\circ})$	-	30	30	30	-	27
e_0	-	-	-	-	-	-
k_y, k_z	-	$4.35 \cdot 10^{-3}$	0.010	0.010	-	0.01
Creep						
A^d	0.4			$1.1 \cdot 10^{-4}$		$3.4 \cdot 10^{-4}$
m^d	0.18			0.15		0.15
A^v	0			$1.1 \cdot 10^{-4}$		$3.4 \cdot 10^{-4}$
m^v	0			0.15		0.15

Tafel 2 Geotechnisches Längenprofil (Schema) über die Länge der Setzungsmulde und verwendete Materialkennwerte

Es wurden mit unterschiedlichen volumetrischen und deviatorischen Komponenten gearbeitet.

Parametrische Anpassungen erfolgten um einen möglichst hohen Annäherungsgrad der numerischen Abbildung an die reale Langzeit-Verformung der Fahrbahnebene zu erreichen (Fig. 8).

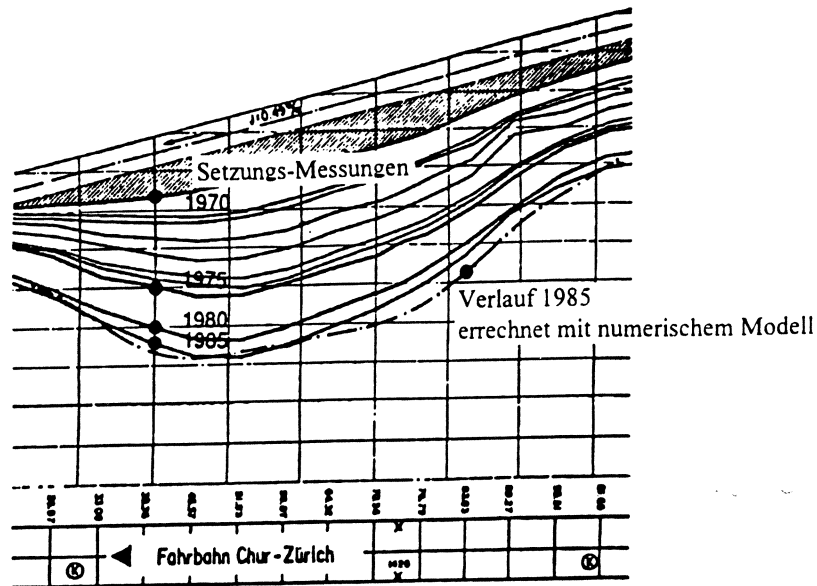


Fig. 8 Beobachtete, vermessene Setzungsabläufe im Vergleich zu den errechneten des numerischen Modells

Die numerischen Modellrechnungen für dieses Fallbeispiel wurden für den Betonbelag (gekoppelte Einzelplatten wie in situ) und einen („flexiblen“) Asphaltbelag durchgeführt.

Aus den errechneten Fahrbahndeflektionen wurden die drei Befahrbarkeitswerte errechnet (Tafel 3).

		Befahrbarkeits-Kriterien		
		ARS	Abheben des Rades von der Unterlage	Max. Vertikal-Beschleunigung
Werte	max.		1	2.3
	Warnwert		0.5	1.6
Derzeitige (1985) Werte in Setzungsmulde Flums		0.112	0.166	1.37
Beton		0.14	0.19	1.89
Asphalt		0.185	0.22	2.63

Tafel 3 Errechnete Befahrbarkeitswerte aus der Modellrechnung für die Langzeit-Verformungen

