

Dauerhaftigkeit von Dränbeton für Betonfahrbahndecken

Durability of porous concrete for concrete pavements

Übersicht

Eine Minderung der Lärmemission des Straßenverkehrs lässt sich durch Veränderungen am Fahrzeug, d.h. durch eine Optimierung der Autoreifen und eine Verringerung der Motorgeräusche, und durch Veränderungen der Oberfläche von Betonfahrbahndecken erreichen. Wenn Verkehrsgeräusche zulässige Immissionsgrenzwerte überschreiten, haben die betroffenen Anwohner Anspruch auf Schallschutz. Lärm mindernde Betonfahrbahndecken verringern den Lärm bereits am Entstehungsort, so dass aufwendige bauliche Schallschutzmaßnahmen vermieden werden können. Lärminderungspotentiale liegen bei der Betonbauweise sowohl in der Optimierung der Oberflächentextur herkömmlicher gefügedichter Fahrbahndecken als auch in der Entwicklung neuartiger offenporiger Dränbetondeckschichten. Eine Lärm mindernde Dränbetondeckschicht sollte einen Hohlraumgehalt von rd. 25 % aufweisen. Sie wird in einer Schichtdicke von 4 cm bis 8 cm frisch auf frisch oder auf den erhärteten Unterbeton aufgebracht. Dränbetondecken wurden bisher nur als Versuchsstrecken gebaut. Aufgrund eines unzureichenden Langzeitverhaltens mussten sie nach relativ kurzer Nutzungsdauer ausgebaut werden. Die Ursache lag in der mangelnden Dauerhaftigkeit des Dränbetons und des Verbundes zwischen dichtem Unter- und offenporigem Oberbeton.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurde in einem Forschungsvorhaben mit finanzieller Beteiligung des Bundesministers für Verkehr die Dauerhaftigkeit des Dränbetons und des Verbundes zwischen Dränbeton und Unterbeton untersucht. Dabei wurde in Laborversuchen der Einfluss der Dränbetonzusammensetzung auf die Festigkeitseigenschaften und den Frost-Tausalz-Widerstand ermittelt. Die Biege- und Spaltzugfestigkeit sowie der Frost-Tausalz-Widerstand lassen sich durch die Zugabe einer Polymerdispersion steigern. Ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand konnte bisher jedoch nur durch die gleichzeitige Zugabe von Polymerdispersion und Silicastaub erzielt werden.

1 Einleitung

Der ständig zunehmende Straßenverkehr und die zunehmende Sensibilisierung der Anwohner von Verkehrswegen führen dazu, dass die zu erwartende Lärmemission, die beim Überrollen eines Straßenbelags entsteht, bei der Auswahl einer Bauweise immer wichtiger wird. Die Intensität des von einer Straße ausgehenden Lärms wird nach der „Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen“ (RLS 90) [1, 2] durch ein Rechenverfahren ermittelt. Bestandteil dieses Verfahrens ist eine Einstufung unterschiedlicher Fahrbahnoberflächen hinsichtlich ihrer Lärmentwicklung. Betonfahrbahndecken, die unter Verwendung eines Längsglätters und eines nachgeschleppten Jutetuchs hergestellt werden, sind den dichten Asphaltbauweisen akustisch gleichgestellt. Eine geringere Lärmemission hat nur der offenporige Dränasphalt.

Beim Betonstraßenbau gibt es zwei Möglichkeiten, die Lärmemission weiter zu reduzieren: Erstens die Verbesserung der Ebenheit und der Oberflächentextur gefügedichter Betondecken, zwei-

Abstract

The noise emission from road traffic can be reduced by changes to the vehicle, e.g. by optimizing the car tyres and reducing the engine noise, and by changes to the surface of the concrete pavement. The residents affected have a right to protection from the sound if vehicle noise exceeds permissible pollution limits. Noise-suppressing concrete pavements reduce the noise at the point of origin, so that it is possible to avoid expensive structural sound protection measures. With concrete construction the noise suppressing potential lies both in optimizing the surface texture of conventional concrete pavements with dense microstructures and in the development of new open-pore covering layers of porous concrete (draining concrete). A noise-suppressing porous concrete covering layer should have a voids content of about 25 %. It is placed in a layer thickness of 4 cm to 8 cm, either fresh on fresh or on the hardened base course concrete. So far porous concrete pavements have only been constructed as test sections. Because of inadequate long-term characteristics they have had to be removed after relatively short periods in use. The reason lay in the deficient durability of the porous concrete and of the bond between the dense base course concrete and the open-pore top concrete.

The durability of porous concrete and of the bond between porous concrete and base course concrete has been examined at the Research Institute of the German Cement Industry in a research project with financial participation by the Federal Ministry of Transport. The influence of the porous concrete composition on the strength properties and the resistance to freeze-thaw with de-icing salt was established in laboratory trials. The flexural tensile strength and tensile splitting strength as well as the resistance to freeze-thaw with de-icing salt can be increased by the addition of a polymer dispersion. However, adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt could only be achieved by the simultaneous addition of polymer dispersion and silica fume.

1 Introduction

The continuous increase in road traffic and the increasing sensitivity of residents close to traffic routes means that the anticipated noise emission when traffic passes over a road surface is becoming ever more important when selecting a method of construction. The intensity of the noise emitted from a road is determined by a method of calculation given in the “Guidelines for noise prevention on roads” (RLS 90) [1, 2]. Part of this method lies in classifying different pavement surfaces with respect to their noise evolution. Concrete pavements produced using a longitudinal smoothing finisher with trailing jute cloth are classified as acoustically equivalent to the dense asphalt method of construction. Only the open-pore draining asphalt has a lower noise emission.

With concrete road construction there are two possible ways of further reducing the noise emission – by improving the evenness and the surface texture of concrete pavements with dense microstructure or by producing an open-pore porous concrete (draining

tens die Herstellung eines offenporigen Dränbetons. Dränbeton absorbiert einen Teil des entstehenden Lärms und hat zusätzlich den Vorteil einer erhöhten Verkehrssicherheit bei Regen, da Sprühfahnenbildung und Aquaplaninggefahr vermindert werden. Im Vergleich zu bewährten dichten Betondecken, die ohne größere Reparaturen über 30 Jahre befahren werden können, mussten Dränbetonversuchsstrecken nach einer vergleichsweise kurzen Liegedauer wegen Rissbildung und Lockerung einzelner Zuschläge ausgebaut werden. In einem Forschungsvorhaben mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen wurde daher im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Laborversuchen Fragestellungen zum Verbundverhalten und zur Dauerhaftigkeit von Dränbeton nachgegangen [3].

