Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 101 (1983)

Heft: 46

Artikel: Harnstoffharz zur Bodenverfestigung nach dem Oberflächenverfahren: Nachweis der Brauchbarkeit

Autor: Makowski, Jerzy / Rafalski, Leszek / Starzyska, Krystyna

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75232

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: 07.08.2025

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

Aufbereitung von gebrochenem Gestein vermehrt auch hinsichtlich ihrer Gleichmässigkeit kontrolliert werden. Die zulässige Gesamtmenge an Feinkorn < 0,2 mm im Beton sollte überprüft und unter Umständen erhöht werden. Die *Baukontrolle* mittels der Festigkeitsprüfungen, aber auch am Frischbeton (*W/Z*-Wert, Konsistenz, Luftporengehalt) sollte ebenfalls analog dem hochwertigen Bauwerksbeton statistisch erfolgen und ausgewertet werden.

Die Qualitätskriterien und Anforderungen gemäss den SN-Normen und der SIA-Norm sowohl für Belags- wie auch für Bauwerksbeton müssten *im Sinne einer Vereinheitlichung* allgemein überprüft werden, um Wiederholungen zu vermeiden und um Übereinstimmung zu erzielen, z.B. hinsichtlich der Kornform des Grobkornes, rund und gebrochen, des Anteiles an petrographischen ungeeigneten Bestandteilen, an schädlichen Beimengungen usw. Eine bisher fehlende, qualitative und quantitative Übereinstimmung der Kontrolle eines Betonbelages mit den Normen des bituminösen Belagsbaus müsste ebenfalls angestrebt werden. Die Eignungsprüfungen und die Qualitätskontrolle sollten deutlich in 4 Stufen erfolgen und vorgeschrieben werden: Gestein, Einzelfraktion, Zuschlagsgemisch, Betongemisch.

Dem *Einsatz eines Gleitschalungsfertigers* zum Einbau eines einschichtigen, einlagigen und unarmierten Belages steht auch für einen Beton mit 100% gebrochenem Zuschlag nichts entgegen. Mit dieser Baumethode können auch in einem Tunnel bedeutende Einsparungen erzielt werden, wie dies am Beispiel Giessbach erstmals nachgewiesen wurde. Besondere Beachtung gilt dabei den Ebenheitsanforderungen.

Normen erweitern

Zusammenfassend ist auf Grund der Erfahrungen beim Bau dieser Nationalstrassenabschnitte festzustellen, dass die *bestehenden Normen bzw. Qualitätskriterien* und Anforderungen bezüglich der Verwendbarkeit im Strassenbau und für Bauwerke von 100% gebrochenem Gestein teilweise relativ nützlich, mehrheitlich aber unzureichend sind. Es muss demzufolge Aufgabe einer optimalen, die örtlichen Randbedingungen berücksichtigenden Materialtechnologie sein, die Normen und Richtlinien, soweit vorhanden, zu interpretieren, zu ergänzen und anzupassen sowie neue Kriterien zu entwickeln, um dem für jeden Bauingenieur geltenden Gebot einer *übergeordneten, möglichst grossen Wirtschaftlichkeit* bei gleichzeitiger Gewährleistung der erwünschten Qualität der Strasse und des Bauwerkes zu folgen. Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wären nachzuholen und relativ dringlich; dies im Sinne von angewandten, auf den Bedarf der Praxis ausgerichteten Untersuchungen.

Adresse der Verfasser: *U. Kunz*, Dr. *F. Giudicetti*, *K. Jenk*, dipl. Bauingenieure ETH, Autobahnamt des Kantons Bern, Schermenweg 5, 3014 Bern.

Harnstoffharz zur Bodenverfestigung nach dem Oberflächenverfahren

Nachweis der Brauchbarkeit

Von Jerzy Makowski, Leszek Rafalski und Krystyna Starzynska, Warschau

Einleitung

Manchmal ist es erforderlich, die Oberfläche des Bodens zu verfestigen, um eine *elastische Verteilung der durch äussere Belastung erzeugten Spannungen* zu erhalten. Ein Verfahren dazu besteht in der Vergrösserung der Bodentragfähigkeit mit verschiedenen Bindemitteln. In Polen wurden ausser den herkömmlichen Verfahren der Bodenverfestigung mit Zement, Kalk oder Silikat auch Erfahrungen in der *Bodenstabilisierung mit Harnstoffharzen* gewonnen. Aufgrund einer Reihe von *Forschungsarbeiten* wurde die Brauchbarkeit der Harnstoffharze zur Oberflächen- und Injektionsbodenverfestigung nachgewiesen.