VI. Ergebnisse

- Es wurde ein physikalisches Modell unter Anwendung der Finite Element Methode zur Simulation langfristig ablaufender Setzungsvorgänge (Konsolidationssetzungen) geschichteter Böden entwickelt.
 - Das Modell erlaubt, den dämpfenden Einfluss unterschiedlich biegesteifer Strassenoberbauten auf die Reflexion der sich im Verlauf der Zeit einstellenden Untergrundwelligkeit in die Fahrbahnebene zu studieren und quantitativ zu bestimmen.
 - Störend bei diesen Reflexionen der Setzungen in die Fahrbahnebene ist insbesondere der Grad ihres *differentiellen* Charakters.
 - Differentielle Setzungen bewirken Winkeländerungen in Längs-, allenfalls auch in Querrichtung der Fahrbahnebene. Solche Winkeländerungen wirken sich auf die operationelle Benützbarkeit der Fahrbahn aus:
 - Hinsichtlich *Fahrkomfort* und
 - hinsichtlich *Fahrsicherheit*
 - Solche Veränderungen in der Fahrbahnebene lassen sich durch eine ganze Reihe von Messmethoden bewerten. Das entwickelte 2-dimensionale Modell enthält drei solcher Methoden zur Bewertung der Fahrbahnwelligkeit in Längsrichtung:
 - ARS (average rectified slope)
 - Sicherheitsgrad gegen abheben des Rades von der Fahrbahnebene
 - Maximale Vertikalbeschleunigung die auf die Insassen wirkt.
- Im Bemessungsvorgang lässt sich demnach die Auswirkung unterschiedlich biegesteifer Strassenoberbauten auf die *Funktionalität* der Fahrbahn quantitativ bestimmen und vergleichen.
- Generell gilt:* Mit zunehmender Biegesteifigkeit des Oberbaues nimmt auch seine Dämpfungswirkung auf die Fahrbahnwelligkeit zu.
- Das Kriterium der maximalen Beschleunigung gibt die kritischste Bewertung bei langwelligen differentiellen Fahrbahndeflektionen.
 - Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde diese Wirkung spezifisch im Fallbeispiel der Setzungsmulde der N3/SG zwischen Flums und Heiligkreuz nachgewiesen. Die Fahrbahn selbst besteht dort aus einem gefugten Betonbelag mit Plattenlängen von 6.25 m.
 - Gefugte Betonbeläge mit Plattenlängen von 5-7 m und Dicken < 0.30 m haben dämpfende Wirkung für geringere Deflektionen und kurze Wellenlänge (< 10 m).

Bei grossen Wellenlänge (> 30 m) hingegen ist kein merklicher Einfluss festzustellen.

- Die Variabilität der Schichtkonfigurationen in unsern Böden ist derart gross, dass jede Lokalität für sich, individuell untersucht werden muss. Bemessungsnomogramme beispielsweise sind deshalb untauglich. Die hier entwickelte numerische Methodik ist anpassungsfähig genug, um den variablen geotechnischen Bedingungen Rechnung zu tragen.
- Der Bemessungsvorgang selbst erfolgt wie üblich:

1. Definition der Nutzungsdauer mit
Prognose der kumulierten äquivalenten Achslastübergänge

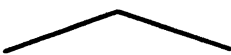
2. Geotechnische und konstruktive Entscheide

- 2.1 Massnahmen zur zeitlichen Beeinflussung der Primärsetzungen

- 2.2 Strukturierung des Strassenoberbaues:

- Belag

- Foundationsschichten



gebunden, resp. ungebunden

- event. als Sandwich

3. Numerische Analyse des Systems (Oberbau + Untergrund) bezüglich definierte Nutzungsdauer.

Überprüfung, ob funktionelle Tauglichkeit gegeben ist oder nicht (durch anlegen der/des Befahrbarkeitskriterien/-kriteriums).

Falls nicht erfüllt bestehen zwei Alternativen:

- 3.1 Biegesteifigkeit des Oberbaues erhöhen oder, falls sich auch dadurch die angestrebte Nutzungsdauer unter Einhaltung der Befahrbarkeitskriterien nicht erreichen lässt durch

- 3.2 Reduktion der Nutzungsdauer mit der Konsequenz, dass geeignete Sanierungen früher und in kürzerer Periodizität erforderlich werden.

