

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 123 (1972)

Heft: 3

Artikel: Dimensionierung und Verstärkung von schwach beanspruchten Strassen

Autor: Hirt, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-765037>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen Journal forestier suisse

123. Jahrgang

März 1972

Nummer 3

Dimensionierung und Verstärkung von schwach beanspruchten Strassen¹

Von *R. Hirt*, Zürich

Oxf. 383

(Professur für forstliches Ingenieurwesen der ETH Zürich)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
 2. Ziel einer Dimensionierung
 3. Der AASHO-Strassentest
 4. Ergebnisse des AASHO-Strassentests für flexible Aufbauten
 - 4.1 Die Befahrbarkeit einer Strasse
 - 4.2 Das Verhalten der flexiblen Aufbauten
 - 4.3 Die Durchbiegung der Strasse unter einer Last (die elastische Deflektion)
 5. Anwendung der Ergebnisse des AASHO-Strassentests für die Dimensionierung von schwach beanspruchten Strassen
 - 5.1 Untergrundtragfähigkeit
 - 5.2 Dimensionierungsverkehr
 - 5.3 Umgebungsbedingungen (Regionalfaktor)
 - 5.4 Tragfähigkeitskoeffizienten der gebräuchlichen Baustoffe
 - 5.5 Dimensionierung gleichwertiger Varianten und Bestimmung des wirtschaftlichsten Aufbaus
 6. Die Verstärkung schwach beanspruchter Strassen
 - 6.1 Einleitung
 - 6.2 Bestimmung der notwendigen Verstärkung nach AASHO (Tragfähigkeitskriterium)
 - 6.3 Bestimmung der notwendigen Verstärkung auf Grund der Deflektion (Deformationskriterium)
 7. Zusammenfassung und Ausblick
- Literaturverzeichnis
- Résumé

* Vortrag, gehalten am 20. Dezember 1971 im Rahmen der Forstwirtschaftlichen Kolloquien an der ETH Zürich.

1. Einleitung

Die schwach beanspruchten Strassen können nach rechtlich-politischen, bautechnischen und verkehrstechnischen Kriterien sowie nach Charakter und Verkehrsregelung abgegrenzt werden (Abbildung 1).

Im Endausbau wird die Länge dieses sekundären und tertiären Strassen- netzes in der Grössenordnung von 100 000 km liegen, wobei ein sehr grosser Teil der vor 1950 erstellten Strassen bereits verstärkt werden muss. Trotz dieses ansehnlichen Bauvorhabens ist keine fundierte Methode für die Dimensionierung der schwach beanspruchten Strassen verfügbar. Die heutige Praxis der erfahrungsmässigen Bestimmung des Strassenoberbaus führt vielfach nicht zu einer strukturell richtigen Dimensionierung und erlaubt keinen wirtschaftlichen Variantenvergleich. Die Dimensionierung des Oberbaus von neuen Strassen und die Bestimmung der Verstärkung alter Strassen ist eine sehr komplexe Aufgabe, mit deren Lösung sich die laufende Forschung beschäftigt. Das Konzept der Forschung und die ersten Resultate bilden den Gegenstand der folgenden Ausführungen.

Rechtlich-politisch:

Gemeinde-, Korporations-, Wald-, Güter-, Alpstrassen

Bautechnisch:

Nach SNV-Norm 640 405

Gruppe I: Strassen mit sehr leichtem Verkehr mit einem mittleren täglichen Lastwagen- verkehr ($> 1,5$ t Nutzlast) von 1 ... 30

Verkehrstechnisch:

Erschliessungsstrassen: Flächenerschliessung für die Bewirtschaftung und Nutzung

Sammelstrassen: Sammlung des Verkehrs aus verschiedenen Einzugsgebieten, Flächen- erschliessung

Verbindungsstrassen: Verbindung von Ortschaften, Weilern, Waldgebieten, Alpen usw.; Sammlung des Verkehrs aus verschiedenen Einzugsgebieten, Flächenerschliessung

Charakter und Verkehrsregelung:

Strassen für Mischverkehr inklusive Fussgänger, Traktoren, Fuhrwerke, in der Regel einspurig

Abbildung 1

Einteilung der schwach beanspruchten Strassen

2. Ziel einer Dimensionierung

Die Dimensionierung des Oberbaus einer Strasse bezweckt die Bestim- mung verschiedener, in bezug auf die Tragfähigkeit gleichwertiger Aufbau- varianten unter möglichst weitgehender Berücksichtigung der massgebenden Dimensionierungsfaktoren, wie Untergrund, Umgebungsbedingungen, Ver- kehr und Baustoffe (Abbildung 2).

Schema der Strassendimensionierung

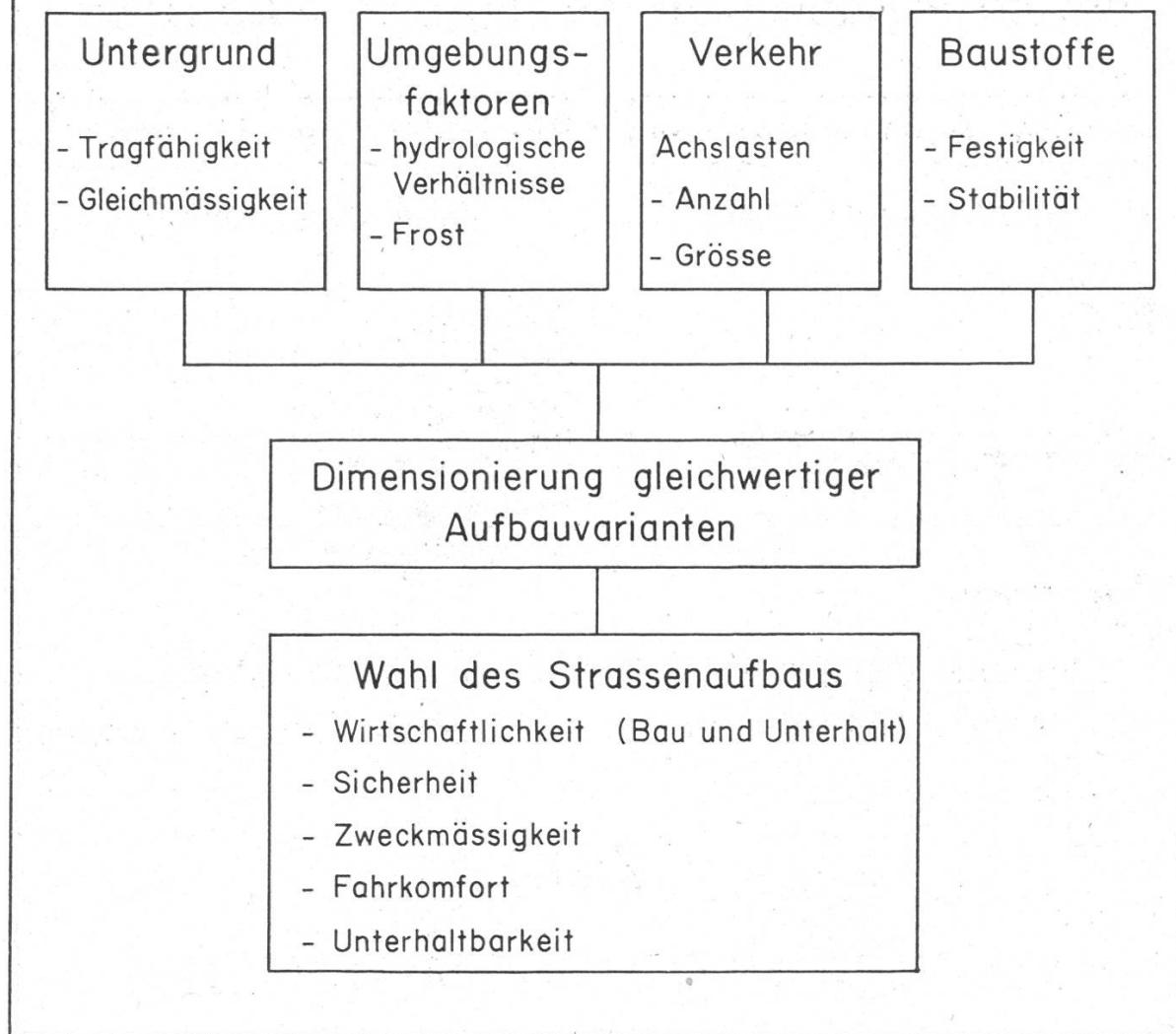


Abbildung 2

Die Auswahl aus mehreren gleichwertigen Varianten erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien der Sicherheit, der Zweckmässigkeit, des Fahrkomforts, der Unterhaltbarkeit und der Wirtschaftlichkeit in bezug auf Bau- und Unterhaltskosten,

Die AASHO-Dimensionierungsmethode, welche die erwähnten Dimensionierungsfaktoren weitgehend berücksichtigt, basiert auf den Ergebnissen eines amerikanischen Grossversuchs, dem AASHO-Road-Test (AASHO = American Association of State Highway Officials).

In der Schweiz wird diese Methode im «grossen Strassenbau» übernommen. Eine sinngemässe Anwendung auf schwach beanspruchte Strassen erscheint deshalb als folgerichtig, obwohl diese in verschiedener Beziehung ausserhalb der gesicherten Testergebnisse liegen.

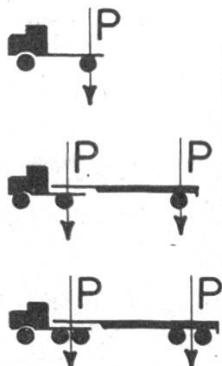
AASHO- TEST:

Versuchsvariablen für die flexiblen Aufbauten

Anzahl Achslastwechsel

→ Verhalten der Strassen

Versuchsvariablen:



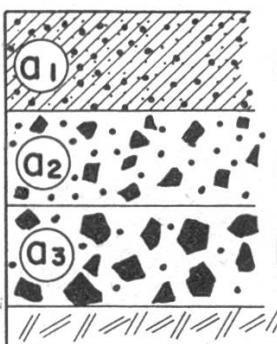
Anordnung der Achsen

Grösse der Achslasten P

Versuchskonstanten:

1114000 Achslastübergänge

Versuchsvariablen:



Aufbaustärken D₁, D₂, D₃

Baustoffe a₁, a₂, a₃

Versuchskonstanten:

Untergrund, Umgebungs faktoren



Ziel:

DIMENSIONIERUNGSMETHODE

Abbildung 3

Die AASHO-Methode erlaubt die Dimensionierung flexibler und starrer Aufbauten. Der starre Aufbau, die Zementbetonplatte wird im folgenden nicht behandelt, weil bei schwacher Verkehrsbeanspruchung die Plattenstärke durch die konstruktive Minimalstärke gegeben wird und zudem der starre Aufbau nicht die Regel für schwach beanspruchte Strassen darstellt.

3. Der AASHO-Strassentest

In den USA führte nach 1945 die starke Zunahme der Lastwagentransporte zu unverhältnismässig grossen Schäden und Unterhaltsaufwendungen. Zur Abklärung der Schadenfaktoren beschloss die American Association of State Highway Officials einen Strassengrossversuch, den AASHO-Road-Test, mit einem Kostenaufwand von 28 000 000 Dollar auszuführen (Abbildung 3).