Die Harnstoffharze sind *makromolekulare* Materialien, welche durch Reaktion von Harnstoff mit Formaldehyd gebildet werden. Zur Oberflächenbodenverfestigung sind die chemisch härtbaren Harze geeignet. Zur Härtung von Harnstoffharzen werden meistens freie Säuren wie Salz- und Oxalsäure sowie Ammoniumsalze starker Säuren wie Ammoniumphosphat und Ammoniumchlorid verwendet.

Die bisherigen Forschungen betrafen die *flüssigen Harnstoffharze*, insbesondere weil diese Harze in Polen produziert werden. Die bisher durchgeführten Forschungsarbeiten ermöglichten die Bestimmung der Bodenarten, die zur Oberflächen- und Injektionsstabilisierung geeignet sind sowie die Bestimmung der Eigenschaften der erhaltenen Harzböden. Die zur Oberflächenstabilisierung mit flüssigen Harnstoffharzen *geeigneten Böden* sind in Bild 1 angegeben.

Die Schlussfolgerungen aus den Arbeiten, die in *bisherigen Veröffentlichungen* der Verfasser dieser Arbeit angegeben wurden, beweisen, dass zur Oberflächenstabilisierung von Böden die *flüssigen* Harnstoffharze mit einem hohen Gehalt an Festsubstanz oder die *pulverförmigen* Harnstoffharze in Pulverform am geeignetsten sind. Solche Harztypen ermöglichen es, verhältnis-

Bild 1. Bereich der Böden, die zur Stabilisierung mit flüssigen Harnstoffharzen geeignet sind.

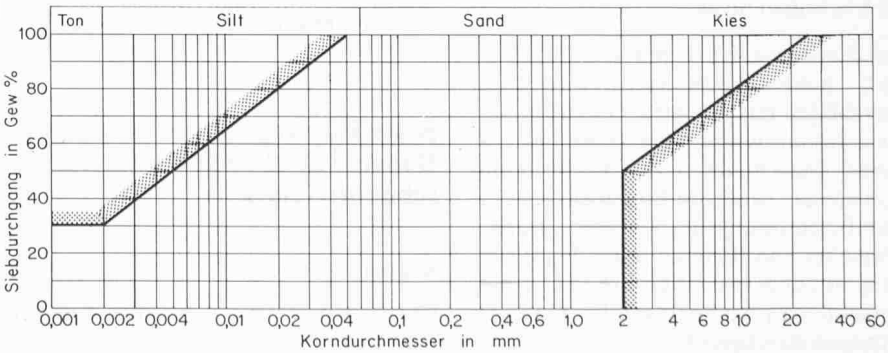


Tabelle 1. Eigenschaften der in den Untersuchungen verwendeten Böden

Eigenschaft		Ergebnis der Untersuchung					
		1	2	3	4	5	6
Gehalt an							
Kiesfraktion	[%]	1	-	1	2	-	-
Sandfraktion	[%]	96	86	63	67	18	2
Siltfraktion	[%]	3	14	33	21	58	52
Tonfraktion	[%]	-	-	3	10	24	46
Bodenart		Mittelsand	Siltiger Sand	leicht toniger Silt	Silt bis toniger Silt	toniger Silt	Ton
Plastizitätsindex	[%]	-	-	13,9	13,4	17,4	29,3
Fliessgrenze	[%]	-	-	23,3	20,1	38,6	62,0
Karbonatgehalt	[%]	-	-	1,2	1,9	-	-
pH-Wert		6,2	7,0	7,0	7,4	7,1	6,8
USCS-Klassifikation		SP	SM	CL	CL-ML	CL	CH

mässig hohe Harzkonzentrationen im Harzbodengemisch zu erhalten, wobei gleichzeitig eine einfache Regelung der Feuchtigkeit des Gemisches möglich ist, was eine hohe Qualität der Harzböden gewährleistet.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Kenntnisse über die *Bodenstabilisierung mit pulverförmigen Harnstoffharzen* zu vergrössern. In den durchgeführten Forschungsarbeiten wurde das pulverförmige Harnstoffharz Aerolite FFD schweizerischer Herkunft verwendet. Der Nachweis der Brauchbarkeit dieses Harzes zur Bodenstabilisierung wurde aufgrund von Laboruntersuchungen ermittelt. Die Laboruntersuchungen umfassten *auch vergleichende Experimente* mit den polnischen, flüssigen Harzen K-116, 70-SG und 70-SG4.

Untersuchungsmethodik

Untersuchungen mit flüssigen Harzen haben gezeigt, dass die *Kornverteilung* des zu stabilisierenden Bodens innerhalb des in Bild 1 angegebenen Bereiches liegen und der *Karbonatgehalt* weniger als 5% und der pH-Wert weniger als 8 betragen muss.