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Einfluss der Fahrbahndecke auf die Lärmemission

Die Geräuschemission des Straßenverkehrs resultiert hauptsächlich aus dem Antriebsgeräusch der Fahrzeuge und dem Rollgeräusch. Das Rollgeräusch dominiert bei Geschwindigkeiten von mehr als 50 km/h gegenüber dem Antriebsgeräusch der Fahrzeuge [4, 5]. Lärminderungsmaßnahmen müssen daher bei schnell befahrenen Autobahnen vorrangig beim Rollgeräusch ansetzen. Das Rollgeräusch lässt sich in der Fahrzeugtechnik durch die Entwicklung von akustisch günstigen Reifen und im Straßenbau durch eine Optimierung der Oberflächentextur der Fahrbahndecke vermindern. Bei der Straßenoberfläche gibt es zwei maßgebende Ursachen für die Entstehung des Rollgeräuschs. Einerseits regen Querwellen (Wellenlängen > 1 cm bis zu ca. 50 cm) im Straßenbelag die Reifen zu tiefrequenten Schwingungen an und verursachen dröhnende Geräusche, andererseits wird bei sehr glatten Straßenoberflächen die Luft in der Reifenaufstandsfläche komprimiert und entweicht beim Abrollvorgang. Hierdurch werden in erster Linie hochfrequente Schwingungen erzeugt, die als Pfeifen und Zischen wahrgenommen werden [3, 4, 9]. Zur Verringerung der Lärmemission ist eine Betonoberfläche mit einer Textur anzustreben, bei der die Hochpunkte der Betondecke auf einer Ebene und die Abstände zwischen ihnen unter 1 cm liegen. Gleichzeitig sollten zwischen den Hochpunkten schmale Kanäle mit ausreichender Tiefe vorhanden sein, damit die Luft in der Reifenaufstandsfläche entweichen kann, ohne dass sie komprimiert wird. Dränbeton als offenporige Deckschicht vermindert darüber hinaus durch die Schall absorbierende Wirkung die Ausbreitung der Antriebs- und Rollgeräusche und verhindert das Zusammendrücken der Luft zwischen Reifen und Fahrbahn. Das Lärminderungspotential von Dränbeton im Vergleich zu gefügedichtem herkömmlichem Beton wird mit rd. 3 dB(A) angegeben [4, 5, 6].

2.2 Dränbeton

Bereits seit einigen Jahren wird versucht, offenporige Betonbeläge als Lärm mindernde Fahrbahndecke einzusetzen [3 bis 15]. Im Rahmen eines europäischen Forschungsvorhabens [4, 5] wurden in Laborversuchen Dränbetone entwickelt und Versuchsstrecken gebaut. In den Jahren 1994 und 1995 wurden zwei weitere Strecken bei Karlsruhe [9] bzw. Hockenheim [10, 15] gebaut. Die Dränbetone wurden als Einkornbetone mit Splitt 5/8 mm hergestellt und enthielten in einigen Fällen geringe Anteile feinen Sandes 0/1 mm. Der Zementgehalt lag zwischen 260 kg/m³ und 330 kg/m³ und der w/z-Wert bei rd. 0,25 bis 0,30. Ohne Zusatz einer Polymerdispersion war der Frost-Tausalz-Widerstand mangelhaft. Durch Zugabe einer Polymerdispersion konnte der Frost-Tausalz-Widerstand angehoben werden [7, 11 bis 14]. Der Dränbeton wies einen Hohlraumgehalt von rd. 20 % bis 25 % auf und wurde in einer Schichtdicke von 4 cm bis 8 cm entweder „frisch auf fest“ auf den bereits erhärteten Unterbeton mit einem Asphaltfertiger oder „frisch auf frisch“ mit zwei hintereinander fahrenden Gleitschalungsfertigern eingebracht. Zur Verbesserung des Verbunds wurde bei der Bauweise „frisch auf fest“ eine Haftbrücke auf den erhärteten Unterbeton aufgebracht.

Untersuchungen an Versuchsstrecken zeigten bei der Bauweise „frisch auf fest“ ein allmähliches Ablösen des Dränbetons vom Unterbeton insbesondere im Bereich der Ränder von Fahrbahnplatten

(concrete). Porous concrete absorbs part of the noise generated; it also has the advantage of increased traffic safety in rain as it reduces the formation of clouds of spray and the danger of aquaplaning. In contrast to proven dense concrete pavements, which can be used for over 30 years without major repairs, the test sections of porous concrete had to be removed after a comparatively short service life because of cracking and loosening of individual aggregate particles. The problems of the bonding characteristics and durability of porous concrete were therefore examined in laboratory tests at the Research Institute of the Cement Industry in a research project supported financially by the Federal Ministry of Transport, Construction and Housing [3].

2 Current state of knowledge

2.1 Influence of the pavement on noise emission

The noise emission from road traffic comes mainly from the vehicle engine noise and the rolling noise. At speeds of more than 50 km/h the rolling noise is louder than the vehicle engine noise [4, 5]. On high-speed autobahns the noise-reducing measures must therefore be applied primarily to the rolling noise. On the vehicle side the rolling noise can be reduced by developing acoustically favourable tyres and on the road construction side by optimizing the surface texture of the pavement. In the road surface there are two principal causes of the generation of rolling noise. On the one hand lateral waves (wavelengths less than 1 cm up to approximately 50 cm) in the road surface excite the tyres into low frequency vibrations and cause a droning noise; on the other hand with very smooth road surfaces the air is compressed in the tyre contact area and escapes as the tyre rolls on. This primarily generates high frequency vibrations which are perceived as whistling and hissing [3, 4, 9]. To reduce the noise emission the aim is to achieve a concrete surface with a texture in which the high points of the concrete surface lie at one level with distances between them of less than 1 cm. At the same time there should be narrow channels of sufficient depth between the high points so that the air in the tyre contact area can escape without being compressed. Porous concrete used as an open-pore covering layer also reduces the propagation of the engine and rolling noises through its sound-absorbing effect, and prevents the compression of the air between tyre and pavement. The noise-reducing potential of porous concrete when compared with conventional concrete with a dense microstructure is specified as about 3 dB(A) [4, 5, 6].

2.2 Porous concrete

Attempts have been made for some years to use open-pore concrete surfaces as noise-reducing carriageways [3 to 15]. Porous concretes were developed in laboratory trials and test sections were built as part of a European research project [4, 5]. In 1994 and 1995 two further sections were built near Karlsruhe [9] and Hockenheim [10, 15]. The porous concretes were produced as no fines concrete with 5/8 mm chippings and in some cases contained small proportions of fine 0/1 mm sand. The cement content lay between 260 kg/m³ and 330 kg/m³ with a w/c ratio of about 0.25 to 0.30. The resistance to freeze-thaw with de-icing salt was inadequate without the addition of a polymer dispersion. The addition of a polymer dispersion increased the resistance to freeze-thaw with de-icing salt [7, 11 to 14]. The porous concrete had a voids content of about 20 % to 25 % and was placed in a layer thickness of 4 cm to 8 cm either “fresh on solid” on the already hardened base course concrete with an asphalt finisher or “fresh on fresh” with two slip-form pavers travelling one behind the other. For the “fresh on solid” construction a bond coat was applied to the hardened base course to improve the bond.