HAUPTVERSUCH

Belag D₁

Asphaltbeton: gebrochener Kalkstein + Sand + Filler

Ausgleichsschicht: Kornbereich 0/25 mit 4,5 % B 85/100

Deckschicht: Kornbereich 0/18 mit 5,4 % B 85/100

Tragschicht D₂

gebrochener dolomitischer Kalkstein: Kornbereich 0/38

Fundationsschicht D₃

natürlicher Kies-Sand: Kornbereich 0/25

SPEZIALVERSUCHE

Tragschicht D₂

a) mechanisch stabilisierter Kies-Sand, Kornbereich 0/38

b) zementstabilisierter Kies-Sand, Kornbereich 0/25

c) bitumenstabilisierter Kies-Sand, Kornbereich 0/25

UNTERGRUND

USCS-Klassifikation	:	CL
Fliessgrenze	W _L	: 29 %
Ausrollgrenze	W _P	: 16 %
Plastizitätsindex	I _P	: 13
opt. Trockenraumgewicht	γ _d	: 1,96 t/m ³
opt. Wassergehalt	W _{opt}	: 15 %
CBR-Labor (Wasserlagerung)	:	2—4 %
CBR-Feld	:	2—4 %

Abbildung 4

AASHO-Road-Test: Baustoffe, Untergrund

Das wichtigste Ziel des Versuchs wurde folgendermassen formuliert:

Bestimmung der Beziehungen zwischen der Anzahl Lastwiederholungen verschiedener Achslasten und Achsanordnungen und dem Verhalten von verschiedenen dicken, flexiblen und starren Aufbauten auf einem Untergrund von bekannten Eigenschaften.

Das Testgelände bei Ottawa, Illinois, liegt unter ähnlichen klimatischen Bedingungen wie das schweizerische Mittelland. Mit dem Bau von 6 Versuchsschleifen wurde 1956 begonnen, wobei 468 Versuchsabschnitte in flexibler und 368 in starrer Bauweise auf einem gleichmässigen, tonigen Untergrund angelegt wurden. Die Versuchsvariablen für die flexible Bauweise waren:

- D₁ Dicke des bituminösen Belags
- D₂ Dicke der Tragschicht
- D₃ Dicke der Fundationsschicht.

Testfahrzeuge

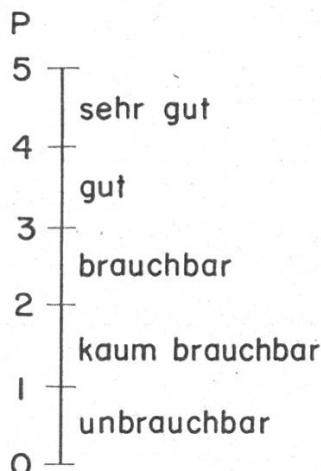
Schleife	Spur	Gewicht in Tonnen		
		Lenkachse	Lastachse	Totalgewicht
2	1		0,9	0,9
	2		0,9	2,7
3	1		1,8	5,5
	2		2,7	10,9
4	1		2,7	8,2
	2		4,1	14,5
5	1		2,7	10,2
	2		4,1	18,2
6	1		4,1	13,6
	2		5,5	21,8
Lenkachse		Lastachse		

Abbildung 5

Als Baustoffe wurden die in den USA gebräuchlichsten Materialien geprüft (Abbildung 4), nämlich ein Asphaltbetonbelag, eine Schottertragsschicht und eine Kies-Sand-Fundationsschicht. In einem Spezialversuch wurden zusätzlich stabilisierte Tragschichten untersucht, nämlich ein mechanisch stabilisierter Kies-Sand, ein bituminös stabilisierter Kies-Sand und ein zementstabilisierter Kies-Sand. Der Verkehr auf 10 Fahrspuren (5 Schleifen) wurde 1958 gestartet. Während 25 Monaten wurde eine kontrollierte Verkehrsbelastung von 1 114 000 Achslastwechseln aufgebracht. Die untersuchten Achslasten lagen zwischen der 0,9-t-Einzelachslast und der 21,7-t-Doppelachslast (Abbildung 5).

Bestimmung der Befahrbarkeit

subjektive Beurteilung
der Befahrbarkeit P



objektive Messung
der Befahrbarkeit P

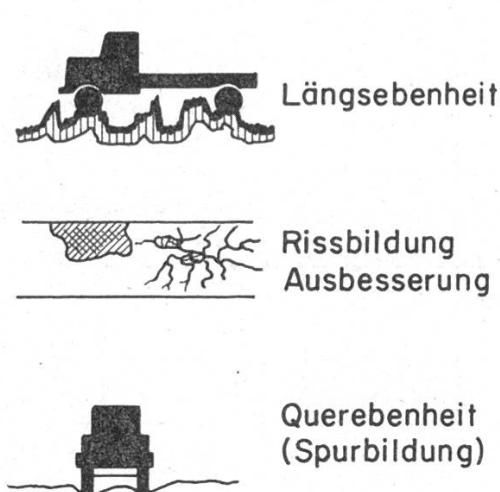


Abbildung 6

4. Ergebnisse des AASHO-Road-Tests für flexible Aufbauten

4.1 Die Befahrbarkeit einer Strasse

Die Aufgabe einer Strasse besteht darin, dem Verkehr in befriedigender Weise dienlich zu sein. Der Zustand einer Strasse, ausgedrückt als ihre Befahrbarkeit ist eine Eigenschaft, die vom Straßenbenutzer subjektiv als Fahrkomfort empfunden wird. Mit der Alterung der Strasse wird die Befahrbarkeit durch Schäden wie Unebenheiten, Verdrückungen, Spurbildungen, Risse, Schlaglöcher usw. verkleinert.

Der erste Schritt des Testprogramms bestand darin, die subjektive Beurteilung der Befahrbarkeit durch objektive Messwerte zu ersetzen. Dazu wurden 138 Strassen durch verschiedene Verkehrsteilnehmer befahren und nach einem einfachen Schema in bezug auf ihre Befahrbarkeit bewertet (Ab-

Verlauf der Befahrbarkeit

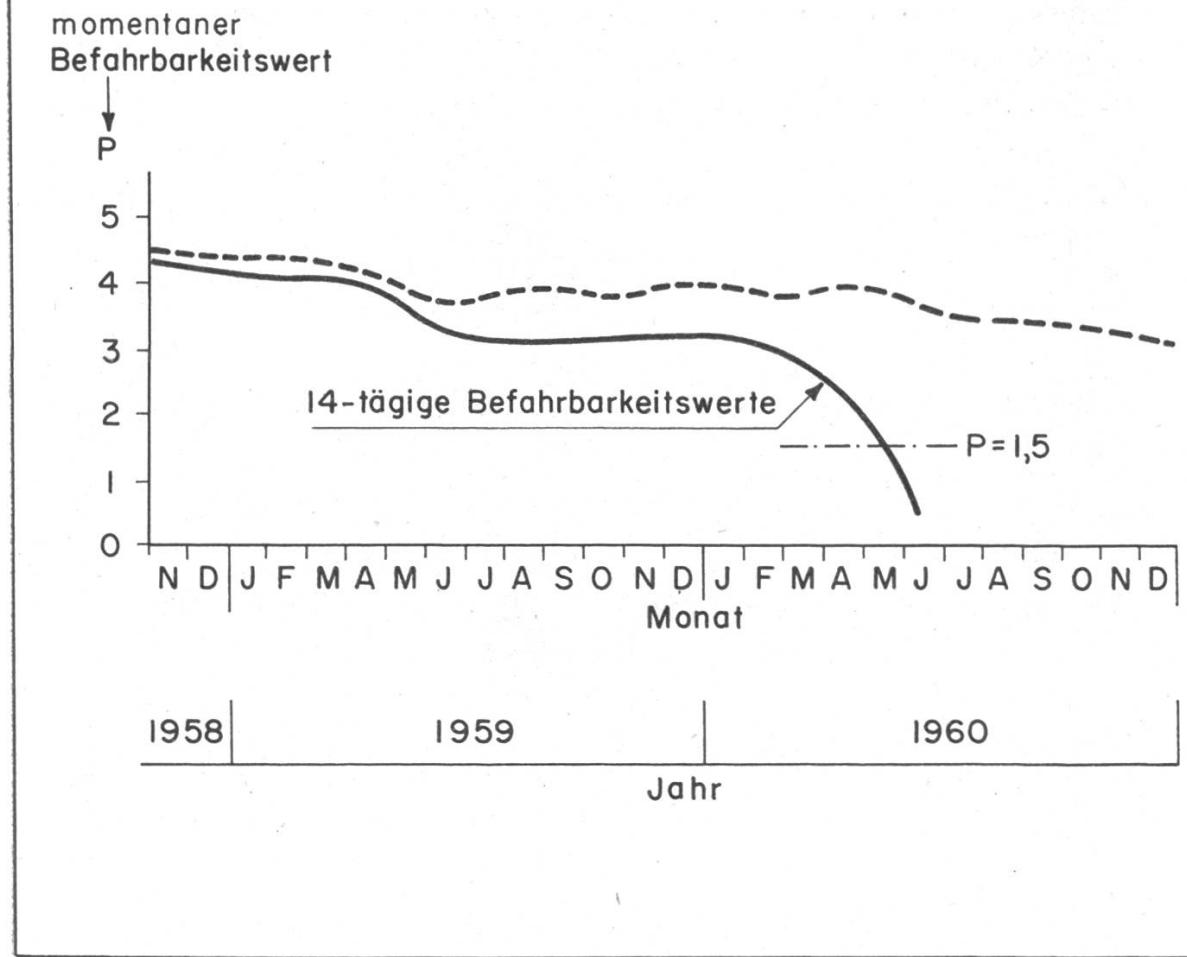


Abbildung 7

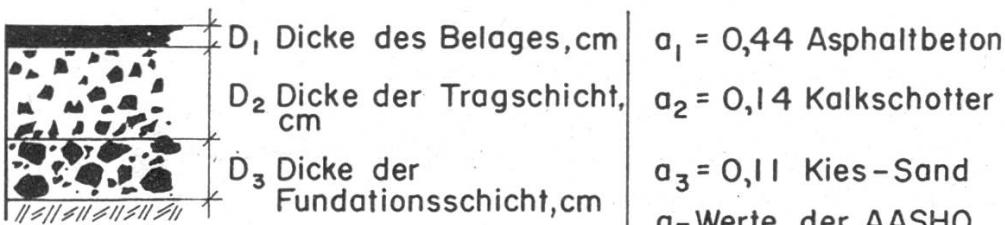
bildung 6). Eine objektive Zustandserfassung auf den gleichen Strassen erfolgte anschliessend durch folgende Messungen (Abbildung 6):

- mittlere Neigungsstreuung in den Fahrspuren (Längsebene)
- Ausmass der Rissbildung und Flickstellen in der Oberfläche
- Verdrückung in den Fahrspuren (Querebene).