Im Zusammenhang mit der Möglichkeit, hohe Harzkonzentrationen in Harzböden mit pulverförmigen Harzen zu erhalten, wurde eine *Hypothese für deren Brauchbarkeit* zur Verfestigung von nassen, bindigen Böden aufgestellt. Zur Bestimmung des Kornverteilungsbereiches von Böden, die zur Stabilisierung mit dem Harz Aerolite FFD geeignet sind, wurden de folgenden Untersuchungen durchgeführt:

1. Nachprüfung der *Festigkeit von nicht bindigen Böden,* die mit diesem Harz verfestigt wurden, sowie der Möglichkeit der Verwendung dieses Harzes zur Herstellung von Harzboden-Polystyrolschaum-Gemischen.
2. Bestimmung der *Festigkeits- und Frostbeständigkeitseigenschaften von bindigen Böden* mit einem Liquiditätsindex von I_L = 0–1,0, die mit trockenem Harz in Pulverform verfestigt wurden.

Es werden folgende Bezeichnungen verwendet:

I_L = Liquiditätsindex des Bodens
c_w = Gewichtsanteil des Harzes im Verhältnis zum Trockengewicht des Bodens, in %
c_o = Volumenanteil des Harzes im Verhältnis zum Trockengewicht des Bodens, in %
u = Gewichtsanteil des Härters im Verhältnis zum Gesamtgewicht des Harzes und des Wassers im Gemisch
s = Volumenanteil des Polystyrolschaumes im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Bodens und des Polystyrolschaumes
w = Feuchtigkeitsgehalt des Gemisches

Die Eigenschaften der in den Untersuchungen verwendeten Böden sind in Tabelle 1 angegeben.

Stabilisierung von nichtbindigen Böden. Harzboden-Polystyrolschaum-Gemische

Bedingungen

Die Untersuchungen wurden *mit Mittelsand und siltigem Sand* durchgeführt.

Tabelle 2. Optimale Feuchtigkeit des Mittelsandes und des siltigen Sandes mit der Zugabe der Harze 70-SG und Aerolite FFD

Harzzugabe c_w [%]	Harz 70-SG1		Harz Aerolite FFD	
	Mittelsand	Siltiger Sand	Mittelsand	Siltiger Sand
0	12,8	14,6	12,8	14,6
3	7,8	11,0	7,6	11,3
6	4,8	8,6	5,0	9,0
9	4,5	6,6	4,7	7,0

Zur Harzhärtung wurde *Ammoniumchlorid* verwendet. Die *Harzboden-Polystyrolschaum-Gemische* wurden unter Anwendung von Polystyrolschaum durchgeführt, der in den Kunststoffwerken von *Sochaczew* produziert und unter Laborbedingungen verschäumt wurde.

Die Untersuchungen umfassten *folgende Bestimmungen:*

- *optimale Feuchtigkeit* der Harzboden-Gemische mit den Harzen 70-SG1 und Aerolite FFD bei einer Bodenverdichtungsenergie von 600 J/dm³,
- *Druckfestigkeit* von Prüfkörpern mit den Abmessungen: ∅ = h = 8 cm aus Mittelsand und siltigem Sand, mit Harz Aerolite FFD stabilisiert,
- *Druckfestigkeit* von Prüfkörpern mit den Abmessungen: ∅ = h = 8 cm aus *Gemischen* von Mittelsand mit Polystyrolschaum, mit Harz Aerolite FFD verfestigt,
- *Frostbeständigkeit* von Harzböden und Harzboden-Polystyrolschaum-Gemischen nach 14 Frostauftauzyklen bei Temperaturen von −20 °C bis +20 °C.

Optimale Feuchtigkeit

Die gemessenen *optimalen Feuchtigkeiten* von Harzboden-Gemischen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich feststellen, dass die optimale Feuchtigkeit der nichtbindigen Böden mit einer Zugabe von 3–9% Trockensubstanz des Harzes für flüssiges und trockenes Harz in derselben Grössenordnung verringert wird. Eine Ursache der Verringerung der optimalen Feuchtigkeit unter dem Einfluss der Harzzugabe liegt in der Füllung der Poren mit Trockensubstanz des Harzes. Infolge Verkleinerung des Eigenreibungswinkels werden zudem die Einzelkörner dichter gelagert.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Feuchtigkeit von nichtbindigen Böden unter Zugabe von Harzen (Aerolite FFD, K-116, 70-SG und 70-SG1) kön-

nen die folgenden statistischen Beziehungen angegeben werden.