4. Nachweis auf Tragfähigkeit der schliesslich gewählten Struktur.

VII. Folgerungen/Ausblick

- Mit dem entwickelten Modell und dem ausgetesteten Rechenprogramm [8] wird die *funktionale* Bemessung von Strassenoberbauten möglich. (Die Strasse in ihrer funktionalen Bedeutung für den Benützer: Gebrauchstauglichkeit/Befahrbarkeit).
- Für langweilige Setzungen sollten grundsätzlich fugenlose Betonbelagssysteme gewählt werden:
 - Durchlaufend bewehrte
(Beispiel: Gesamterneuerung 1988 der Kantonsstrasse Le Locle-Col des Roches, Kt. NE)oder
 - Vorgespannte Betonbeläge
(mit fugenlosen, rissfreien Plattenlängen von $L \leq 120$ m)
- Das theoretische und programmatische Instrument zur Lösung der funktionalen Bemessung von Strassen auf wenig tragfähigem, zu Setzungen neigendem Baugrund ist damit entwickelt.

Dringend erwünscht ist der Ausbau dieses Instrumentariums auf grössere Benutzerfreundlichkeit ebenso wie eine häufige Anwendung in der Konstruktionspraxis. Damit erst ergäbe sich die Möglichkeit zur stetigen Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Rechenprogramms.

Die Forschungsstellen

Betonstrassen AG



Prof. W. Wilk

ZACE Services SA



Dr. Th. Zimmermann

Literatur

1. Maillart R., unveröffentliche Studie, Berichte über die Bemessung von Betonstrassen an die E.G. Portland, 1926 und 1928.
2. Siedeck P., Lück, Untersuchungen des Untergrundes schwerbelasteter Betonfahrbahndecken, Strassen und Autobahn, H. 6/1970
3. Wilk W., Cement Concrete Pavements on soft soils sensitive to differential settlements. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Concrete Pavement Design, 1982, Purdue University, USA
4. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau: Merkblatt über Strassenbau auf wenig tragfähigem Untergrund, Köln, 1988
5. Yang Nai C., Design of functional pavements. Mc Graw-Hill, 1972, New York
6. Vos E., Thickness design of plain cement concrete pavements on soils sensitive to differential settlements. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 1985, Purdue University, USA.
7. Mc Keen R. Gordon, Design of Airport Pavements for expansive soils. Final Report U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 1981
8. ZSOIL.PC-BEAG, V 2.1, User Manual. ZACE Services, Ltd. Lausanne. (Englisch)

Bildverzeichnis

Seite

Bild 1	N3/SG Setzungsmulde im Abschnitt Flums-Heiligkreuz (Photo am 2.9.1991)	19
---------------	---	----

Figurenverzeichnis

Fig. 1	Charakteristik von Konsolidations-Setzungen (Primär-/Sekundärsetzungen)	20
Fig. 2	Völlig flexible Anpassung des Oberbaues an den Setzungsverlauf im Untergrund	20
Fig. 3	Oben: Höchst biegesteifer Oberbau Unten: Realistische, optimale Zielsetzung	21
Fig. 4	Variabilität der Schichtfolgen	22
Fig. 5	Oben: Formulierung der Bruchbedingungen nach Drucker-Prager Unten: Oedometer-Test	6
Fig. 6	Näherung für Kriechgesetz mit Hilfe des Kelvin-Modells	8
Fig. 7	Modell eines „Viertelfahrzeuges“ (quarter car)	9
Fig. 8	Fallstudie: Beobachtete, vermessene Setzungsabläufe im Vergleich zu den errechneten des numerischen Modells.	12