Die subjektive Beurteilung der Benutzer konnte mit einer Kombination dieser objektiven Messwerte korreliert und als Befahrbarkeitsindex p ausgedrückt werden. Dieses neuartige Konzept ermöglicht jederzeit die vom Benutzer empfundene Befahrbarkeit einer Strasse reproduzierbar zu messen. Durch regelmässige Bestimmung der Befahrbarkeit kann die Befahrbarkeitsgeschichte einer Strasse, das heisst die Abnahme der Befahrbarkeit unter dem Verkehr, aufgezeichnet werden, bis die Endbefahrbarkeit von beispielsweise $p = 1,5$ erreicht ist (Abbildung 7). Bei Erreichung der Endbefahrbar-

AASHO-Kurven $P=1,5$

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 = \text{Stärkenindex}$$



$$a_1 = 0,44 \text{ Asphaltbeton}$$

$$a_2 = 0,14 \text{ Kalkschotter}$$

$$a_3 = 0,11 \text{ Kies-Sand}$$

a-Werte der AASHO Materialien

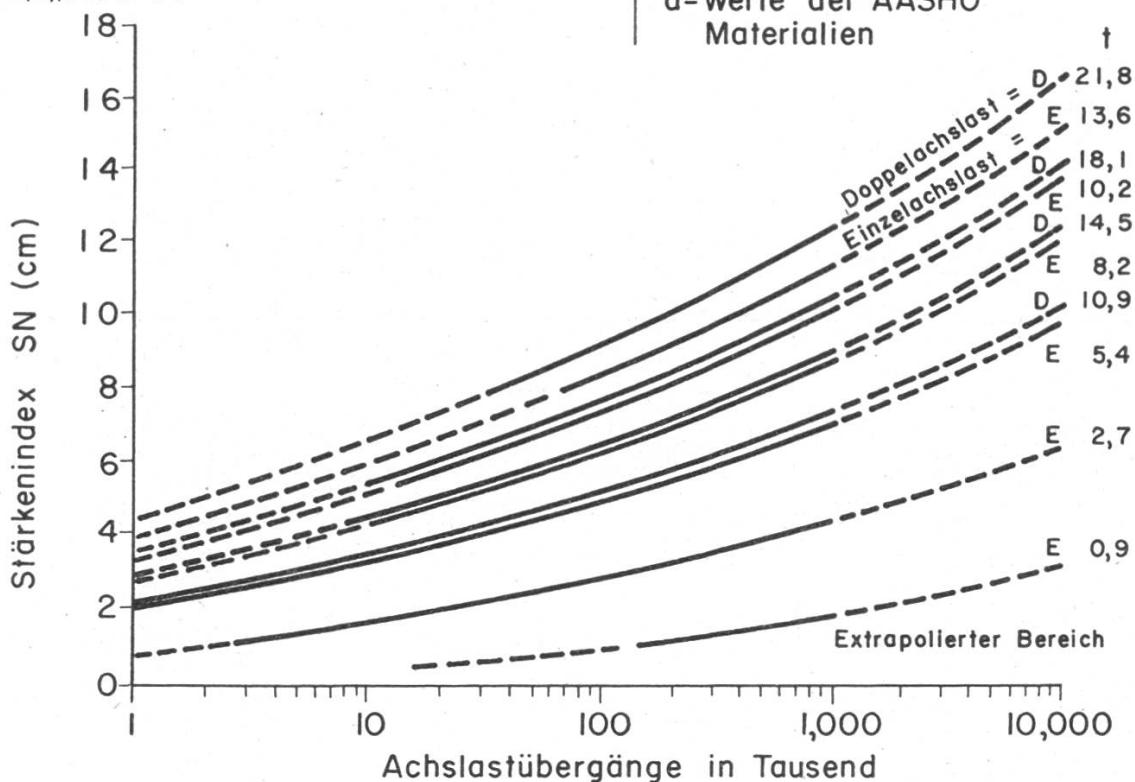


Abbildung 8

keit ist die Strasse nicht zerstört, sie kann aber nicht mehr mit dem notwendigen Fahrkomfort und genügender Sicherheit befahren werden. Aus diesem Befahrbarkeitskonzept resultiert eine neue, präzise Definition für die Lebensdauer einer Strasse, nämlich als jene Zahl von Achslastwechseln, bei der die Strasse nicht mehr befahrbar ist.

4.2 Das Verhalten der flexiblen Aufbauten

Im AASHO-Test wurde für alle Abschnitte jene Lastwechselzahl bestimmt, die zur Unbenützbarkeit führte, das heisst bei der die Befahrbarkeit unter den Wert $p = 1,5$ sank. Die statistische Verhaltensanalyse ergab die Beziehung zwischen der Aufbaustärke und der Anzahl möglicher Lastwechsel. Diese Beziehung, als Hauptresultat des Tests, lässt sich in den sogenannten AASHO-Kurven darstellen (Abbildung 8).

Die Aufbaustärke ist als Stärkenindex ausgedrückt, das heisst als Summe der Schichtstärken in Zentimetern multipliziert mit ihren entsprechenden Materialkoeffizienten. Er hat also die Form

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3$$

Diese lineare Form für die Aufbaustärke hat den Vorteil, dass die einzelnen Schichtstärken bei gleichbleibendem Stärkenindex variiert werden können. Dadurch ist es möglich, verschiedene gleichwertige Varianten mit gleichem Stärkenindex zu bestimmen.

Der Verkehr, das heisst die Anzahl Achslastwechsel ist mit einer tragfähigkeitsabhängigen Gewichtsfunktion versehen, entsprechend der Tatsache, dass die gleiche Anzahl Lastwechsel bei kleiner Tragfähigkeit im Frühjahr grössere Schäden verursacht als im Sommer und Herbst bei hoher Tragfähigkeit.

Aus den AASHO-Kurven lassen sich nun die erwarteten Zusammenhänge ableiten:

- Die Aufbaustärke muss um so grösser gewählt werden, je höher die Verkehrsbelastung der Strasse ist.
- Bei gleicher Zahl der Achslastübergänge benötigen die höheren Achslasten grössere Aufbaustärken.
- Bei gleicher Aufbaustärke können mehr schwächer belastete Achsen aufgenommen werden als schwere Achslasten.

Die AASHO-Kurven bilden die Grundlage für die Dimensionierung. In dieser Form gelten sie allerdings nur für die Testverhältnisse (Untergrund, Klima, Baustoffe, Fahrzeuge usw.).

4.3 Die Durchbiegung der Strasse unter einer Last (die elastische Deflektion)

Ein weiteres Ergebnis des AASHO-Tests ist die Entwicklung einer Messmethode zur Bestimmung des Verhaltens der Strassenaufbauten unter dem Verkehr. Die Methode besteht in der Messung der Durchbiegung der Strassendecke unter einer Last. Diese Durchbiegung wird als elastische Deflektion bezeichnet. Sie ist die Höhendifferenz eines Punktes während und nach der Belastung. Die elastische Deflektion wird mit dem Benkelman-Balken gemessen; in der Schweiz unter einem 5-t-Zwillingsrad eines Lastwagens (Abbildung 9).

Die Grösse der Frühjahrs- und Herbstdeflektion zeigte einen sehr guten Zusammenhang mit der Lebensdauer bzw. der Anzahl möglicher Achslastübergänge einer Strasse (Abbildung 10).

Durch die Messung der elastischen Deflektion ist jederzeit eine Prognose über die Zahl und Grösse der Achslastübergänge möglich, welche die Befahrbarkeit unter den Endbefahrbarkeitswert absinken lassen.

Prinzip der Deflektionsmessung

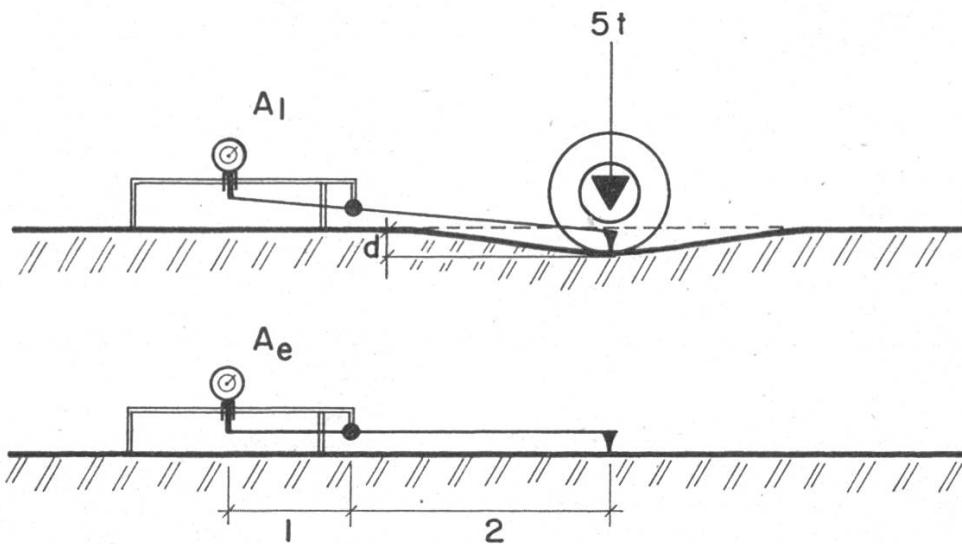


Abbildung 9

Die Grösse der elastischen Deflektion ist ein sehr gutes Mass für die Tragfähigkeit eines Strassenaufbaus. Als solches wurde sie zur saisonalen Gewichtung des Versuchsverkehrs verwendet.

5. Anwendung der Ergebnisse des AASHO-Strassentests für die Dimensionierung von schwach beanspruchten Strassen

Die im AASHO-Test gefundenen Zusammenhänge zwischen der Anzahl Achslastwechsel und dem Verhalten der Strassenabschnitte gelten streng genommen nur für die Testverhältnisse wie Untergrund, klimatische und hydrologische Umgebungsfaktoren, Versuchsverkehr, Baustoffe usw.

Das AASHO-Dimensionierungskomitee hat auf Grund der Testergebnisse allgemeingültige Dimensionierungsvorschläge aufgestellt (2). Dazu

Deflection and possible number of axle load transitions (8,2t)

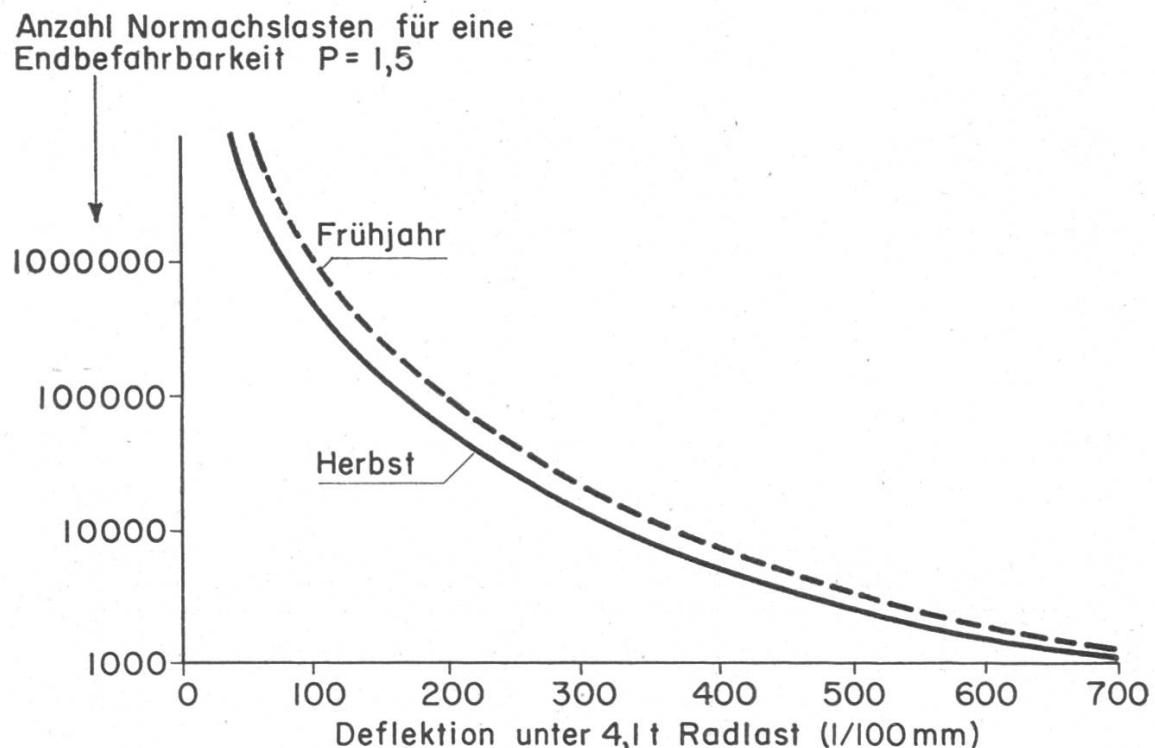


Abbildung 10

were the assumptions made, that the fundamental relationship between the load change number and the behavior of the streets for all soil types, for mixed traffic with different axle loads and also for other environmental conditions applies.