Examination of the test sections showed a gradual detachment of the porous concrete from the base course concrete with the “fresh on solid” construction, especially at the edges of pavement slabs [4, 5, 11, 13]. Possible causes of this damage were cited as, among others, uneven distribution of the bond coat, inadequately cleaned base course concrete, and differential movement of the concretes as a result of temperature and moisture changes. Better engagement between porous concrete and base course concrete can be achieved with “fresh on fresh” placement. In spite of this it is still doubtful

[4, 5, 11, 13]. Als mögliche Schadensursachen hierfür werden u.a. eine ungleichmäßige Verteilung der Haftbrücke, nicht ausreichend gesäuberter Unterbeton und unterschiedliche Verformungen der Betone infolge Temperatur- und Feuchteänderungen genannt. Beim Einbau „frisch auf frisch“ kann eine bessere Verzahnung zwischen Dränbeton und Unterbeton erzielt werden. Trotzdem bleibt es fraglich, ob nicht durch das unterschiedliche Verformungsverhalten der Betone die Dauerhaftigkeit des Verbundes negativ beeinflusst wird.

3 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Über das Langzeitverhalten von Dränbeton liegen noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Kriterien für die Dauerhaftigkeit des Dränbetons und des Verbundes zwischen Dränbeton und dichtem Unterbeton müssen erarbeitet und erprobt werden, bevor die Bauweise in großem Maßstab z.B. auf hoch belasteten Bundesautobahnen eingesetzt werden kann. Die dazu durchgeführten Untersuchungen, über die hier berichtet wird, lassen sich in zwei Teile untergliedern:

– Festigkeitseigenschaften und Dauerhaftigkeit von Dränbeton

In Laborversuchen wurde der Einfluss der Dränbetonzusammensetzung auf die Festigkeit (Druck-, Spaltzug- und Biegezugfestigkeit) und den Frost-Tausalz-Widerstand untersucht. Außerdem wurde in orientierenden Versuchen das Schwind- und Quellverhalten des Dränbetons geprüft.

– Prüfung des Verbundes

Um die Dauerhaftigkeit des Verbunds zwischen offenporigem Dränbeton und gefügedichtem Unterbeton zu untersuchen, wurden kleinformative Verbundprobekörper im Labor einer Frost-Tausalz-Beanspruchung unterzogen und großformatige Platten in einer Außenlagerung der natürlichen Bewitterung ausgesetzt. Es wurde die Bauweise „frisch auf fest“ untersucht, da spätestens bei der Erneuerung einer „frisch auf frisch“ gebauten Dränbetondeckenschicht diese Bauweise zur Anwendung kommt. Zur Beurteilung des Verbunds wurde zu vorgegebenen Zeitpunkten die Haftzugfestigkeit bestimmt.

Weitere Einzelheiten können dem Bericht „Dauerhaftigkeit von Dränbeton für Betonfahrbahndecken“ [3] entnommen werden.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

Zement

Sowohl für die Dränbetone als auch für die Herstellung des dichten Unterbetons der Verbundprobekörper wurde ein Portlandzement CEM I 32,5 R verwendet.

Zuschlag

Für die Herstellung der Dränbetone wurden Basaltsplitt 5/8 mm (Rohdichte 3,0 kg/dm³) und drei verschiedene Rheinsande (Rohdichte 2,60 kg/dm³) mit Größtkorn 0,71, 2 mm bzw. 4 mm eingesetzt. Der Unterbeton wurde mit Basaltsplitt 5/8 mm und Rheinsand 0/2 mm hergestellt. Das Größtkorn von nur 8 mm wurde gewählt, um die bei einem Größtkorn von 22 mm erwartete größere Streuung

weder die Dauerhaftigkeit der Verbindung als auch durch die unterschiedlichen Verformungscharakteristika der Betone.

3 Aim and extent of the investigations

There is still no adequate understanding of the long-term characteristics of porous concrete. Criteria for the durability of porous concrete and of the bond between porous concrete and dense base course concrete must be developed and tested before this mode of construction can be used on a large-scale, e.g. on heavily loaded federal autobahns. The investigations carried out for this purpose, which are reported here, are divided into two sections:

– Strength characteristics and durability of porous concrete

The influence of the porous concrete composition on the strength (compressive, splitting tensile, and flexural tensile strengths) and the resistance to freeze-thaw with de-icing salt was investigated in laboratory trials. The shrinkage and swelling behaviour of porous concrete was also tested in preliminary investigative trials.

– Testing the bond

Small composite test pieces were submitted to stressing with freeze-thaw with de-icing salt in the laboratory and large slabs were exposed to natural weathering in an outside store in order to investigate the durability of the bond between open-pore porous concrete and base course concrete with dense microstructure. The “fresh on solid” mode of construction was investigated as this method of construction has been used very recently when renewing a “fresh on fresh” porous concrete covering layer. The pull-off strength was determined at set time intervals to assess the bond. Further details can be found in the report “Durability of porous concrete for concrete pavements” [3].

4 Test procedure

4.1 Starting materials

Cement

A CEM I 32,5 R Portland cement was used both for the porous concretes and for producing the dense base course concrete in the composite test pieces.

Aggregate

5/8 mm basalt chippings (bulk density 3.00 kg/dm³) and three different Rhine sands (bulk density 2.60 kg/dm³) with maximum particle sizes of 0.71, 2, and 4 mm respectively were used for producing the porous concretes. The base course concrete was made with 5/8 mm basalt chippings and 0/2 mm Rhine sand. The maximum aggregate size of only 8 mm was chosen to avoid the greater scatter of the results of the pull-off strength test expected when using a maximum aggregate size of 22 mm.

Additives

Three different polymer dispersions and, for some mixes, a silica fume suspension (Table 1) and a superplasticizer based on melamine sulfonate were used for producing the porous concrete. The base course concrete was produced with the addition of superplasticizer and an air-entraining agent based on wood rosin.

Tafel 1: Kennwerte der Polymerdispersionen und der Silicastaubsuspension (Herstellerangaben)
Table 1: Characteristic values of the polymer dispersions and the silica fume suspension (manufacturer's data)

Kennwerte characteristics	Polymerdispersion			Silicastaub- suspension silica fume suspension
	S1	S2	S3	
Grundsubstanz basic substance	Styrol-Butadien	Acrylat	Styrol-Acrylat	SiO ₂
Feststoffgehalt in Gew.-% solid content in wt.-%	46	51	50	51,5
Dichte in kg/dm ³ density	1,01	1,01	1,04	1,39
maximal zulässige Zugabemenge Feststoff in Gew.-% vom Zementgehalt maximum permissible solid addition in wt.-% of cement content	8	10	10	10

Tafel 2: Betonzusammensetzung
Table 2: Concrete composition

Bestandteile (kg/m ³) components	Mischung/Mix																									
	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23 ⁴⁾		
Splitt 5/8 chippings	1617	1617	1617	1702	1532	1552	1487	1597	1577	1617	1617	1680	1641	1593	1628	1568	1599	1608	1582	1582	1582	1600	1545			
Sand 0/0,71	74	-	-	-	147	70	68	73	72	74	74	76	74	73	87	83	73	74	72	72	72	73	77			
Sand 0/2	-	74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sand 0/4	-	-	74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zementgehalt cement content	280	280	280	280	280	315	350	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	
Wassergehalt ¹⁾ water content	70	70	70	70	70	78,8	87,5	77	84	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
Polymer ²⁾	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	25,2	28,0	22,4	22,4	22,4	22,4	-	14,0	30,8	-	22,4	22,4	22,4	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	22,4		
Art/kind Polymer ³⁾	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S1	S3	-	S2	S2	-	S2	S2	S2	S1	S2	S3	S2	S2			
Microsilica ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,0	28,0	14,0	7,0	14,0	14,0	14,0	-	-			
Fließmittel plasticizer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	-	-		

¹⁾ einschließlich Wassergehalt der Polymerdispersion und/oder der Microsilicasuspension/
including water content polymer dispersion and/or microsilica suspension

²⁾ Feststoff/
solid

³⁾ Tafel 1/
table 1

⁴⁾ Lit [10, 11]

der Ergebnisse der Haftzugfestigkeits-Prüfung zu vermeiden.