Tabellenverzeichnis

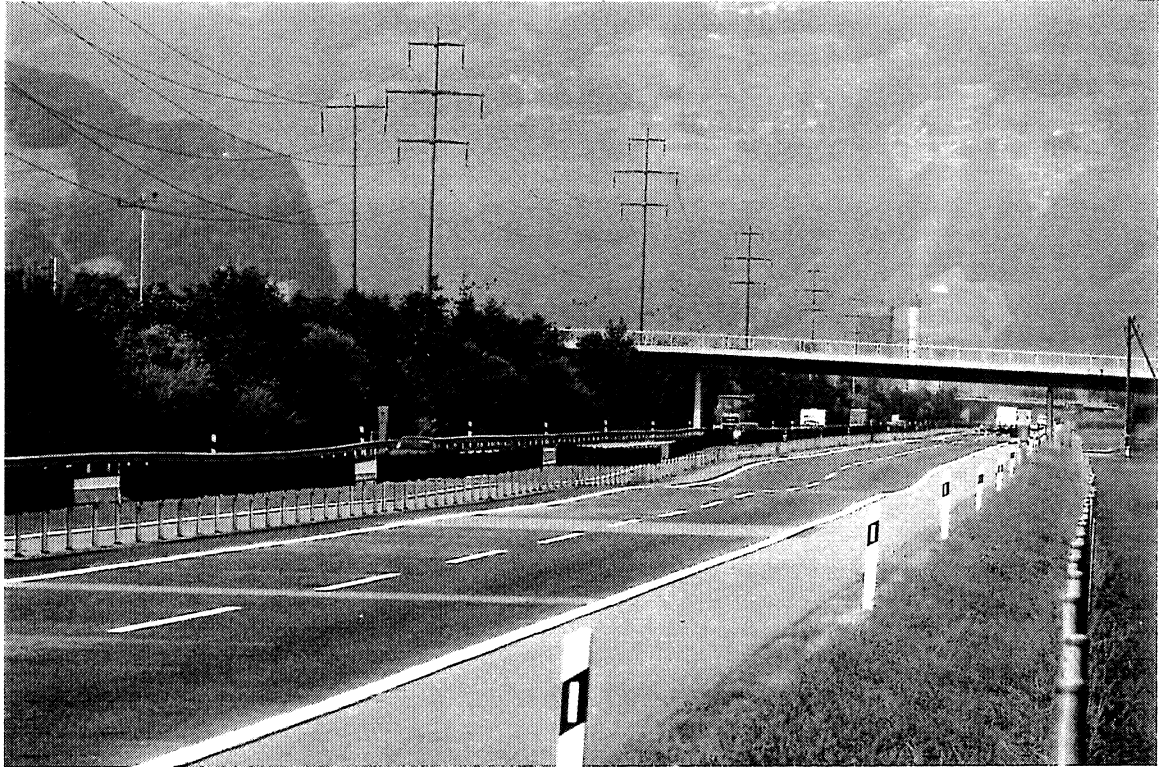
Tafel 1	Grundlegende Beziehungen des 2-Phasenmodells für Böden	5
Tafel 2	Fallstudie: Geotechnisches Längenprofil (Schema) über die Länge der Setzungsmulde und verwendete Materialkennwerte	11
Tafel 3	Errechnete Befahrbarkeitswerte aus der Modellierung für die Langzeitverformungen	12

Katalog ausgeführter Betonstrassen in der Schweiz auf wenig tragfähigem Baugrund

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Col des Roches - Le Locle • N3 Zürich - Sargans, Abschnitt
Flums/Mels - Heiligkreuz • Flugplatz Payerne, Ausführung 1959/60
Pistenverlängerung und neue Rollwege • Freienbach - Pfäffikon • Seebodenalp Küssnacht a. R. • Brütisellen Winterthurerstrasse • Walenseestrasse Walenstadt-Tscherlach • Gemeinde Wangen / ZH
Winterthurerstrasse in der Ortschaft Brütisellen • Höri - Riet • Ricken - Bildhaus • Col des Roches - Le Locle • Kantonsstrasse Bennauermoos bei Biberbrücke / SZ • Zivilflugplatz Dübendorf
Startpiste • Kantonsstrasse Hefenhausen - Engwilen • Seestrasse Wädenswil • Moosmattstrasse auf der Allmend Luzern • Sportplatzanlagen auf der Allmend Luzern • Wallisellen - Bassersdorf • Kantonsstrasse Ibach - Brunnen | <p>Gesamterneuerung 1988</p> <p>Baujahr 1970</p> <p>Baujahr 1959/1960</p> <p>Baujahr 1959</p> <p>Baujahr 1957</p> <p>Baujahr 1953</p> <p>Baujahr 1952/1953</p> <p>Baujahr 1952</p> <p>Baujahr 1951</p> <p>Baujahr 1947</p> <p>Baujahr 1946</p> <p>Baujahr 1937</p> <p>Baujahr 1936/1937</p> <p>Baujahr 1935</p> <p>Baujahr 1934</p> <p>Baujahr 1933</p> <p>Baujahr 1933</p> <p>Baujahr 1933</p> <p>Baujahr 1931</p> |
|--|---|