These assumptions allow the setup of a dimensioning diagram; in the case of the diagram for an end driving value of $p = 1,5$ (Figure 11). The parameters of the diagram are the ground load-bearing capacity (scale according to Giudicetti [3]), traffic and environmental factors expressed as regional factors. The building height is expressed as a strength index and is varied within the context of the thicknesses and materials of the layers mentioned.

Dimensionierungsdiagramm für flexible Aufbauten $P = 1,5$

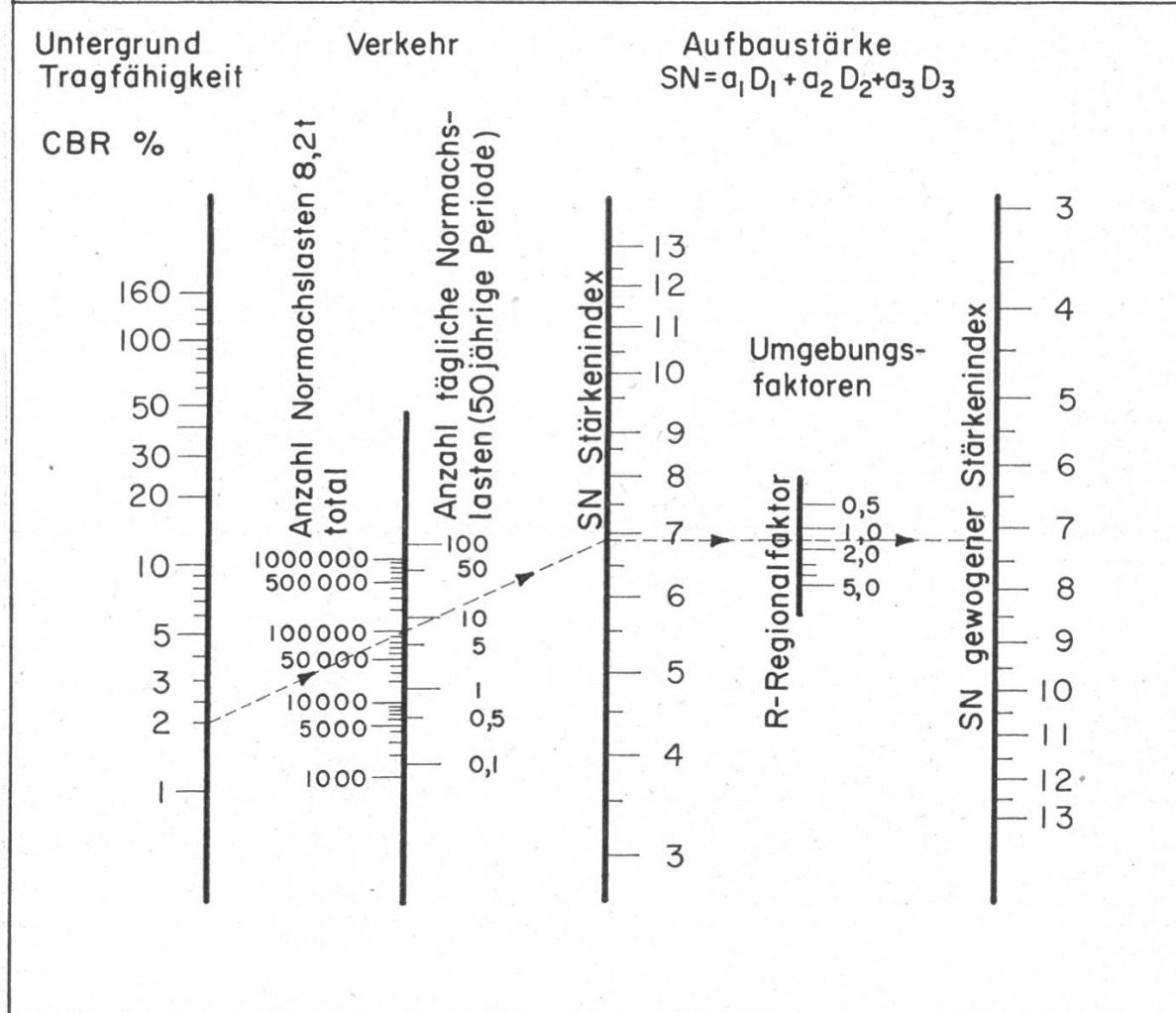


Abbildung 11

5.1 Untergrundtragfähigkeit

Die Untergrundtragfähigkeit geht als Einzelwert in das Dimensionierungsdiagramm ein. In Wirklichkeit ist sie aber kein über die ganze Planumssfläche gleichbleibender Wert, sondern sie ist wesentlichen zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterworfen.

Die zeitlichen oder saisonalen Veränderungen der Tragfähigkeit werden vor allem durch die Frost-Tauwirkungen verursacht (Abbildung 12). Die Reduktion der Tragfähigkeit in der Tauperiode kann in vielen Böden mehr als 50 Prozent des Sommer- oder Herbstwertes betragen. In den Nassböden mit naturgemäß kleiner Tragfähigkeit sind diese Unterschiede kleiner. Dasselbe gilt für Straßen ohne Schneeräumung im Winter. Diese jahreszeitlichen Tragfähigkeitsänderungen werden im Regionalfaktor erfasst.

Jahreszeitlicher Tragfähigkeitsverlauf

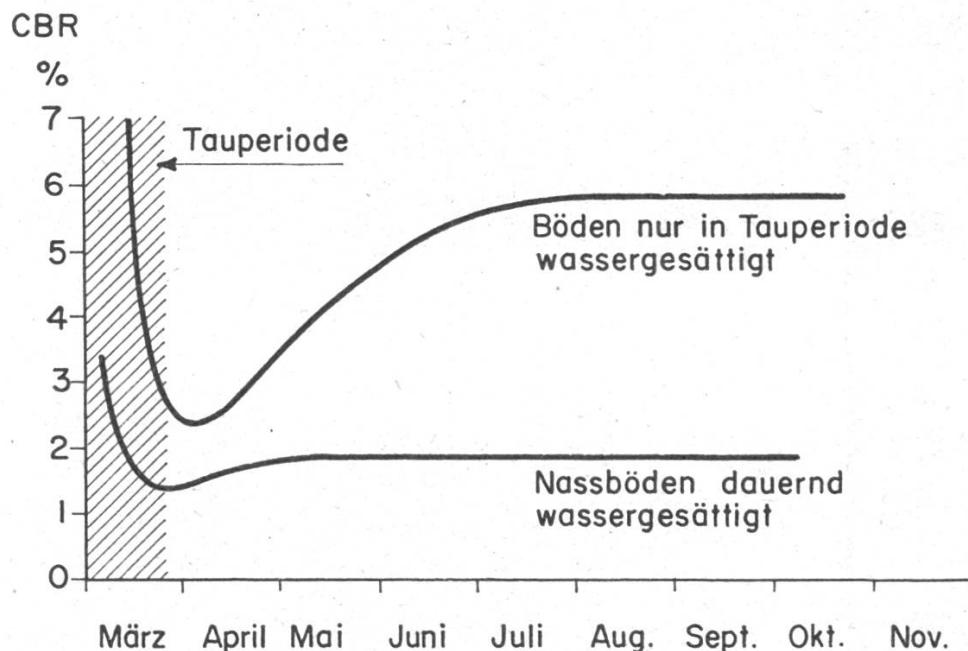


Abbildung 12

Zur saisonalen Änderung der Tragfähigkeit kommen die örtlichen Unterschiede, die ihren Grund in der Streuung der Lagerungsdichte, des Wassergehalts, der Kornzusammensetzung usw. haben. Die Tragfähigkeitswerte eines gleichmässigen Abschnittes gehören annähernd einer Normalverteilung an und können durch die statistischen Masszahlen Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient gut charakterisiert werden (Abbildung 13). Die Grundlage des AASHO-Dimensionierungsdiagramms ist der Mittelwert aus den örtlich streuenden CBR-Werten bei wassergesättigtem Zustand, sofern die örtliche Ungleichmässigkeit nicht zu gross ist.

Die örtliche Ungleichmässigkeit des Untergrundes, ausgedrückt als Variationskoeffizient sollte 40 bis 50 Prozent nicht überschreiten, weil sonst die örtlichen Tragfähigkeitsunterschiede zu gross werden. In diesen Fällen

Normalverteilung : Untergrundtragfähigkeit

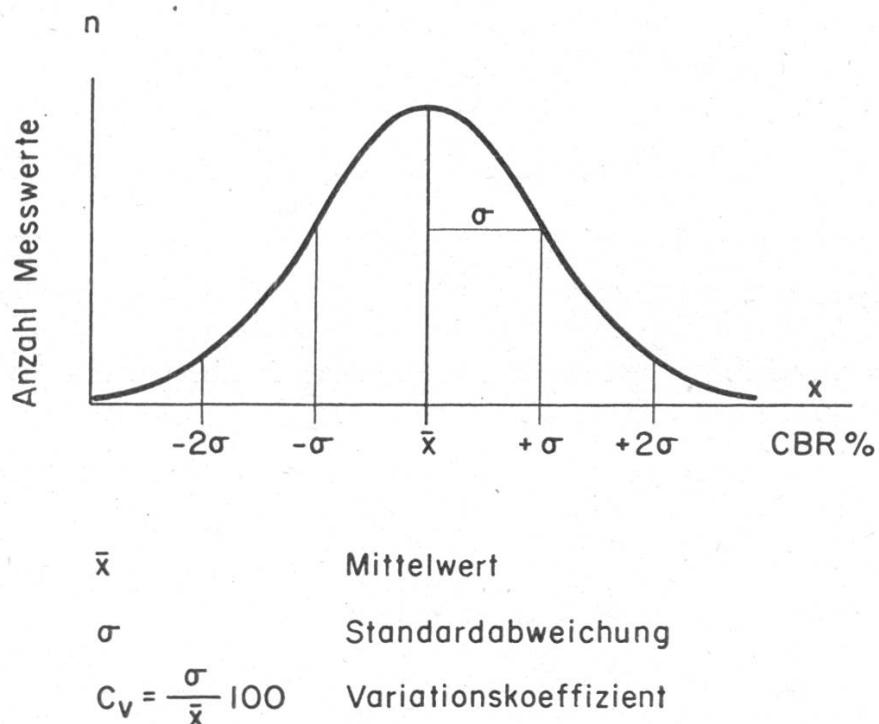


Abbildung 13

muss die Gleichmässigkeit durch Verdichtung, Stabilisierung oder Materialersatz verbessert werden. Die Untersuchung der Spannungen und Dehnungen an dünnen Strassenaufbauten zeigen nämlich, dass etwa 80 Prozent der Deflektion aus der Untergrundtragfähigkeit resultiert. Das bedeutet, dass sich die Ungleichmässigkeit des Untergrundes weitgehend auf den Strassenoberbau überträgt. Die Ungleichmässigkeit in der Tragfähigkeit beschleunigt jedoch die Abnahme der Befahrbarkeit der Strasse.