Zusätze

Für die Herstellung des Dränbetons wurden drei unterschiedliche Polymerdispersionen und bei einigen Mischungen eine Silicastaub-suspension (Tafel 1) und ein Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat verwendet. Der Unterbeton wurde unter Zugabe des Fließmittels und eines LP-Bildners auf der Basis von Wurzelhaz hergestellt.

Wasser

Als Zubagewasser wurde Leitungswasser der Stadt Düsseldorf verwendet.

4.2 Betonzusammensetzungen

4.2.1 Dränbeton

Der Dränbeton wurde so zusammengesetzt, dass sich ein mit der Stoffraumrechnung ermittelter Hohlraumgehalt – rechnerischer Hohlraumgehalt – von rd. 25 Vol.-% ergab. Ausgehend von dem in einem europäischen Forschungsvorhaben [12, 13] optimierten Dränbeton (Mischung 23, Tafel 2) wurden die folgenden Parameter variiert. Die Angaben in Klammern beziehen sich auf die Nummern der Dränbetone in Tafel 2.

Das Größtkorn des Sands wurde zwischen 0,71 mm und 4 mm (Nr. 1 bis 3) und der Volumenanteil des Sands 0/0,71 mm am Gesamtzuschlag zwischen 0 Vol.-% und 10 Vol.-% variiert (Nr. 1, 4, 5). Der Zementgehalt lag zwischen 280 kg/m³ und 350 kg/m³ (Nr. 1, 6, 7) und der w/z-Wert zwischen 0,25 und 0,30 (Nr. 1, 8, 9). Der Wassergehalt zur Berechnung des w/z-Werts enthält neben dem Zubagewasser den Wassergehalt der Polymerdispersion und der Silicastaubsuspension. Es wurden drei unterschiedliche Polymerdispersionen S1 bis S3 (Tafel 1) mit einer Feststoffdosierung von 8 Gew.-% bezogen auf den Zementgehalt eingesetzt (Nr. 1, 10, 11). Zusätzlich wurde für die Polymerdispersion S2 deren Feststoffgehalt bezogen auf den Zementgehalt zwischen 0 Gew.-% und 11 Gew.-% variiert (Nr. 1, 12, 13, 14). Weiterhin wurde zusammen mit der Polymerdispersion S2 Silicastaub als Suspension in einer Dosierung zwischen 2,5 Gew.-% und 10 Gew.-% (Feststoff) bezogen auf den Zementgehalt zugegeben (Nr. 16 bis 21). Bei einer Mischung (Nr. 15) wurde auf die Polymerdispersion verzichtet und nur Silicastaub als Suspension in einer Dosierung von 10 Gew.-% (Feststoff) bezogen auf den Zementgehalt eingesetzt. Der Dränbeton Nr. 1 wurde durch Änderung der Verdichtungsdauer mit rechnerischen Hohlraumgehalten zwischen rd. 15 Vol.-% (intensive Verdichtung) und rd. 30 Vol.-% (geringe Verdichtung) hergestellt.

Water

The mixing water was mains water from the town of Düsseldorf.

4.2 Concrete compositions

4.2.1 Porous concrete

The porous concrete was designed to give a voids content determined by physical volumetric calculation – calculated voids content – of about 25 vol.%. Starting from the porous concrete (Mix 23, Table 2) optimized in a European research project [12, 13] the parameters were varied as described below. The information in brackets refers to the porous concrete numbers given in Table 2.

The maximum particle size of the sand was varied between 0.71 mm and 4 mm (Nos. 1 to 3), and the volumetric percentage of the 0/0.71 mm sand in the total aggregate was varied between 0 vol.% and 10 vol.% (Nos. 1, 4, 5). The cement content lay between 280 kg/m³ and 350 kg/m³ (Nos. 1, 6, 7) and the w/c ratio between 0.25 and 0.30 (Nos. 1, 8, 9). The water content for calculating the w/c ratio included not only the mixing water but also the water content of the polymer dispersion and of the silica fume suspension. Three different polymer dispersions S1 to S3 (Table 1) were used with a solids dosage of 8 wt.% relative to the cement content (Nos. 1, 10, 11). The solids content of polymer dispersion S2 relative to the cement content was also varied between 0 wt.% and 11 wt.% (Nos. 1, 12, 13, 14). In addition to polymer dispersion S2 silica fume was also added as a suspension at dosages of between 2.5 wt.% and 10 wt.%. (solids) relative to the cement content (Nos. 16 to 21). The polymer dispersion was dispensed with for one mix (No. 15) and silica fume was added by itself as a suspension at a level of 10 wt.%(solids) relative to the cement content. By varying the compaction time porous concrete No. 1 was produced with calculated voids contents between about 15 vol.% (intensive compaction) and about 30 vol.% (slight compaction).

4.2.2 Base course concrete

An air-entrained concrete with an air content of about 5 vol.% was produced as the base course concrete with dense microstructure for making the composite test pieces. The concrete had a cement content of 350 kg/m³ and a w/c ratio of 0.45.

4.2.3 Bond coat

A bond coat with 1430 kg/m³ CEM I 32,5 R cement, 286 kg/m³ polymer dispersion and 286 kg/m³ mixing water was used to improve the bond in the “fresh on solid” method of construction.

4.2.2 Unterbeton

Als gefügedichter Unterbeton für die Herstellung der Verbundprobekörper wurde ein LP-Beton mit einem Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% hergestellt. Der Zementgehalt betrug 350 kg/m^3 und der w/z-Wert 0,45.

4.2.3 Haftbrücke

Zur Verbesserung des Verbunds der Bauweise „frisch auf fest“ wurde eine Haftbrücke mit 1430 kg/m^3 Zement CEM I 32,5 R, 286 kg/m^3 Polymerdispersion und 286 kg/m^3 Zugabewasser eingesetzt.

4.3 Herstellung und Lagerung der Probekörper

4.3.1 Dränbeton

Der Dränbeton wurde in einem Labormischer zwei Minuten gemischt und danach auf dem Rütteltisch in Stahlformen auf die durch den angestrebten Hohlraumgehalt vorgegebene Rohdichte verdichtet. Für die Festbetonprüfungen wurden vier Würfel mit 150 mm und vier Würfel mit 100 mm Kantenlänge sowie drei Balken ($10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$) hergestellt. Die Probekörper wurden zum Schutz gegen Austrocknen abgedeckt unter feuchten Tüchern gelagert. Nach dem Ausschalen im Alter von einem Tag wurden die Probekörper in Plastikfolie verpackt. Im Alter von sieben Tagen wurden die Probekörper ausgepackt und bis zur Prüfung bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(65 \pm 5)\%$ im Klimaraum gelagert.