Die Beziehungen zwischen dem massgebenden Durchmesser d_e des Bodens und der prozentualen Verringerung r der optimalen Feuchtigkeit für 3, 6 und 9% Trockensubstanz des Harzes sind in Bild 2 angegeben. Der massgebende Durchmesser des Bodens wird aus folgender Formel berechnet:

$$d_e = \frac{100}{\frac{a_1}{d_1} + \frac{a_2}{d_2} + \dots \frac{a_n}{d_n}} \text{ [mm]}$$

wo:

$a_1, a_2, \dots a_n$ = Anteil der Kornfraktion in %

$d_1, d_2, \dots d_n$ = arithmetische Mittel der Korndurchmesser

Die prozentuale Verringerung der optimalen Feuchtigkeit des Gemisches ist wie folgt definiert:

$$r = \frac{w_{opt}\ (\text{Gemisch}) \times 100}{w_{opt}\ (\text{Boden})} \text{ [\%]}$$

wobei:

w_{opt} (Gemisch) = optimale Feuchtigkeit des Harzboden-Gemisches

w_{opt} (Boden) = optimale Feuchtigkeit des Bodens

Druckfestigkeit

Der Einfluss des Härters *Ammoniumchlorid* auf die Festigkeit der Prüfkörper aus Harzboden und Harzboden-Polystyrolschaum ist in Bild 3 angegeben. Die Gemische wurden aus Mittelsand, pulverförmigem Harz und Polystyrolschaum «Sochaczew» hergestellt. Der Gehalt an Harz in den Gemischen betrug 10,6 Vol.-% und der Volumenanteil des Polystyrolschaumes s = 0–0,75. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate approximiert.

Wie aus den Untersuchungen folgt, wiesen die Prüfkörper aus Harzboden nach 7 Tagen eine *Druckfestigkeit* von $R_S^7 \cong 4{,}0$ MPa auf. Eine ähnliche Festigkeit hatten die Harzboden-Polystyrolschaum-Prüflinge mit einem Gehalt an Polystyrolschaum unter $s = 0{,}5$. Das bedeutet, dass die Zugabe von Polystyrolschaum in einer Menge unter der Hälfte des Volumens des Gemisches keine bedeutsame Verringerung der Festigkeit zur Folge hat. Die *Dichte* des Harzboden-Polystyrolschaum-Gemisches kann ohne Festigkeitseinbusse auf etwa 1100–1200 kg/m³ verringert werden.

Frostbeständigkeit

Eine Beziehung zwischen der Dichte und der *Wärmeleitfähigkeit* ist in Bild 4 dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des Gemisches bei dieser Dichte beträgt annähernd λ = 0,10 W/mK, womit dieses Material zur Gruppe der Wärmeisolatoren (λ < 0,3 W/mK) gehört.

In früheren Veröffentlichungen der Verfasser wurde gezeigt, dass die Harzboden- und Harzboden-Polystyrolschaum-Gemische *stabil* sind. Diese Tatsache wird durch die Ergebnisse der Frostbeständigkeitsuntersuchung der Prüfkörper aus stabilisiertem Mittelsand und siltigem Sand bestätigt. Die Ergebnisse werden in den Tabellen 3 und 4 dargelegt.

Ergebnis

Zusammenfassend kann man feststellen, dass das *Harnstoffharz* zur Stabilisierung von grobkörnigen und wenig bindigen Böden gemäss Bild 1 sowie zur Herstellung von Harzboden-Polystyrolschaum-Gemischen mit Sandschlag *brauchbar* ist. Im Vergleich zu flüssigen Harzen ist pulverförmiges Harz ein Bindemittel mit wesentlich günstigeren Eigenschaften. Sehr einfach ist dabei die *Regelung des Wassergehaltes in Harzboden-Gemischen*, wo die Feuchtigkeit des Gemisches während der Verdichtung nahe am optimalen Wert liegt. Es ist auch möglich, eine Verfestigung von Böden mit höherer natürlicher Feuchtigkeit zu erzielen.

Tabelle 3. Ergebnisse der Frostbeständigkeitsuntersuchungen für die Sand-Polystyrolschaum-Prüfkörper mit trockenem Harz in einer Menge von c_o = 10,6%

Volumenanteil an Polystyrolschaum s	Frostbeständigkeitskoeffizient	
	Mittelsand	Siltiger Sand
0	0,86	0,98
0,25	0,90	0,96
0,50	0,78	0,94
0,75	0,86	0,96

Tabelle 4. Ergebnisse der Frostbeständigkeitsuntersuchungen für die Prüfkörper aus siltigem Sand, stabilisiert mit den Harzen K-116 und Aerolite FFD und Ammoniumchlorid als Härter

Harztyp	Harzmenge c_w [%]	Frostbeständigkeitskoeffizient
K-116 (flüssig)	6	0,77
	9	0,64
Aerolite FFD (pulverförmig)	6	0,97
	9	0,98

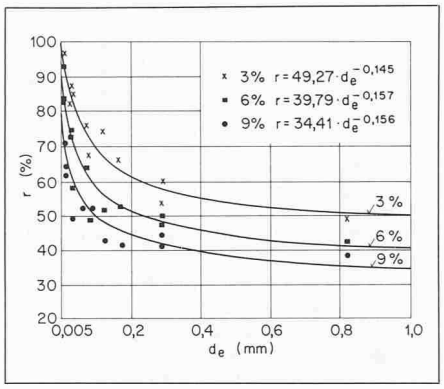


Bild 2. Beziehung zwischen dem massgebenden Durchmesser des Bodens und der Verringerung der optimalen Feuchtigkeit des Harzboden-Gemisches für die Zugabe von 3, 6 und 9% Trockensubstanz des Harzes.