Nationalstrasse N3 / SG

Aufnahmen vom 2. 9. 1991



Mels → Flums



Flums → Mels

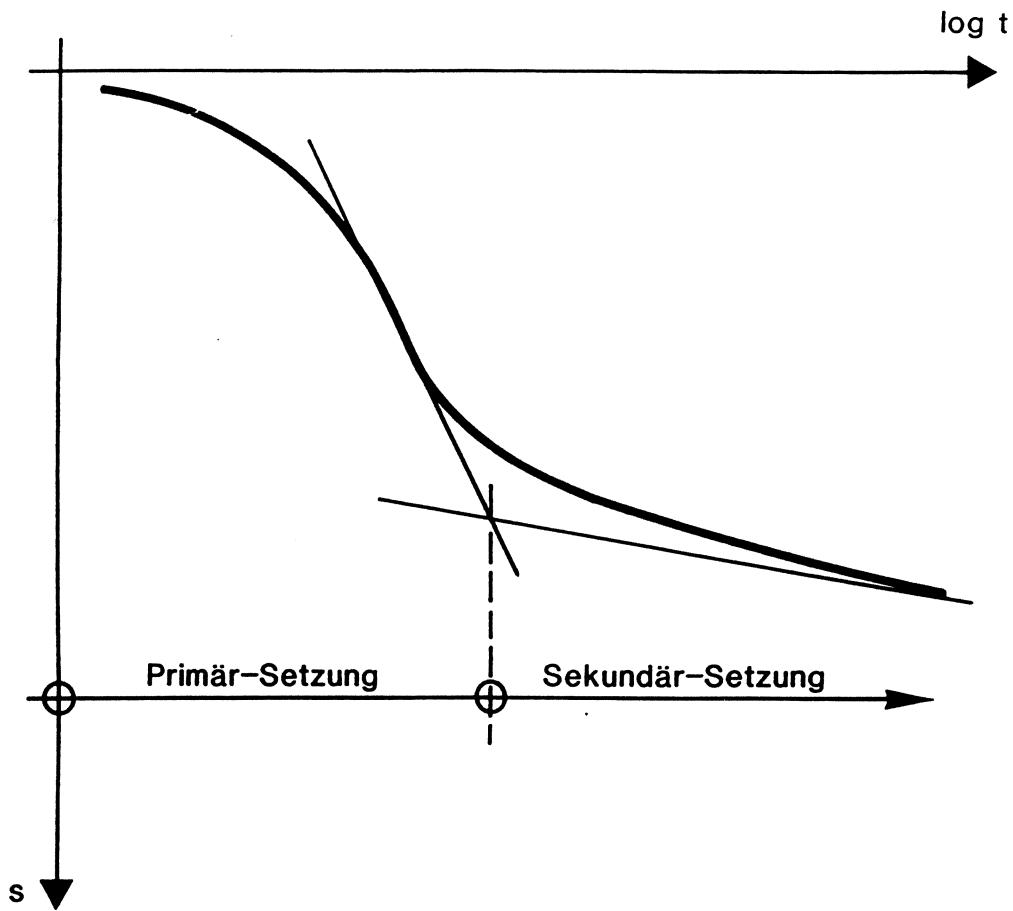


Fig. 1 Charakteristik von Konsolidations-Setzungen



Fig. 2 Völlig flexible Anpassung des Oberbaues an den Setzungsverlauf im Untergrund