Für orientierende Versuche zur Ermittlung der feuchtebedingten Verformungen (Quellen/Schwinden) von vier Dränbetonen mit unterschiedlichen Zementleimgehalten (Nr. 1, 6, 7, 12) wurden zusätzlich vier Balken ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$) hergestellt. Zum Vergleich wurde auch ein herkömmlicher dichter Straßenbeton (Zuschlag Rheinsand 0/2 und Basaltsplitt 2/16 mm, Sieblinie Mitte AB 16, Zementgehalt 350 kg/m^3 , w/z-Wert = 0,45) geprüft. Nach dem Ausschalen im Alter von 24 Stunden wurden die Balken mit Messmarken versehen und die Nullmessung für die Bestimmung der Längenänderung vorgenommen. Die Probekörper verblieben bis zum Alter von drei Tagen in eng anliegenden Folien luftdicht verpackt. Anschließend wurden die Balken ausgepackt und zwei Balken bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(65 \pm 5)\%$ im Klimaraum und zwei Balken unter Wasser bei einer Temperatur von rd. 20°C gelagert.

4.3.2 Verbundprobekörper

a) Kleinformatige Platten

Das Verbundverhalten (Bauweise „frisch auf fest“) wurde an zwei Dränbetonen (Nr. 1, 20) untersucht. Zur Prüfung des Verbundverhaltens nach Frost-Tausalz-Beanspruchung und bei Klimaraumlagerung ($20^\circ\text{C}/65\%$ r.F.) wurden für jede der beiden Mischungen neun Unterbetonplatten ($B \times L \times H = 25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$) hergestellt. Auf die rd. 28 Tage alten Unterbetonplatten wurde unmittelbar nach dem Auftrag der Haftbrücke Dränbeton (Hohlraumgehalt rd. 25 %) in einer Schichtdicke von 4 cm aufbetoniert. Die Seitenflächen der Verbundplatten wurden durch Aufkleben einer Gummiabdichtung, vergleichbar der Durchführung bei dem skandinavischen Plattenverfahren [16], abgedichtet. Durch die Abdichtung wurde gewährleistet, dass die aufgebrachte Tausalzlösung nicht abfließen konnte. Die im Klimaraum $20^\circ\text{C}/65\%$ r.F. gelagerten Vergleichsprobekörper ohne Frost-Tausalz-Beanspruchung wurden ebenfalls abgedichtet.

b) Großformatige Platten

Insgesamt vier großformatige Verbundprobekörper (Abmessungen rd. $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, Gesamtdicke 26 cm , 4 cm Dränbeton unterschiedlicher Zusammensetzung mit einem Hohlraumgehalt von rd. 25 %) wurden 3 Tage nach dem Aufbringen einer Haftbrücke und des Dränbetons (Bauweise „frisch auf fest“) auf dem Gelände des Forschungsinstituts im Freien gelagert. Es wurde der Einfluss unterschiedlicher Polymerdispersionen (10 Gew.-% Feststoff) mit und ohne Zugabe von Silicastaub (5 Gew.-% Feststoff) untersucht (Nr. 19 bis 21 und 22). Die Platten wurden nach der Auslagerung an den Seiten mit Styropor und angeschüttetem Sand abgedichtet. Um die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel zu ermitteln, wurden Tem-

4.3 Production and storage of the test pieces

4.3.1 Porous concrete

The porous concrete was mixed for two minutes in a laboratory mixer and then compacted on a vibrating table in steel moulds to the bulk density predetermined by the required voids content. Four cubes of 150 mm edge length and four cubes with 100 mm edge length as well as three beams ($10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$) were produced for testing the hardened concrete. The test pieces covered in damp towels to protect against drying out during storage. After de-moulding at the age of one day the test pieces were wrapped in plastic film. The test pieces were unwrapped at seven days and stored in a climatic chamber at a temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$ and a relative air humidity of $65 \pm 5\%$ until tested.

Four beams ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$) were also produced for preliminary investigative trials to determine the movement caused by moisture (swelling/shrinkage) of four porous concretes with different cement paste contents (Nos. 1, 6, 7, 12). A conventional dense road concrete (0/2 Rhine sand and 2/16 mm basalt chippings as aggregate, mid AB 16 grading curve, 350 kg/m^3 cement content, w/c ratio = 0.45) was also tested for comparison. After de-moulding at an age of 24 hours the beams were provided with test marks and the zero measurement was made for determining the change in length. The test pieces remained packed in closely wrapped air-tight film for three days. The beams were then unwrapped; two beams were stored in a climatic chamber at a temperature of $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ and a relative air humidity of $(65 \pm 5)\%$, and two beams were stored under water at a temperature of about 20°C .

4.3.2 Composite test pieces

a) Small slabs

The bonding characteristics (“fresh on solid” construction) were examined on two porous concretes (Nos. 1, 20). Nine base course slabs ($W \times L \times D = 25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$) were produced for each of the two mixes to test the bonding characteristics after stressing by freeze-thaw with de-icing salt and with storage in a climatic chamber ($20^\circ\text{C}/65\%$ r.h.). Porous concrete (voids content about 25 %) was concreted in a layer thickness of 4 cm on to the approximately 28 day old base course concrete slabs directly after application of the bond coat. The side surfaces of the composite slab were sealed by sticking on a rubber seal in a procedure similar to the Scandinavian slab method [16]. The sealing ensured that the de-icing salt solution applied could not escape. The reference test pieces stored in the $20^\circ\text{C}/65\%$ r.h. climatic chamber without stressing by freeze-thaw with de-icing salt were also sealed.

b) Large slabs

A total of four large composite test pieces (dimensions approximately $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, total thickness 26 cm , 4 cm porous concrete with differing compositions and a voids content of about 25 %) were stored in the open in the grounds of the Research Institute three days after application of the bond coat and porous concrete (“fresh on solid” construction). The influence of different polymer dispersions (10 wt. % solids) with and without addition of silicon fume (5 wt. % solids) was investigated (Nos. 19 to 21 and 22). After they had been placed outside the sides of the slabs were sealed with polystyrene and heaped sand. Temperature sensors were concreted into the middle of one slab at different depths in order to determine the number of freeze-thaw cycles.

4.4 Tests

4.4.1 Porous concrete

a) Voids content

The voids content of the concrete which is accessible to water was determined at 26 days by the dipping and weighing method using the four 150 mm cubes intended for compressive strength testing [15]. The cubes were allowed to dry out again before the strength testing.

b) Strengths

The compressive strength was tested at 28 days as specified in DIN 1048 on the four cubes of 150 mm edge length. Experience shows that there is greater spread with porous concrete test pieces so the test was carried out with four cubes instead of the normal three. The flexural tensile strength was tested at 28 days as speci-

peraturmessfühler in der Mitte einer Platte in verschiedenen Höhenlagen einbetoniert.