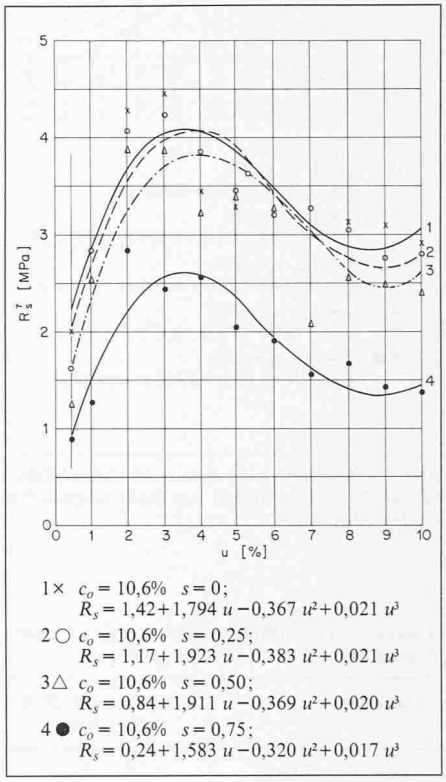
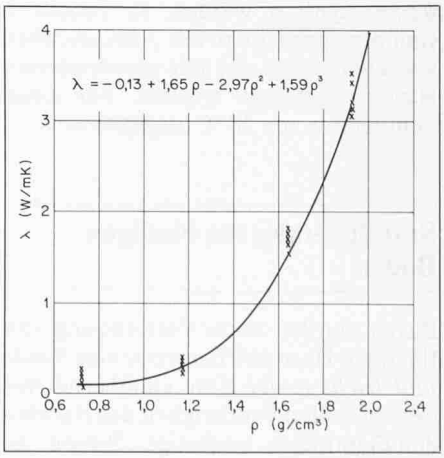


Bild 3. Der Einfluss der Zugabe von Ammoniumchlorid auf die Festigkeit der Mittelsand-Polystyrolschaum-Gemische, die mit Harz Aerolite FFD verfestigt wurden.

Bild 4. Beziehung zwischen Dichte des Styroporharzbodengemisches und der Wärmeleitfähigkeit.



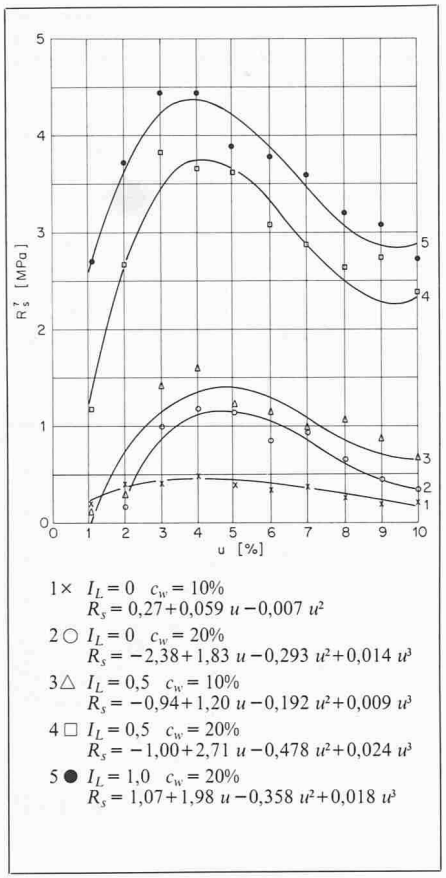


Bild 5. Der Einfluss der Ammoniumchlorid-Zugabe auf die Druckfestigkeit von leicht tonigem Silt mit Harz Aerolite FFD verfestigt.