Aus diesem Grund erscheint es höchst lohnenswert, etwelchen Aufwand zur Erreichung einer möglichst gleichmässigen Untergrundtragfähigkeit zu betreiben.

Zur Messung oder Schätzung der Untergrundtragfähigkeit stehen die folgenden Möglichkeiten zur Verfügung:

Angenäherter Zusammenhang zwischen den Bodentragfähigkeitswerten und den Bodentypen

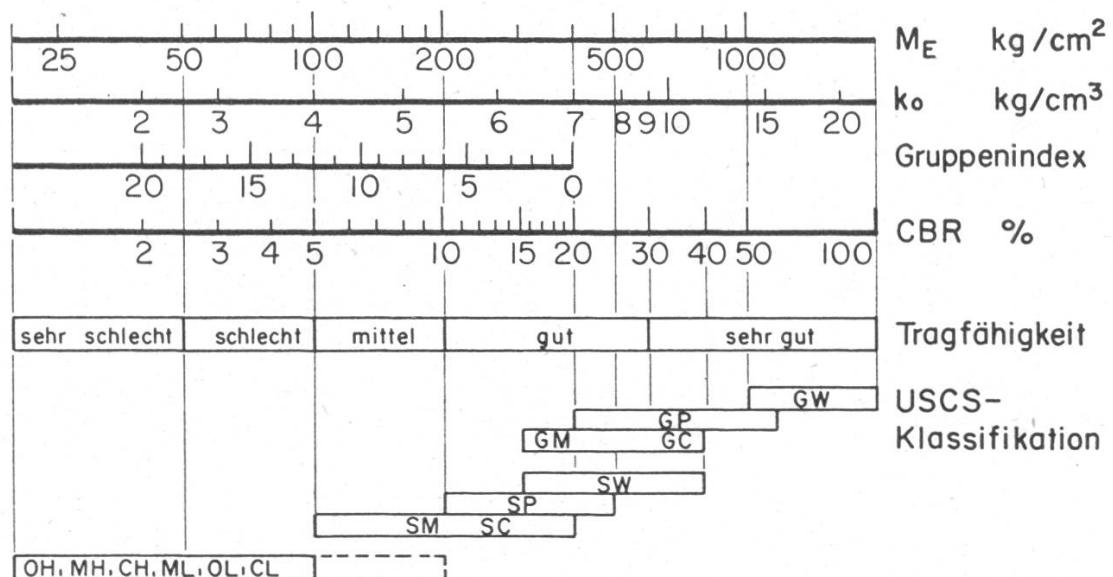


Abbildung 14

- direkte Messung des CBR-Wertes durch den Feld- oder Laborversuch (SNV-Norm 670 315 bzw. 670 320)
- direkte Messung des CBR-Wertes mit einem einfachen Handpenetrometer
- Messung des M_E -Wertes mit dem Plattengerät (SNV-Norm 673 317, SAFS-Merkblatt 413) und Umrechnung auf den CBR-Wert (Abbildung 14)
- Schätzung des CBR-Wertes auf Grund der Bodenklassifikation nach USCS, eventuell Gruppenindexmethode (Abbildung 14).

Die Messung des CBR-Wertes mit dem Handpenetrometer und die Schätzung des CBR-Wertes auf Grund einer eingehenden Bodenklassifika-

Bereich der Äquivalenzfaktoren

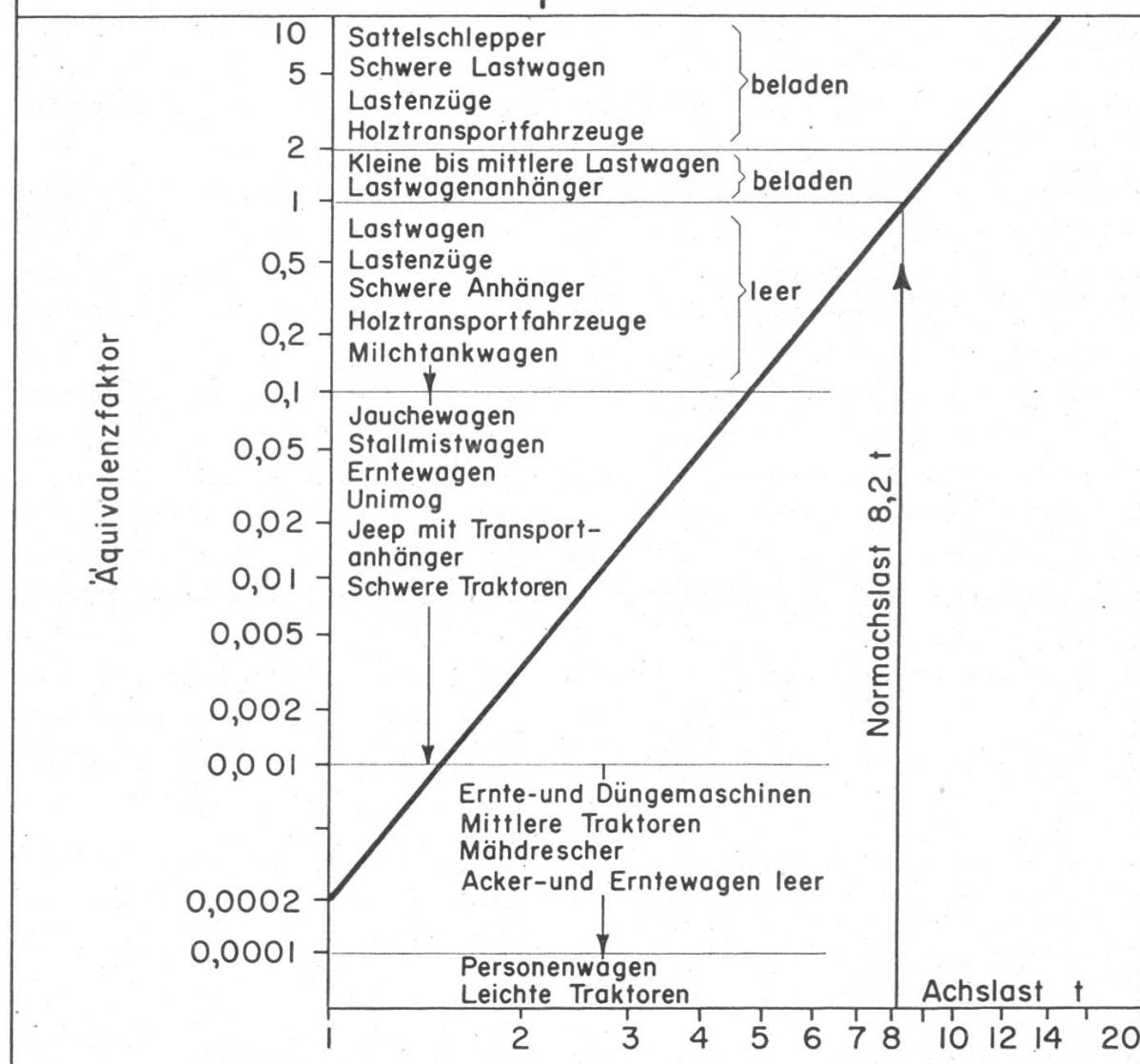


Abbildung 15

tion stellen für die Dimensionierung schwach beanspruchter Straßen in der Regel genügend genaue und rationelle Methoden dar.

5.2 Dimensionierungsverkehr

Nach dem AASHO-Konzept wird eine Straße für eine bestimmte Lebensdauer bzw. für eine bestimmte Zahl von Achslastübergängen dimensioniert. Nach Ablauf dieses Verkehrs muss die Befahrbarkeit der Straße durch eine Verstärkung verbessert werden.

Im grossen Straßenbau wird ein Dimensionierungszeitraum von 20 bis 25 Jahren angenommen, innerhalb welchem eine Verkehrsprognose aufgestellt werden kann und keine wesentlichen Änderungen der Bedeutung und Liniengröße der Straße und keine Veränderung der Fahrzeugcharakteri-

stiken zu erwarten sind. Für die schwach beanspruchten Straßen, insbesondere bei den Wald- und Güterstraßen sollte der Dimensionierungszeitraum länger gewählt werden, da die Zweckbestimmung, die technische Überalterung und die gebrauchsbedingte Abnutzung kleineren Änderungen unterworfen sind. Eine Bezugsperiode von 40 bis 50 Jahren erscheint für diese Straßen vernünftiger und zweckmässiger.

Aus den AASHO-Testgleichungen wurden die sogenannten Lastäquivalenzfaktoren abgeleitet (Abbildung 15). Die Schadenwirkung der verschiedenen schweren Achslasten wird auf die Normachslast von 8,2 t (18 kips) bezogen. Diese Achslast erhält den Faktor 1. Die Wirkung eines gemischten Verkehrs kann somit auf Normachslasten umgerechnet werden. Es zeigt sich die wesentliche Tatsache, dass die Schadenwirkung ungefähr in der vierten Potenz mit der Grösse der Achslast zunimmt. So bewirkt beispielsweise ein beladener Lastwagen etwa die gleiche strukturelle Zerstörung des Straßenaufbaus wie etwa 10 000 bis 20 000 Personenwagen. Die Äquivalenzfaktoren zeigen eindeutig, dass für die Dimensionierung vor allem die schweren Achsen massgebend sind, Personenwagen, Wagen und Maschinen für die Bewirtschaftung dagegen vernachlässigbar sind. Bei Lastwagen und Sattelschleppern ist besonders auf den günstigen Einfluss von Doppelachsen hinzuweisen, welche eine bessere Verteilung der Gesamtlast bewirken und deshalb kleinere Äquivalenzfaktoren pro Lastwagendurchgang ergeben (Abbildung 16).

Fahrzeugtyp	zulässiges Gesamtgewicht	Äquivalenzfaktor (beladen)
— Lastwagen		
2 Achsen	16 t	2,8
3 Achsen (1 angetrieben)	19 t	1,1
3 Achsen (2 angetrieben)	25 t	3,3
— Sattelschlepper		
ohne Doppelachse	28 t	7,2
mit Doppelachse	28 t	3,1

Abbildung 16
Äquivalenzfaktoren bei zulässigem Gesamtgewicht

Über die Art und Grösse des Verkehrs auf den schwach beanspruchten Straßen ist noch wenig bekannt. Bei reinen Erschliessungsstraßen bringt der Baustellenverkehr den grössten Anteil an die Verkehrsbelastung. Für Waldstraßen kann die Grösse dieser Baustellentransporte und der Holztransport auf Grund der Ausdehnung des erschlossenen Gebietes, der Nutzungsmenge

und der Charakteristiken der üblichen Transportfahrzeuge mit brauchbarer Genauigkeit berechnet werden. Ähnliches gilt für landwirtschaftliche Erschliessungsstrassen. Für Strassen mit Verbindungsfunction ist die Verkehrsprognose schwieriger.