4.4 Prüfungen

4.4.1 Dränbeton

a) Hohlraumgehalt

Im Alter von 26 Tagen wurde der für Wasser zugängliche Hohlraumgehalt des Betons an den vier für die Druckfestigkeitsprüfung vorgesehenen 150-mm-Würfeln durch Tauchwägung [15] ermittelt. Bis zur Festigkeitsprüfung konnten die Würfel wieder austrocknen.

b) Festigkeiten

Die Druckfestigkeit wurde nach DIN 1048 an vier Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 28 Tagen geprüft. Da Dränbeton-Probekörper erfahrungsgemäß stärker streuen, wurden vier anstatt üblicherweise drei Würfel geprüft. Die Biegezugfestigkeit wurde nach DIN 1048 an drei Balken ($H \times B \times L = 10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$, Belastung durch Einzellast in Balkenmitte) und die Spaltzugfestigkeit nach DIN 1048 an den Reststücken der Biegezugbalken im Alter von 28 Tagen geprüft.

c) Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde mit dem Fußbad- und dem Würfelverfahren geprüft. Im Fußbadverfahren wurden 10-cm-Würfel in einem Fußbad (1 cm Höhe) aus 3%iger NaCl-Lösung eingefroren und aufgetaut. Im Würfelverfahren [14] „Einfrieren in Luft/Tauen in Tausalzlösung“ wurden 10-cm-Würfel in Luft eingefroren und in 3%iger NaCl-Lösung aufgetaut. Vor dem Einfrieren wurden die Probekörper zum Entwässern eine halbe Stunde bei 20 °C auf Dreikantleisten gestellt. Nach jeweils zehn Frost-Tau-Wechseln wurde der Gewichtsverlust und die Schalllaufzeit bestimmt (Nr. 1 und 6 bis 18). Aus der Schalllaufzeit wurde der dynamische E-Modul berechnet [27]. Die Würfel wurden senkrecht zur Herstellerseite durchschallt, d.h. die Messköpfe zur Messung der Schalllaufzeit wurden auf der Herstellerober- und -unterseite befestigt.

d) Quellen und Schwinden

Die Längenänderung der Balken wurde mit einem Setzdehnungsmesser bestimmt und hieraus die Dehnung ermittelt.

4.4.2 Verbundprobekörper

a) Kleinformatige Platten

– Haftzugfestigkeit

Durch den Dränbeton hindurch wurde an vier Stellen rd. 1 cm in den Unterbeton gebohrt. Anschließend wurden Abreißstempel (Durchmesser 5 cm) aufgeklebt und nach dem Aushärten des Klebers mit einem Haftzugprüfgerät die Haftzugfestigkeit nach ZTV-SIB [19] geprüft.

– Frost-Tausalz-Prüfung

Die Verbundprobekörper wurden in Anlehnung an das Plattenverfahren [18] geprüft. Auf die Platten wurde soviel 3%ige NaCl-Lösung aufgegossen, dass der Dränbeton in einer Schichtdicke von 3 mm bis 5 mm über der Haftbrücke mit Lösung gefüllt war. 28 Tage nach der Herstellung des Dränbetons wurde mit der Prüfung begonnen. Insgesamt wurden je Beton vier Platten in die Frostruhe und vier Platten im Klimaraum 20 °C/65 % r.F. eingelagert. Nach 25, 50, 75 und 100 Frost-Tau-Wechseln wurde je eine Platte aus der Frostruhe und zeitgleich aus dem Klimaraum entnommen und an jeder Platte vier Haftzugprüfungen durchgeführt. An einer zusätzlichen Platte wurde im Alter von 28 Tagen die Haftzugfestigkeit bestimmt.

b) Großformatige Platten

Bei Unterschreiten der Außentemperatur von 0 °C wurden 40 g Salz je m² auf die Platten aufgestreut, um eine praxisgerechte Beanspruchung zu simulieren. Nach 56 Tagen, 6 Monaten, 1 Jahr und rd. 2,5 Jahren nach dem Aufbringen des Dränbetons wurde im Bereich der Plattenmitte jeweils an drei Stellen die Haftzugfestigkeit bestimmt.

5 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

5.1 Dränbeton

5.1.1 Hohlraumgehalt

Bei einem Dränbeton muss zwischen dem rechnerisch ermittelten Hohlraumgehalt und dem für das Wasser zugänglichen Hohlraumgehalt unterschieden werden. Bei einem rechnerischen Hohlraum-

gehalt in DIN 1048 on three beams ($D \times W \times L = 10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ with a single load at the centre of the beam), and the splitting tensile strength was tested as specified in DIN 1048 on the pieces remaining from the flexural tensile beams.

c) Resistance to freeze-thaw with de-icing salt

The resistance to freeze-thaw with de-icing salt was tested by the footbath method and the cube method. In the footbath method 10 cm cubes were frozen and thawed in a footbath (1 cm depth) of 3 % NaCl solution. In the cube method [14] “Freezing in air / thawing in de-icing salt solution” 20 cm cubes are frozen in air and thawed in 3 % NaCl solution. Before freezing the test pieces were placed on triangular strips for half an hour at 20 °C to drain. The weight loss and the acoustic transit time were determined after every ten freeze-thaw cycles (Nos. 1 and 6 to 18). The dynamic modulus of elasticity was calculated from the acoustic transit time [27]. The sound was passed through the cube perpendicular to the surface which was on top during production, i.e. the measuring heads for measuring the acoustic transit time were attached to the top and bottom production surfaces.

d) Swelling and shrinkage

The changes in length of the beams were measured with a stress-probing extensometer and used to calculate the strain.

4.4.2 Composite test pieces

a) Small slabs

– Pull-off strength

Holes were drilled at four points through the porous concrete and about 1 cm into the base course concrete. Pull-off plungers (diameter 5 cm) were glued in place and after the adhesive had hardened the pull-off strength was tested as specified in ZTV-SIB [19] in a pull-off test unit.

– Freeze-thaw testing with de-icing salt

The composite test pieces were tested using the slab method [18]. Sufficient 3 % NaCl solution was poured onto the slabs to fill the porous concrete with solution in a layer thickness of 3 mm to 5 mm above the bond coat. The testing started 28 days after production of the porous concrete. For each concrete a total of four slabs were stored in the frost cabinet and four slabs in the 20 °C/65 % r.h. climatic chamber. After 25, 50, 75 and 100 freeze-thaw cycles one slab was taken from the frost cabinet and at the same time one was taken from the climatic chamber, and four pull-off tests were carried out on each slab. The pull-off strength was determined on an additional slab at the age of 28 days.

b) Large slabs

40 g salt per m² were scattered on the slabs when the external temperature fell below 0 °C to simulate realistic exposure. The pull-off strength was determined at three points near the middle of the slab at 56 days, 6 months, 1 year and about 2.5 years after application of the porous concrete.

5 Presentation and discussion of the test results

5.1 Porous concrete

5.1.1 Voids content

With a porous concrete it is necessary to differentiate between the calculated voids content and the voids content which is accessible to water. With a calculated voids content of about 30 % the proportion of pores which are not accessible to water is low, so the two characteristic values are virtually identical. The proportion of closed pores increases with decreasing voids content (Figure 1). This result agrees well with the relationships found for covering layers of open-pore asphalt [20].