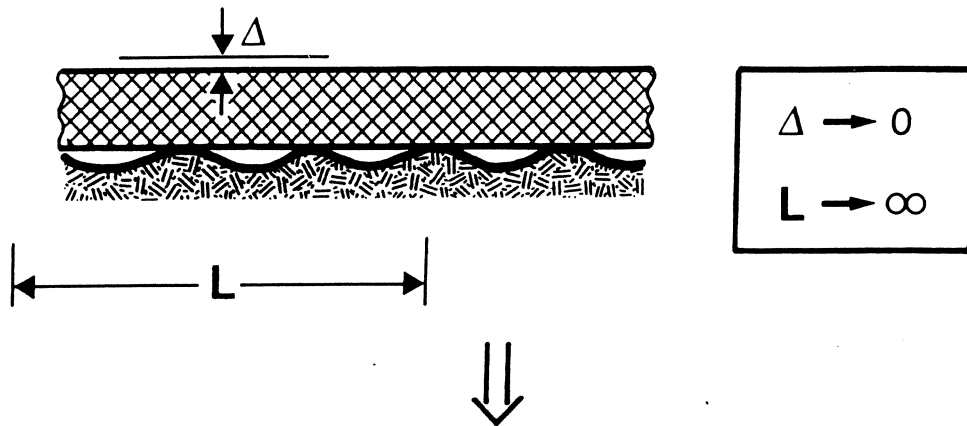
Charakterisierung

- Beanspruchung des Oberbaues $\Rightarrow 0$
- Verformungswiderstand und damit Dämpfungseffekt $\Rightarrow 0$

Charakterisierung

- Hoher (Kriech-) Verformungswiderstand, damit Dämpfungseffekt $>$
- Beanspruchung im Oberbau infolge Deflektion der Unterlage ist zu berücksichtigen

Idealistische Zielsetzung (unwirtschaftlich)