Die Analyse der bereits vorliegenden Daten zeigt, dass für die verschiedenen Strassentypen Richtwerte für den Gesamtverkehr angenommen werden können, so dass ein Dimensionierungszeitraum von 30 bis 50 Jahren resultiert (Abbildung 17).

Strassentyp	Normalachslasten 8,2 t
Verbindungsstrassen	100 000 bis 150 000
Sammelstrassen	Forstwirtschaft 25 000 bis 50 000
	Landwirtschaft 10 000 bis 25 000
Erschliessungsstrassen	Forstwirtschaft 10 000 bis 25 000
	Landwirtschaft 10 000

Abbildung 17
Vorschlag für den Dimensionierungsverkehr

5.3 Umgebungsbedingungen (Regionalfaktor)

Die Umgebungsbedingungen (saisonale Schwankungen der Tragfähigkeit) werden durch die Einführung des Regionalfaktors berücksichtigt. Er ist eine umfassende Gewichtungsfunktion, indem durch eine Vergrösserung des Regionalfaktors eine Verstärkung des Oberbaus bewirkt wird. Der Regionalfaktor stellt die Summe aller saisonbedingten Gewichtungsfunktionen während eines Jahres dar, welche die Tragfähigkeitsänderungen einer Strasse erfassen. Diese tragfähigkeitsändernden Einflussfaktoren sind:

- die Länge der Frost-Tauperiode
- die Anzahl der Frost-Tauzyklen
- die Menge und Verteilung der Niederschläge
- die Temperaturverhältnisse
- die hydrologischen Voraussetzungen
- die Lage der Strasse im Gelände usw.

Diese Faktoren fallen bei den dünnen Aufbauten der schwach beanspruchten Strassen stärker ins Gewicht als bei den mächtigeren Schichtstärken der Hochleistungsstrassen. Eine umfassende Gewichtungsfunktion zur Charakterisierung der typischen Strassenzustände während eines Jahres stellt die Grösse der elastischen Deflektion dar. Sie wurde von Giudicetti (3) für

die Bestimmung der Regionalfaktoren für verschiedene Gebiete der Schweiz angewandt (Abbildung 18).

Region I	$R = 1,1$ bis $1,2$ Mittelland, Voralpen, Jura, Wallis, Graubünden 400 bis 700 m ü. M.
Region II	$R = 1,2$ bis $1,4$ Südtäler bis 1200 m ü. M., Jura bis 1000 m ü. M., einzelne Gebiete des Mittellandes: St. Gallen, Glarus
Region III	$R = 1,0$ Tessin bis 400 m ü. M.
Region IV	$R = 1,5$ bis $2,0$ übrige Regionen der Schweiz, insbesondere Gebiet der Alpen und Voralpen höher als 700 m ü. M.

nach Giudicetti (3)

Abbildung 18
Regionalfaktoren für verschiedene Gebiete der Schweiz

5.4 Tragfähigkeitskoeffizienten der gebräuchlichen Baustoffe

Der Stärkenindex SN gibt den empirischen Zusammenhang zwischen den Stärken der Aufbauschichten und den Eigenschaften der Materialien aus denen diese Schichten bestehen. Der Zusammenhang ist in der bereits bekannten Formel des Stärkenindexes angegeben:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3$$

Es steht uns weitgehend frei, die Stärken der einzelnen Schichten innerhalb des gegebenen Stärkenindexes zu variieren, sofern die konstruktiven Minimalstärken eingehalten werden.

Die Grösse der Tragfähigkeitskoeffizienten (a_1 , a_2 , a_3) ist von den Festigkeits- und Stabilitätseigenschaften der Materialien abhängig. Sie wurden für die AASHO-Materialien im Test bestimmt. Die Tragfähigkeitskoeffizienten weiterer Materialien ergaben sich aus Satellitversuchen und Laboruntersuchungen (Abbildung 19).

Auf Sekundär- und Tertiärstrassen fehlt zumeist der Belag ($a_1 \cdot D_1$) mit der vorgeschriebenen Minimalschichtstärke von 5 cm.

5.5 Dimensionierung gleichwertiger Varianten und Bestimmung des wirtschaftlichsten Aufbaus

Mit den vorliegenden Grundlagen ist nun die Dimensionierung schwach beanspruchter Strassen unter richtiger Berücksichtigung der Untergrundtragfähigkeit, des Verkehrs, der Umgebungsfaktoren und der Baustoffeigenschaften möglich.

Tragfähigkeitskoeffizienten

Schicht	Festigkeitsanforderung			
Belag D_1	min. 5cm		a_1	a_2
Belag hohe Stabilität	MS 900 kg	0,44	a_1	
Belag kleine Stabilität	MS 230-450 kg	0,20		
Sandasphalt	MS 450-500 kg	0,40		
Tragschicht D_2 min. 7,5cm				
HMT Sorte A	MS ≥ 250 kg	0,34		
HMT Sorte B	MS ≥ 450 kg	0,40		
Bituminöse Stabilisierung	MS ca. 200 kg	0,23		
Stabilisierung mit Zement	dc ₇ > 50 kg/cm ²	0,23		
do	dc ₇ 30-50 kg/cm ²	0,20		
do	dc ₇ < 30 kg/cm ²	0,15		
Foundationsschicht D_3				
Gebrochenes Material (Schotter)	CBR 105-110 %	0,14		
Kies-Sand I (bis ca. 45 cm Stärke)	CBR ≥ 80 %	0,11		
Kies-Sand II	CBR 20-30 %	0,07		
Stabilisierung mit Kalk		0,1-0,2		
Bezeichnungen: MS : Marshallstabilität				
dc ₇ : 7- Tage Druckfestigkeit				
CBR : Labor CBR %				

Abbildung 19

Der Bereich des Stärkenindexes für schwach beanspruchte Straßen mit einer Verkehrsbelastung zwischen 10 000 bis 100 000 Normachslasten und für eine Untergrundtragfähigkeit von etwa 0,8 bis 10 Prozent CBR liegt zwischen 3 und 9 (Abbildung 20). Für höhere Untergrundtragfähigkeitswerte ist die Verkleinerung des Stärkenindexes nur noch geringfügig.

Die Aufstellung vernünftig erscheinender Aufbauvarianten für einen gegebenen Stärkenindex erfolgt auf Grund der Zweckbestimmung der Straße (zum Beispiel erosionsfester Belag), der örtlich verfügbaren Materialien, der maschinentechnischen Voraussetzungen, der minimalen Einbaustärken usw. (Abbildung 21).

Aus den nach diesem Vorgehen dimensionierten, gleichwertigen Aufbauvarianten erfolgt die Auswahl nach dem Kriterium der minimalen Summe von Bau- und kapitalisierten Unterhaltskosten.

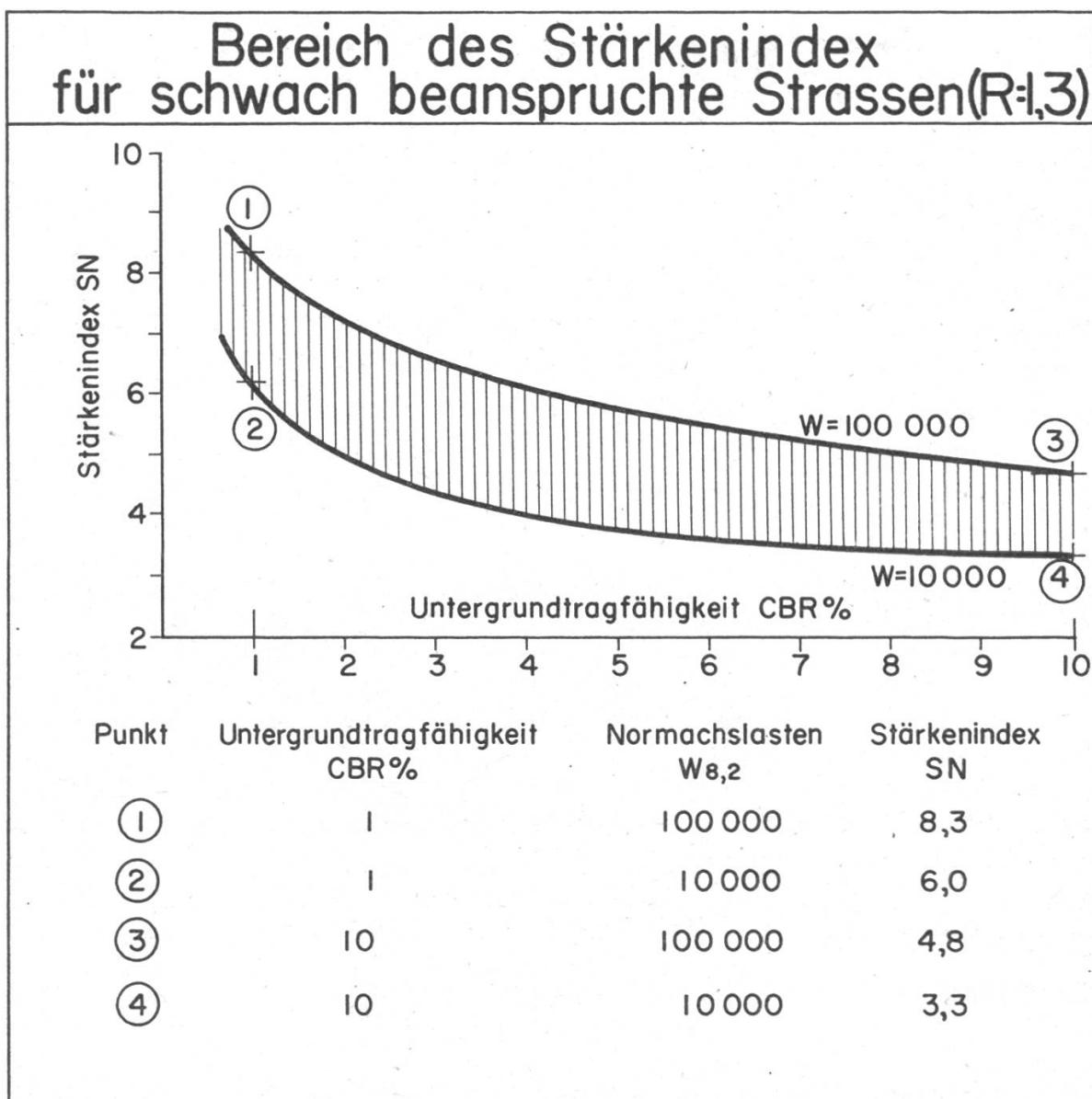


Abbildung 20

6. Die Verstärkung schwach beanspruchter Straßen

6.1 Einleitung

Hunderte von Kilometern schwach beanspruchter Straßen wurden bis in die fünfziger Jahre als Steinbettstraßen für leichten Fuhrwerkverkehr erstellt. Diese Straßen weisen durchweg den gleichen, schwachen Aufbau auf (Abbildung 22).