5.1.2 Strength

Compressive, flexural tensile, and splitting tensile strengths are influenced heavily by the voids content (Figure 2). The splitting tensile strength is not shown separately as it developed parallel to the flexural tensile strength. Because of the dependence of the porous concrete properties on the voids content the effects of different parameters can only be assessed if the test pieces have the same voids content. It was not possible in the test to produce all test pieces with identical voids content so the regression line determined for

gehalt von rd. 30 % ist der Anteil nicht Wasser zugänglicher Poren gering, so dass beide Kennwerte nahezu identisch sind. Mit abnehmendem Hohlraumgehalt nimmt der Anteil geschlossener Poren zu (Bild 1). Dieses Ergebnis stimmt gut mit den für offenporige Asphaltdeckschichten gefundenen Zusammenhängen überein [20].

5.1.2 Festigkeit

Druck-, Biege- und Spaltzugfestigkeit werden vorrangig vom Hohlraumgehalt beeinflusst (Bild 2). Die Spaltzugfestigkeit wird nicht gesondert dargestellt, da sie sich parallel zur Biegezugfestigkeit entwickelte. Infolge der Abhängigkeit der Dränbetoneigenschaften vom Hohlraumgehalt können die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter nur bei gleichem Hohlraumgehalt der Prüfkörper beurteilt werden. Da es versuchstechnisch nicht möglich war, alle Prüfkörper mit identischem Hohlraumgehalt herzustellen, wurde zur Erleichterung der Interpretation der Versuchsergebnisse die für die Mischung 1 ermittelte Regressionsgerade für den Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und Festigkeit herangezogen (Bild 3).

Größtkorn des Sandes, Sandanteil des Zuschlags, Zementgehalt oder Art der Polymerdispersion hatten nur einen sehr geringen Einfluss auf die Festigkeit. Die Abweichungen lagen i.A. im Rahmen der Prüfstreuung. Eine Erhöhung des Polymergehalts führte nur zu einem Anstieg der Biege- und Spaltzugfestigkeit, nicht zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit (Bild 3). Bei Erhöhung der Polymer-Zugabe wird im Zementstein zunehmend ein durchgehendes Kunststoffgeflecht erzeugt, das eine vernetzende Funktion ausübt und durch die direkte Haftung an Zuschlagkörnern den Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein verbessert [28].

Die Zugabe von Silicastaub brachte im Gegensatz zu anderen Untersuchungen [21, 22] keine Festigkeitssteigerungen. Bei einer Silica-Zugabe von 10 Gew.-% (Nr. 15, 16) wies der Dränbeton z.T. sogar geringere Festigkeiten auf. Trotz der Zugabe eines Fließmittels (2 % vom Zementgehalt) war der Zementleim sehr steif, so dass er die Zuschlagkörner nicht mehr optimal „verkleben“ konnte. Erst eine Senkung des Silicastaubgehalts auf 5 Gew.-% Feststoff, eine Fließmitteldosierung von 2 Gew.-% und die gleichzeitige Verwendung einer Polymerdispersion verbesserte die Verarbeitbarkeit und erhöhte die Biegezugfestigkeit.

Die Anforderungen der ZTV-Beton [23] an die Druckfestigkeit (B35 für Bauklasse SV für hoch belastete Autobahnen) wurde

mix 1 for the relationship between voids content and strength was used to assist the interpretation of the test results (Figure 3).

The maximum particle size of the sand, the proportion of sand in the aggregate, the cement content and the nature of the polymer dispersion had only very slight influence on the strength. The deviations generally lay within the limits of experimental error. Increasing the polymer content led only to increases in the flexural tensile and flexural splitting strengths but not to an increase in the compressive strength (Figure 3). Raising the polymer addition generates a continuous network of synthetic material in the hardened cement paste; this has a cross-linking function and improves the bond between aggregate and hardened cement paste through direct adhesion to grains of aggregate [28].

In contrast to other investigations [21, 22] the addition of silica fume did not result in any increase in strength. At a silica addition of 10 wt. % (Nos. 15, 16) the porous concrete sometimes even exhibited lower strengths. In spite of the addition of a superplasticizer (2 % of the cement content) the cement paste was very stiff so that it could no longer optimally “glue” the grains of aggregate together. Only with a reduction of the silica fume content to 5 wt. % solids, a superplasticizer dosage of 2 wt. % and the simultaneous use of a polymer dispersion was it possible to improve the workability and raise the flexural tensile strength.

The requirements of ZTV-Beton [23] for the compressive strength (B 35 for Construction Class SV for heavily loaded auto-

Bild 1: Zusammenhang zwischen dem rechnerischen und dem für Wasser zugänglichen Hohlraumgehalt der Dränbetone

Fig. 1: Relationship between the calculated voids content of porous concretes and the voids content accessible to water

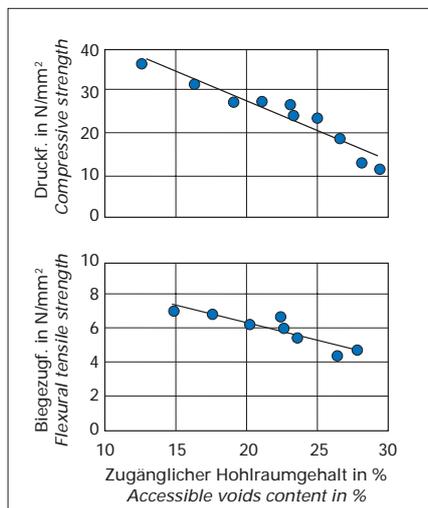
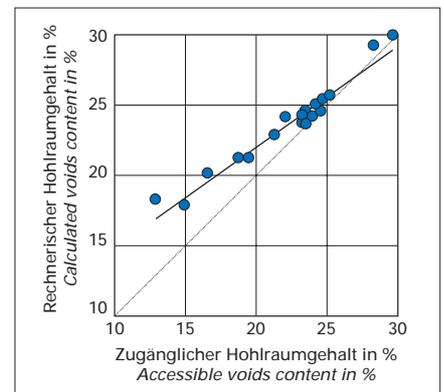


Bild 2: Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom zugänglichen Hohlraumgehalt

Fig. 2: Compressive strength and flexural tensile strength as a function of the accessible voids content

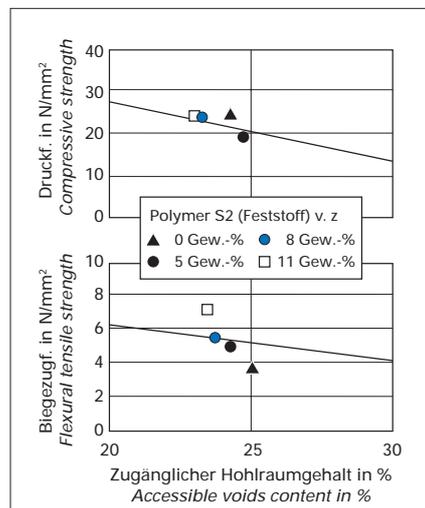


Bild 3: Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom zugänglichen Hohlraumgehalt und von der Dosierung der Polymerdispersion S2