Realistische Zielsetzung

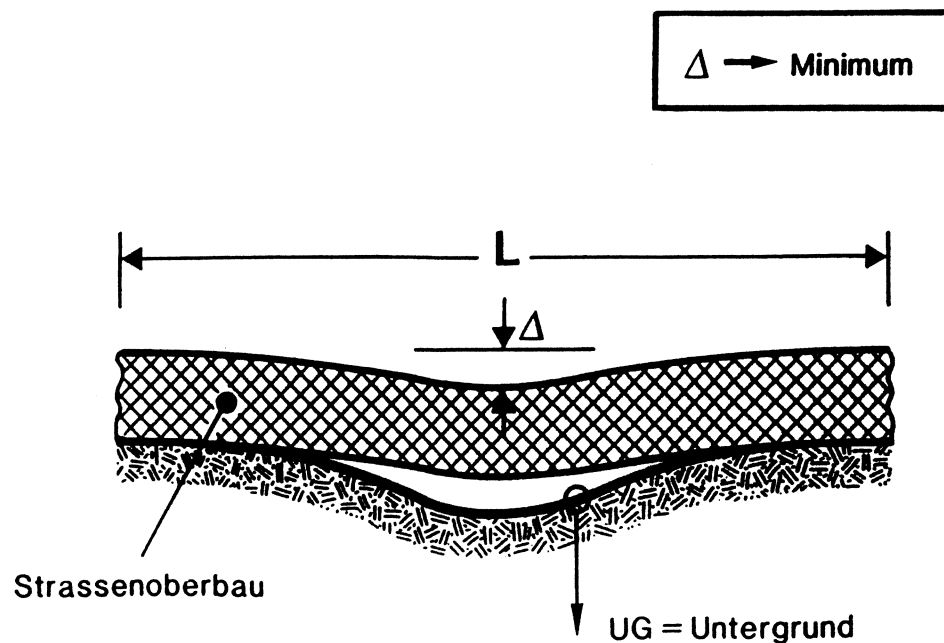
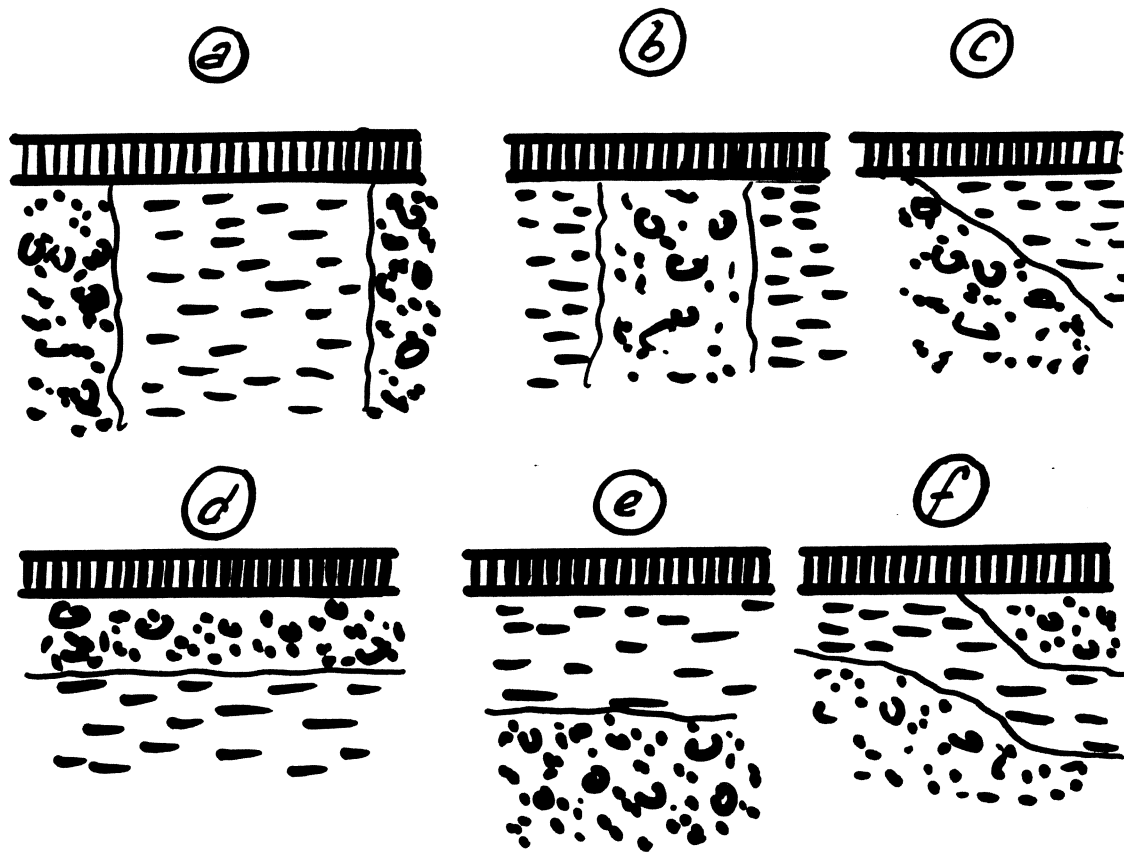


Fig. 3 Oben: Höchst biegesteifer Oberbau
Unten: Realistische, optimale Zielsetzung



- *Weiche, kompressible Schicht*
- *tragfähige, dicht gelagerte, konsolidierte Schicht*

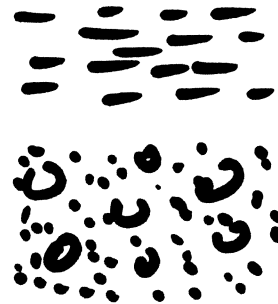


Fig. 4 Variabilität der Schichtfolgen