Diese Straßen erfuhrten in jüngster Zeit einen stark erhöhten Verkehr mit Schwerachslasten durch die veränderten Transportfahrzeuge und durch den Weiterbau der Strassennetze. Für diese Beanspruchungen sind diese Straßen aber nicht dimensioniert. Sie werden sehr schnell vollständig zerstört oder verursachen einen unverantwortbaren Unterhaltsaufwand zur Auf-

Beispiel einer Dimensionierung

Funktion der Strasse	:	Verbindungsstrasse
Dimensionierungsverkehr	:	100 000 Normachslasten
Untergrundtragfähigkeit	:	CBR = 2 %
Regionalfaktor	:	1,5

Stärkenindex nach AASHO: SN = 7,3

Gleichwertige Aufbauten

		Schicht- stärke	a-Wert	Stärkenindex SN
Flexbelag		5 cm	—	—
Kies I		50 cm	· 0,11	= 5,5
Kies II		25 cm	· 0,07	= 1,8
		80 cm		7,3
Flexbelag		5 cm	—	—
Kies I		45 cm	· 0,11	= 5,0
Kalkstabilisierung		15 cm	· 0,15	= 2,2
		65 cm		7,2
		Schicht- stärke	a-Wert	Stärkenindex SN
HMT A		7 cm	· 0,34	= 2,4
Kies I		25 cm	· 0,11	= 2,7
Kalkstabilisierung		15 cm	· 0,15	= 2,2
		47 cm		7,3
bit. Stabilisierung		12 cm	· 0,23	= 2,8
Kies I		20 cm	· 0,11	= 2,2
Kalkstabilisierung		15 cm	· 0,15	= 2,2
		47 cm		7,2
Flexbelag		5 cm	—	—
Zementstab.		15 cm	· 0,20	= 3,0
Kies I		20 cm	· 0,11	= 2,2
Kalkstabilisierung		15 cm	· 0,15	= 2,2
		55 cm		7,4

Abbildung 21

Aufbau und Tragfähigkeit alter Strassen

	Schicht- stärke	a	SN
Kies, oft mit siltigen und tonigen Feinanteilen	15-20 cm	0,11	$1,6-2,0$
Steinbett	15-25 cm	0,07	$1,0-1,7$
	30-45		$2,6-3,7$
Untergrund- tragfähigkeit		Anzahl Norm- achslasten	Anzahl Lastwagen- durchgänge (beladen)
CBR%		W _{8,2}	W
1	< 1000		< 300
3	5000		1500
5	10000		3500
7	15000		5000

Abbildung 22

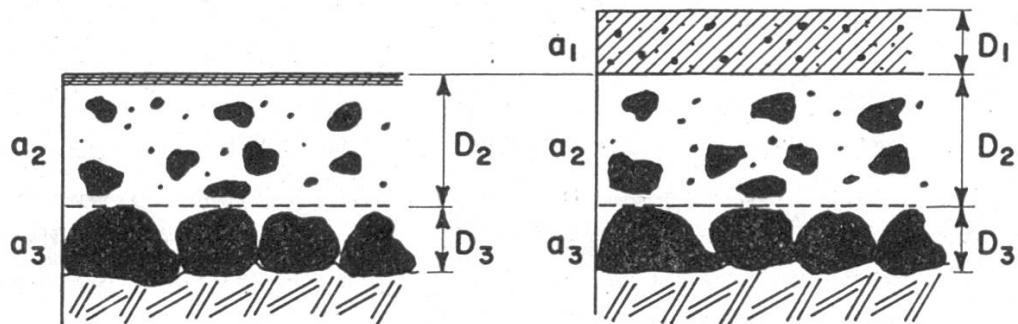
rechterhaltung einer genügenden Befahrbarkeit. Die Zunahme des Verkehrs wirkt sich um so verhängnisvoller aus, je schlechter die Untergrundtragfähigkeit ist. Für einen mittleren Stärkenindex dieser Strassen von etwa 3,0 ergibt sich bei schlechtem Untergrund nur eine kleine Zahl möglicher Achslastwechsel (Abbildung 22).

Die bestehende Ratlosigkeit bei der Bestimmung der Art und Grösse der Verstärkung für schwach beanspruchte Strassen kann durch die Anwendung der AASHO-Testergebnisse gelöst werden. Wir haben dazu ein Verfahren ausgearbeitet, welches die Bestimmung der Verstärkung nach zwei verschiedenen Methoden ermöglicht.

Verstärkung einer Strasse nach AASHO

alte Strasse

Verstärkung: $\Delta SN = a_1 D_1$



$$SN_0 = a_2 D_2 + a_3 D_3$$

$$SN_1 = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

SN_0 = Stärkenindex des vorhandenen Aufbaus

SN_1 = Stärkenindex des Sollaufbaus

Abbildung 23

6.2 Bestimmung der notwendigen Verstärkung nach AASHO (Tragfähigkeitskriterium)

Die zu verstärkende Strasse wird bei dieser Methode wie ein Neubau behandelt, indem sie auf Grund der Bodentragfähigkeit und der Umgebungsbedingungen auf eine bestimmte Verkehrsbelastung (Lebensdauer) nach dem AASHO-Diagramm dimensioniert wird. Der so bestimmte Stärkenindex ergibt den Sollaufbau. Dann wird der Stärkenindex des bestehenden Aufbaus bestimmt, wobei die vorhandenen Schichtstärken und Materialien entsprechend ihrer Tragfähigkeit berücksichtigt werden. Die Differenz zwischen dem Stärkenindex des Sollaufbaus und demjenigen des vorhandenen Aufbaus ergibt den Stärkenindex für die notwendige Verstärkung (Abbildung 23). Die Tragfähigkeitskoeffizienten (a -Werte) für die Schichten eines bestehenden Aufbaus (Steinbett, siltige Kiese, alte bituminöse Schichten)

sind nicht genau bekannt. Es können aber in erster Näherung die Tragfähigkeitskoeffizienten der Baustoffe wie für neu erstellte Straßen eingesetzt werden.

Die Bestimmung der Untergrundtragfähigkeit (CBR-, M_E -Wert), die Bestimmung der Schichtstärken des vorhandenen Aufbaus, sowie die Entnahme von Proben der Oberbaumaterialien erfolgen durch systematisch angelegte Sondierschlitz quer zur Straßenachse. Bei Anordnung einer ausreichenden Zahl derartiger Querprofilaufnahmen können die Messwerte statistisch behandelt werden (Mittelwert, Streuung, Variationskoeffizient).

6.3 Bestimmung der notwendigen Verstärkung auf Grund der Deflektion (Deformationskriterium)

Der AASHO-Test hat gezeigt, dass die Grösse der elastischen Deflektion ein Mass für die Tragfähigkeit und Lebensdauer der Straße ist. Für einen Straßenbau, welcher auf eine bestimmte Anzahl Lastdurchgänge dimensioniert ist, ergibt sich somit eine maximale zulässige Deflektion. Wird diese wesentlich überschritten, so ist die Lebensdauer der Straße kürzer. Die zulässige Deflektion ist abhängig von der Untergrundtragfähigkeit, der Aufbaustärke und der Verkehrsbelastung. Für schwach beanspruchte Straßen gelten die Werte gemäss Abbildung 24.

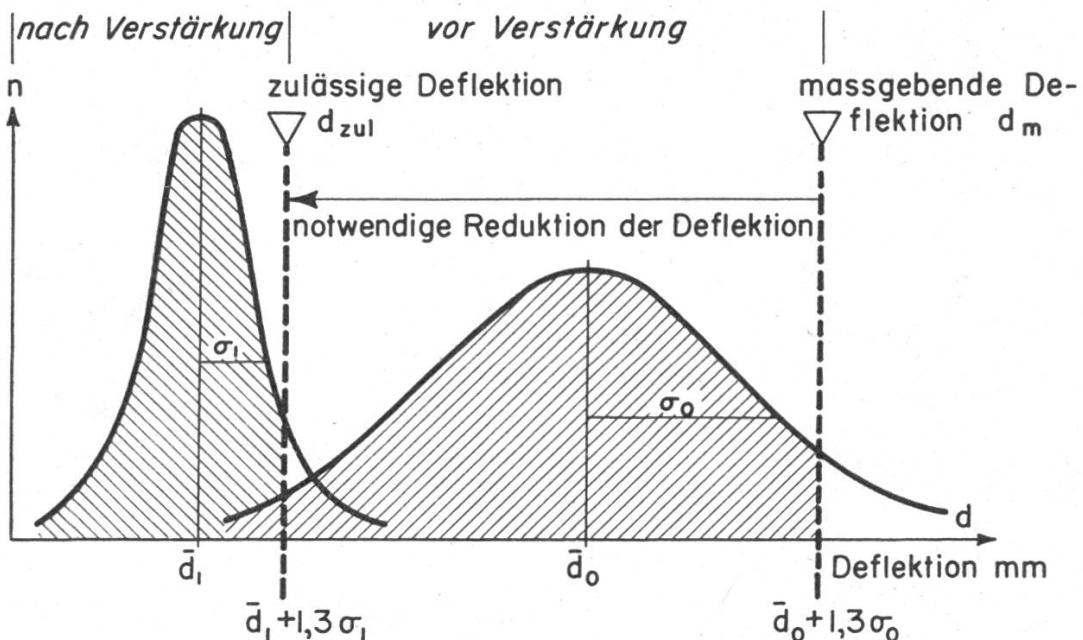
Normachslasten	Zulässige Deflektion d_{zul} (provisorisch)	
	Sommer/Herbst	Frühjahr
100 000	1,5 mm	2,0 mm
> 100 000	2,0 mm	2,5 mm
10 000	2,5 mm	3,0 mm

Abbildung 24
Zulässige Deflektionswerte unter 5-t-Zwillingsrad

Die Deflektionsmessung auf der bestehenden Straße erfolgt mit dem Benkelman-Balken. Die Messstellen werden in systematischer Verteilung, zum Beispiel alle 25 bis 50 m abwechslungsweise in beiden Radspuren angeordnet. Die grosse Zahl der Messwerte (pro Tag 100 bis 150 Messungen) ermöglicht eine statistische Auswertung. Die Messwerte sind für einen gleichartig aufgebauten, homogenen Abschnitt annähernd normal verteilt (Abbildung 25) und können durch den Mittelwert und die Standardabweichung charakterisiert werden. Die massgebende Deflektion d_m als statistische Grenze, unterhalb welcher nach der Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Prozentsatz aller Messwerte liegen, kann frei gewählt werden. Als ausreichend erscheint eine 85- bis 95-Prozent-Grenze zu sein ($d_m = \bar{d}_o + \sigma_o$ bis $\bar{d}_o + 1,65 \cdot \sigma_o$) (Abbildung 26).