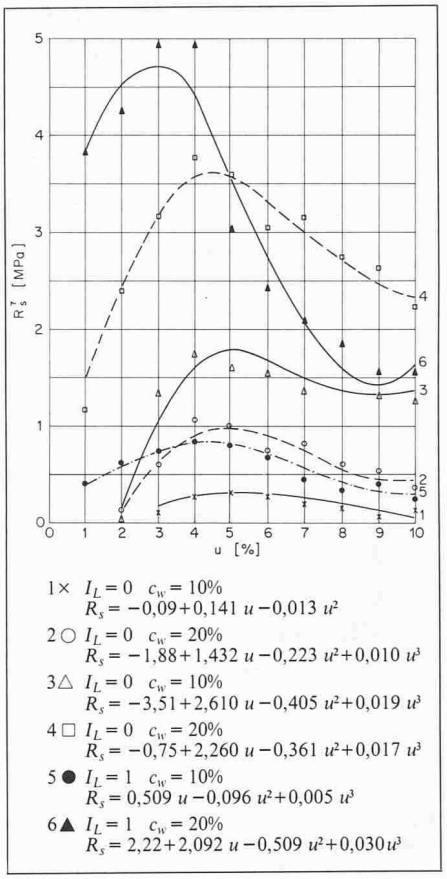


Bild 6. Einfluss der Ammoniumchlorid-Zugabe auf die Druckfestigkeit von tonigem Silt mit Harz Aerolite FFD verfestigt.

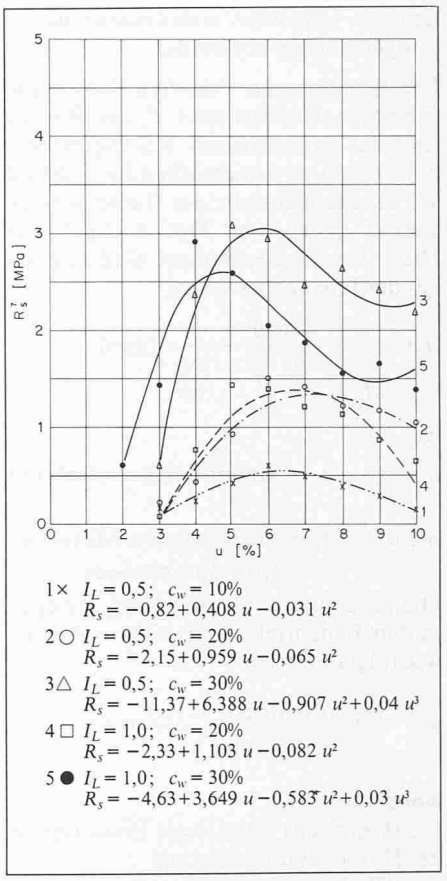


Bild 7. Einfluss der Ammoniumchlorid-Zugabe auf die Druckfestigkeit von Ton mit Harz Aerolite FFD verfestigt.

Tabelle 5. Approximative Abbindezeiten von Harzbodengemischen mit verschiedenen Härtern

Härterart	*Abbindezeit bei 20 °C* [Stunden]
Ammoniumchlorid	3 -12
Doppelammonium-phosphat	6 -48
Ammoniumphosphat	6 -49
Oxalsäure	0,5 - 6
Salzsäure	0,1 - 2
Orthophosphatsäure	0,1 - 2
Ameisensäure	0,1 - 2

Tabelle 6. Maximale Druckfestigkeit von Prüfkörpern aus bindigen Böden mit Harz Aerolite FFD verfestigt und mit Ammoniumchlorid gehärtet

Bodenart	*Harzmenge c_w* [%]	*Druckfestigkeit nach 7 Tagen* [MPa]		
		$I_L = O$	$I_L = 0{,}5$	$I_L = 1{,}0$
Leicht toniger Silt	10	0,5	1,4	0,8
	20	1,2	3,7	4,4
Silt bis toniger Silt	10	0,3	1,8	0,8
	20	1,0	3,6	4,7
Toniger Silt	10	0	0,6	0
	20	0	1,3	1,3
	30	0	3,1	2,6
Ton	10	0	0	0
	20	0	0	0
	30	0	0	0

Die *Abbindezeit* der Harzboden-Gemische kann durch Zugabe von verschiedenen Härtern oder von Härter-Gemischen reguliert werden. In Tabelle 5 sind die approximativen *Abbindezeiten* von Gemischen, die mit verschiedenen Härtern gehärtet wurden, bei einer Temperatur von 20 °C angegeben.

Stabilisierung von bindigen Böden

Bisher wurden unter Verwendung von flüssigen Harnstoffharzen *tonige Sande und leicht tonige Silte* annähernd mit der optimalen Feuchtigkeit des Harzboden-Gemisches verfestigt. Wegen zu niedriger Frostbeständigkeit oder zu grosser Wasserempfindlichkeit konnten Böden höherer Bindigkeit - wie tonige Silte und Tone - nicht dauerhaft verfestigt werden. Dies war durch folgende Ursachen bedingt:

- Die Harzlösungen konnten *nur wenig in die Tonminerale eindringen,* insbesondere bei Böden mit niedriger Feuchtigkeit.
- In Gemischen mit hoher Feuchtigkeit war die *Konzentration der Harzlösungen zu gering.*
- Die *Viskosität der flüssigen Harze* erschwerte die Vermischung der Einzelkomponenten.

In die Untersuchungen zur Bestimmung der Bodenart, die allenfalls mit pulverförmigem Harz stabilisiert werden können, wurden leicht toniger Silt, Silt bis toniger Silt, toniger Silt und Ton einbezogen. Die Druckfestigkeit der Harzböden wurde mit *Prüfkörpern* mit den Abmessungen ∅ = h = 8 cm aus Gemischen mit einer Anfangsfeuchtigkeit entsprechend einem Liquiditätsindex

Tabelle 7. Frostbeständigkeitskoeffizient der mit trockenem Harz stabilisierten Böden

Typ des Bodens	Harzmenge c_w [%]	Frostbeständigkeitskoeffizient	
		$I_L = 0{,}5$	$I_L = 1{,}0$
Leicht toniger Silt	20	0,86	0,90
Silt bis toniger Silt	20	0,72	0,78
Toniger Silt	30	0,68	0,80

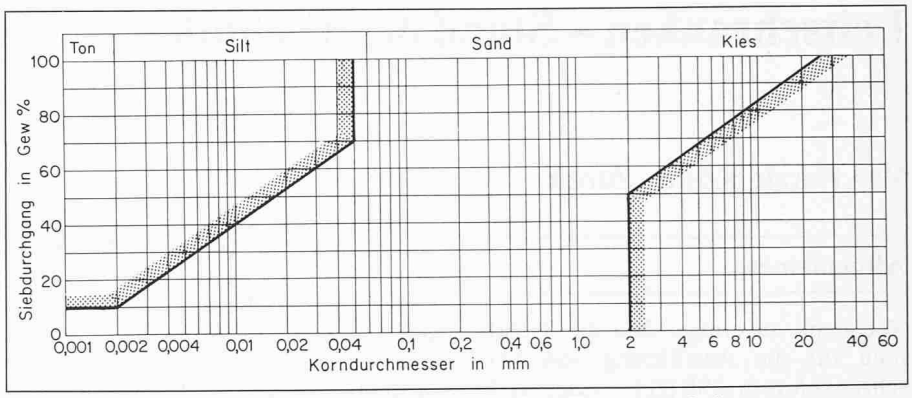


Bild 8. Bereich der für die Stabilisierung mit dem Harz Aerolite FFD geeigneten Böden.

von I_L = 0–1,0 bestimmt. Die Böden wurden mit einer Zugabe von 10–30% Harz Aerolite FFD und Ammoniumchlorid-Härter verfestigt. Die Gemische der Feuchtigkeit entsprechend I_L = 0 wurden mit einer Energie von 600 J/dm³ verdichtet. Die übrigen Prüfkörper wurden *ohne Verdichtung* hergestellt.

Die *7-Tage-Druckfestigkeit* von Prüfkörpern aus leicht tonigem Silt, tonigem Silt und Ton ist in Bild 5, 6 und 7 dargestellt. Tabelle 6 enthält eine Zusammenstellung der maximalen Festigkeiten.

Wegen zu grosser Wasserempfindlichkeit wurde *keine permanente Verfestigung des überfeuchteten Tons* erreicht. Bei den übrigen bindigen Böden wurde eine *wesentliche Verfestigung* (R_S^7 = 2,5 – 4,5 MPa) bei einer Anfangsfeuchtigkeit entsprechend einem Liquiditätsindex von I_L = 0,5 – 1,0 (Konsistenz mittelsteif bis weich) festgestellt. Eine viel geringere Verfestigung ergab die Stabilisierung der Böden, bei denen der *Anfangswassergehalt* gleich der Ausrollgrenze (I_L = 0) war. Bei diesem Boden war die Vermischung des Harzes mit dem Boden wegen der hohen Kohäsion erschwert. Die Harzboden-Gemische mit einer niedrigen Anfangsfeuchtigkeit erwiesen sich als inhomogen, was eine niedrige Wasserbeständigkeit und Festigkeit verursachte. Solche Erscheinungen wurden bei höheren Feuchtigkeiten nicht beobachtet, weil die Lockerung der Bodenstruktur unter dem Einfluss von Wasser eine gute Penetration des Harzes in die Poren des Bodens ermöglichte. Die gute Qualität bezüglich Frostbeständigkeit zeigt die Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse in Tabelle 7.

Aus den durchgeführten Untersuchungen folgt, dass mit pulverförmigem Harz *mehr Bodenarten* als mit den flüssigen Harnstoffharzen verfestigt werden können.