Verstärkung einer Strasse auf Grund der Deflektion

$$\text{Forderung: } \bar{d}_1 + x \cdot \sigma_1 \leq d_{zul}$$



Bezeichnungen:

- n Anzahl Messwerte
- \bar{d} Mittelwert der Deflektion
- σ Standardabweichung
- d_m massgebende Deflektion
- d_{zul} zulässige Deflektion

- \bar{d}_0, σ_0 vor der Verstärkung
- \bar{d}_1, σ_1 nach der Verstärkung

Abbildung 25

Massgebende Deflektion $d_m = \bar{d} + x \cdot \sigma$	Strassenfläche mit $d < d_m (\%)$
$d_m = \bar{d}$	50
$d_m = \bar{d} + \sigma$	85
$d_m = \bar{d} + 1,3 \cdot \sigma$	90
$d_m = \bar{d} + 1,65 \cdot \sigma$	95
$d_m = \bar{d} + 2 \cdot \sigma$	98
$d_m = \bar{d} + 3 \cdot \sigma$	99,9

Abbildung 26

Wahl der massgebenden Deflektion zur Bestimmung der notwendigen Reduktion

Schichtstärken zur Reduktion der Deflektion

(provisorisch)

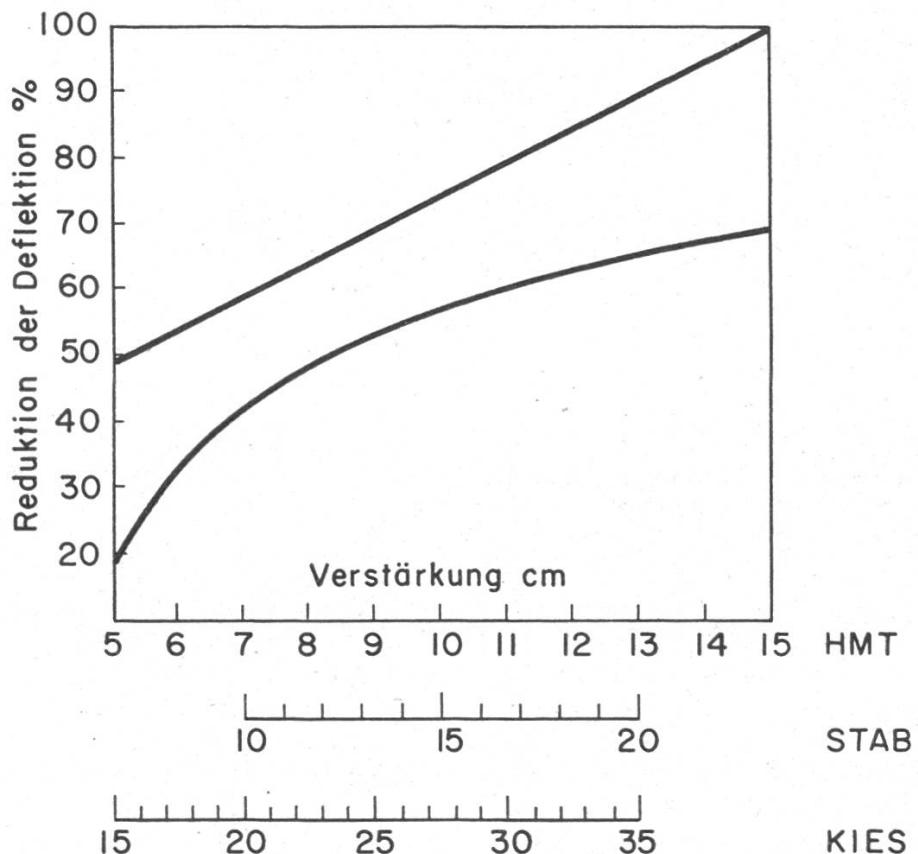


Abbildung 27

Es ist nun jene Schichtstärke zu bestimmen, welche die vorhandene massgebende Deflektion auf den zulässigen Wert verkleinert. Auf Grund der errechneten prozentualen Reduktion, die notwendig ist, kann mit bereits vorhandenen Richtwerten auf die Schichtstärke für die Verstärkung geschlossen werden (Abbildung 27).

Die Wahl der Baustoffe der Verstärkungsschicht ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie Erosionsfestigkeit der Oberfläche, mögliche Anpassungsarbeiten, technische Voraussetzungen, Wirtschaftlichkeit usw.

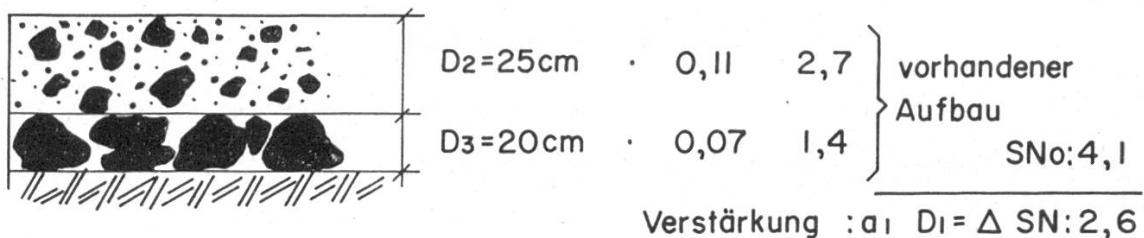
Ein Beispiel der Verstärkung nach den beiden Methoden zeigen die Abbildungen 28a und 28b.

Beispiel einer Verstärkung

I. AASHO-Methode

Untergrundtragfähigkeit: CBR = 2,8 % Dimensionierungsverkehr: 100 000 Normachslasten Regionalfaktor : 1,5 Sollaufbau (nach Diagramm) SNL: 6,7

vorhandener Aufbau: Schichtstärke g Wert SN



Verstärkungsvarianten

Art	Schichtstärke	α -Wert	Δ SN
Kies - Sand I	25 cm	0,11	2,7
HMT A	8 cm	0,34	2,7
Bit. Stabilisierung	12 cm	0,23	2,8

Abbildung 28a

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung der AASHO-Ergebnisse erlaubt eine technisch angepasste Dimensionierung und Verstärkung der schwach beanspruchten Straßen auf Grund der Bodenträgfähigkeit, der Verkehrsbelastung, der Umgebungsbedingungen und der Eigenschaften der Baustoffe. Die besprochenen Methoden erfüllen eine wichtige Forderung der Praxis, nämlich die der leichten Anwendbarkeit und Benutzbarkeit. Es sind nur wenige technische Hilfsmittel notwendig, um die notwendigen Messungen vorzunehmen. Die Methoden setzen aber Erfahrung und Sicherheit im Erkennen und Beurteilen der bodenmechanischen Eigenschaften der Böden und Baustoffe voraus.

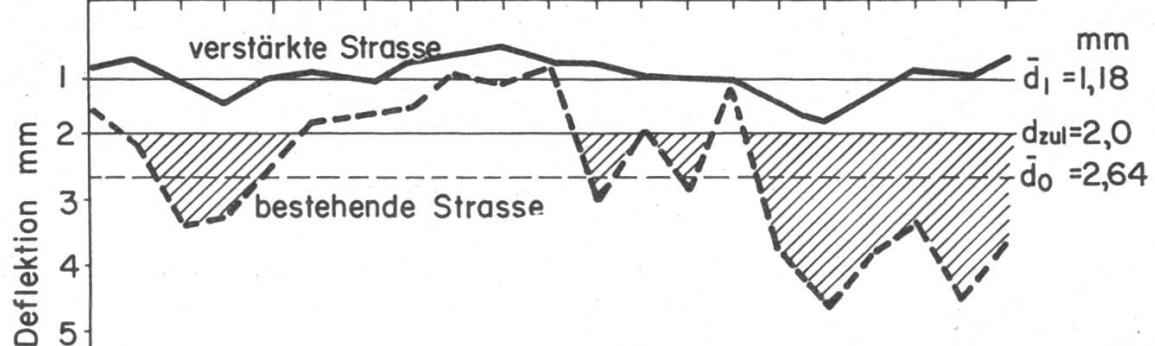
Beispiel einer Verstärkung

2. Deflektionsmethode

Messungen auf der bestehenden Strasse

Hektometrierung

0 100 200 300 400 500



Bestehende Strasse:

Mittelwert	$d_0 = 2,6 \text{ mm}$	zulässige Deflektion
Standardabweichung	$\sigma_0 = 1,2 \text{ mm}$	$d_{zul} = 2,0 \text{ mm}$
massgebende Deflektion (90%)	$d_m = 4,2 \text{ mm}$	notwendige Reduktion: 52 %

Verstärkungsvarianten: 7 - 8 cm HMT
10 - 12 cm bit. Stabilisierung
20 - 25 cm Kies-Sand

Verstärkte Strasse: 12 cm Teerstabilisierung

Mittelwert	$d_1 = 1,2 \text{ mm}$
Standardabweichung	$\sigma_1 = 0,3 \text{ mm}$
90 % Grenze	$(d_1 + 1,3\sigma_1) = 1,6 \text{ mm}$

Abbildung 28b

An einer weiteren Vereinfachung wird gearbeitet, indem für bestimmte mittlere Bodenträgfähigkeitswerte Normaufbauten aufgestellt werden, welche den besonderen Verhältnissen der schwach beanspruchten Straßen Rechnung tragen.

Noch sind für die besprochenen Methoden verschiedene Grundlagen nicht genügend abgeklärt, so zum Beispiel Dimensionierungsverkehr, Tragfähigkeitsfaktoren für nicht den Normen entsprechende Materialien, Einfluss der Umgebungsbedingungen, Einfluss des Baustellenverkehrs, minimaler Befahrbarkeitswert, Reduktionswirkung der Verstärkung usw. Die gute Zusammenarbeit mit der Praxis ermöglicht die weitere Forschung zur Erfassung der fehlenden Einflussfaktoren.

Résumé

Dimensionnement et renforcement des routes à faible circulation

L'« AASHO-Road-Test » a été réalisé de 1958 à 1960 aux USA et donna d'intéressants résultats pour le dimensionnement et le renforcement des routes. Une indication essentielle de ces essais fut le fait que la superstructure des routes possède seulement une certaine durée d'utilisation, c'est-à-dire, ne peut supporter qu'un trafic (exprimé en essieux étalons) limité. Par ce test, la qualité de la route peut être mesurée objectivement et caractérisée par l'indice de viabilité. Par l'« AASHO-Test » il a été établi une relation fonctionnelle entre la superstructure (exprimée par le facteur de structure), le nombre et la grandeur des charges essieux, et la durée d'utilisation de la route. Les routes subissent par le trafic un vieillissement croissant et la viabilité descend avec le temps au-dessous d'une valeur admissible. La viabilité doit alors être améliorée par un renforcement.

Par l'extrapolation des résultats de l'« AASHO-Road-Test » un diagramme de dimensionnement des routes peut être établi avec les paramètres suivants : la portance du terrain, le trafic et les facteurs régionaux. Par des adaptations et des simplifications adéquates, cette méthode de dimensionnement peut être aussi appliquée à des routes à faible circulation. Ainsi il est possible de dimensionner plusieurs variantes de superstructures équivalentes.

Les deux méthodes pour déterminer le renforcement des routes existantes se fondent également sur les résultats de l'« AASHO-Road-Test ». La première méthode traite la route comme une construction nouvelle et détermine, en tenant compte de la superstructure actuelle, le facteur de structure qui fait défaut. La deuxième méthode se base sur les mesures de déflexion ; on détermine l'épaisseur de la couche nécessaire pour réduire la déflexion existante à une valeur admissible.

Les méthodes de dimensionnement et de renforcement des routes sont fondées scientifiquement et permettent d'évaluer la structure la plus économique.

Trad.: E. Burlet

Literaturverzeichnis

- (1) *Highway Research Board: The AASHO-Road-Test. Special Reports Nr. 61 A—61 F, 1961—62*
- (2) *Highway Research Board: The AASHO-Road-Test. Special Report Nr. 73. Proceedings of a Conference, St. Louis 1962*
- (3) *Giudicetti, F.: Experimentelle Untersuchung des jahreszeitlichen Tragfähigkeitsverlaufes des Untergrundes und der Fundationsschicht für die Strassendimensionierung (Diss. ETH, in Vorbereitung)*