Der *Gesamtbereich* der für Stabilisierung mit dem Harz Aerolite FFD geeigneten Böden ist in Bild 8 dargestellt. Die mittel und stark tonigen Böden eignen sich nur, wenn ihr *Liquiditätsindex* im Bereich von I_L = 0,5 – 1,0 liegt. Zusätzlich müssen die im Kornverteilungsbereich von Bild 8 liegenden Böden *folgenden chemischen Anwendungskriterien* entsprechen:

- pH-Wert unter 8,
- Karbonatgehalt unter 5%.

Folgerungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Laboruntersuchungen sowie die aus früheren Arbeiten mit flüssigen Harnstoffharzen gewonnenen Erkenntnisse erlauben es, folgende Folgerungen zu ziehen:

a) Trockenes, pulverförmiges Harnstoffharz ist ein Bindemittel, das *geeignet* ist für die Oberflächenstabilisierung von grobkörnigen, wenig bindigen Böden sowie von mittelsteifen bis weichen, mittel und stark tonigen Böden, deren Kornverteilung in dem in Bild 8 angegebenen Bereich liegt. Dieser Kornverteilungsbereich ist viel grösser als jener der Böden, die zur Stabilisierung mit flüssigen Harnstoffharzen geeignet sind.

b) Zur Herstellung der Harzboden-Schichten sollten *gut mischende Maschinen* – z.B. vergleichbar mit Betonmischern – verwendet werden, damit eine verhältnismässig hohe Homogenität der stabilisierten Schicht erreicht wird.

c) Trockenes, pulverförmiges Harz ist zur Herstellung von *Harzboden-Polystyrolschaum-Gemischen* mit Sand geeignet. Solche Gemische weisen nach der Härtung sowohl eine hohe Festigkeit als auch eine niedrige Wärmeleitzahl auf. Dies macht sie für die Verfestigung von frostempfindlichen Böden verwendbar. Zur Herstellung der Harzboden-Polystyrolschaum-Schichten sind gut mischende Maschinen ähnlich den Betonmischern, die mit einer Schaummaschine für Polystyrolschaum ausgerüstet sind, zu verwenden.

Literaturverzeichnis

[1] *Hochwiller F., Koehling K.:* «Styropor-Beton», Betonstein-Zeitung, 3, 1968

[2] *Hochwiller F., Koehling K.:* «Styropor-Beton. Stand der Anwendungstechnik», 17, 1970.

[3] *Makowski J., Rafalski L.:* «Możliwości zastosowania żywic mocznikowych do powierzchniowej stabilizacji gruntów torowiska kolejowego», Drogi Kolejowe, 1, 1980. (Anwendungsmöglichkeit von Harnstoffharzen zur Flächenstabilisierung des Eisenbahnunterbaus», Eisenbahnwege, 1, 1980.)

[4] *Makowski J., Rafalski L.:* «Styroporbeton i styroporżywicogrunt jako warstwa ochronna torowiska», Drogi Kolejowe, 1, 1981. («Styropor-Beton und Styropor-Harz stabilisierter Boden als Schutzschicht des Eisenbahnunterbaus», Eisenbahnwege, 1, 1981.)

[5] *Rafalski L., Starzyńska K., Stepniewska E.:* «Żywice mocznikowe o wysokiej zawartości suchej substancji do powierzchniowej stabilizacji gruntów», referat na konferencje «Konsolidacja i stabilizacja gruntów za pomoca tworzyw sztucznych», Katowice, 1980. («Harnstoffharze mit hohem Trokkensubstanzgehalt als Verfestigungsmittel zur Bodenstabilisierung», Vortrag während der Konferenz «Bodenverfestigung und -stabilisierung mit PCV-Produkten», Kattowitz, 1980.)

[6] *Rafalski L.:* «Doświadczenia z dotychczasowych prób stabilizacji gruntów z użycien żywicy mocznikowej», referat na konferencje «Systemy stabilizacji podtorza», Warszawa, 1981. («Erfahrungen von bisherigen Versuchen mit Harnstoffharzen in Bodenstabilisierung», Vortrag während der Konferenz «Eisenbahnunterbaustabilisierung», Warschau, 1981.)

[7] *Rafalski L.:* «Warstwy mrozoochronne z żywicogruntów z dodatkiem styropianu w zastosowaniu do torowisk komunikacyjnych», praca doktoska, Politechnika Warszawska, 1982. («Frostschutzschichten von harnstoffharz-stabilisiertem Boden mit Styroporzusatz in Anwendung zum Verkehrsplanum», Doktordissertation, TH Warschau, 1982).

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. *J. Makowski*, dipl. Ing., *L. Rafalski*, dipl. Ing., und Dr. *K. Starzyńska*, dipl. Ing., Institute of Roads and Bridges, Warsaw Technical University, A. Armij Ludowej 16, 00-637 Warschau.