Fig. 3: Compressive strength and flexural tensile strength as a function of the accessible voids content and of the dosage of polymer dispersion S2

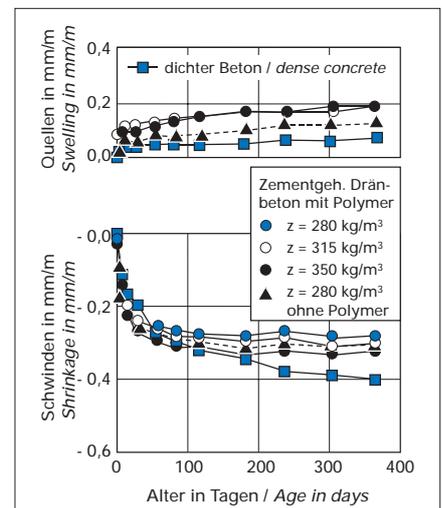


Bild 4: Quellen und Schwinden der Betonbalken in Abhängigkeit vom Alter der Probekörper und von der Mischungszusammensetzung

Fig. 4: Swelling and shrinkage of the concrete beams as a function of the age of the test specimens and of the mix composition

von den Dränbetonen mit 25 % zugänglichem Hohlraumgehalt nicht erfüllt. Die wesentlich wichtigere Anforderung an die Biegezugfestigkeit ($5,5 \text{ N/mm}^2$) ließ sich bei Verwendung einer Polymerdispersion in einer Dosierung an der Obergrenze der vom Hersteller angegebenen höchstzulässigen Zugabemenge gerade einhalten (Bild 3).

5.1.3 Quellen und Schwinden

Mit zunehmendem Zementsteingehalt war bei den Dränbetonen, wie erwartet, eine geringe Zunahme des Schwindens zu beobachten, während das Quellen nahezu identisch blieb (Bild 4). Das etwas größere Quellen der polymermodifizierten Dränbetone im Vergleich zum dichten Fahrbahndeckenbeton wird möglicherweise durch ein stärkeres Quellen des erhärteten Polymers hervorgerufen. Das Schwinden der Dränbetone war zu Beginn geringfügig größer, im Alter von drei bis neun Monaten jedoch kleiner als das des dichten Straßenbetons. Der Zementstein des Dränbetons kann infolge der Offenporigkeit des Betons schneller austrocknen als der Zementstein eines gefügedichten Betons. Durch den höheren Wassergehalt schwindet der dichte Beton jedoch nach rd. einem Jahr etwas stärker. Ein stärkeres Quellen und Schwinden kunststoffmodifizierter Betone wurde in [24, 25] festgestellt und mit größeren feuchtebedingten Verformungen des kunststoffsgegenüber dem Zementstein begründet [25]. In der Praxis sind die Quell- und Schwindverformungen wesentlich kleiner (nur rd. 50 % der im Labor auftretenden), da die Betone nicht langfristig dem Wasser ausgesetzt sind und eine höhere Umgebungfeuchte [26] vorherrscht. Die Versuche zeigen, dass sich unter natürlichen Feuchtebedingungen das Verformungsverhalten der geprüften Dränbetone mit und ohne Kunststoffzusatz nicht wesentlich vom Verhalten dichter Straßenbetone unterscheidet. Bei der Bauweise „frisch auf frisch“ sind daher die Beanspruchungen in der Verbundfuge infolge unterschiedlicher Verformungseigenschaften gering. Wenn die Betone zu unterschiedlichen Zeitpunkten hergestellt werden (Bauweise „frisch auf fest“), können die Beanspruchungen geringfügig höher sein.

5.1.4 Frost-Tausalz-Widerstand

Bei den meisten Betonen mussten die Prüfungen vor Erreichen der vorgesehenen 100 Frost-Tau-Wechsel wegen starker Schädigung abgebrochen werden. Mit beiden Prüfverfahren (siehe Abschnitt 4.4) wurde der Frost-Tausalz-Widerstand der unterschiedlich zusammengesetzten Dränbetone in etwa gleich beurteilt. Es wird deshalb in den Bildern 5 bis 7 nur das Würfelverfahren mit Einfrieren an Luft und Tauen in 3%iger Tausalzlösung dargestellt.

Eine Frost- bzw. eine Frost-Tausalz-Schädigung ist bei normalen dichten Betonen in erster Linie auf physikalische Wechselwirkungen zurückzuführen. Während einer Einleitungsphase verursachen die Frost-Tau-Wechsel eine gegenüber der kapillaren Wasseraufnahme wesentlich intensivere Wasseraufnahme der Zementsteinmatrix des Probekörpers. Nach Erreichen des kritischen Wassergehalts beginnt die Schädigung. Dichte Betone mit w/z-Werten von 0,25 weisen einen sehr hohen Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand auf, da der kritische Sättigungsgrad nicht erreicht wird. Innerhalb von 100 Frost-Tau-Wechseln kommt es bei diesen Betonen weder zu einem Abwittern noch zu einer inneren Gefügeschädigung.

Dränbeton ohne Polymerdispersion wird dagegen nach sehr wenigen Frost-Tau-Wechseln vollkommen zerstört. Es ist anzunehmen, dass der durch die Offenporigkeit des Dränbetons von allen Seiten gut zugängliche Kontaktbereich zwischen Zementstein und Zuschlag innerhalb des gesamten Dränbetons viel Wasser aufnimmt. Der kritische Sättigungsgrad wird schnell erreicht. Die dann ausgelöste Schädigung des Verbundes zwischen Zuschlag und Zementstein zerstört den Beton bereits nach wenigen Wechseln (Bild 5). Darauf weist auch die augenscheinliche Beurteilung der Probekörper und der abgewitterten Bestandteile hin. Eine Schädigung des Zuschlags oder des wegen des niedrigen w/z-Werts sehr dichten Zementsteins außerhalb des Kontaktbereichs zum Zuschlag konnte nicht beobachtet werden. Inwieweit unterschiedliche

ible voids content. The substantially more important requirements for flexural tensile strength ($5,5 \text{ N/mm}^2$) could just be achieved when using a polymer dispersion at a dosage at the upper limit of the highest permissible addition level specified by the manufacturer (Figure 3).

5.1.3 Swelling and shrinkage

As expected, a slight increase in shrinkage was observed with increasing content of hardened cement paste in the porous concretes, while the swelling remained virtually identical (Figure 4). The somewhat greater swelling of the polymer-modified porous concretes when compared to dense pavement concretes is possibly caused by greater swelling of the hardened polymer. Initially the shrinkage of the porous concretes was slightly greater, but at ages of three to nine months was smaller than that of the dense road concrete. Because of the open pores of the concrete the hardened cement paste in porous concrete can dry out more rapidly than the hardened cement paste in a concrete with dense microstructure. However, due to the higher water content the dense concrete shrinks somewhat more strongly after about one year. The greater swelling and shrinkage of synthetically modified concretes was established in [24, 25] and attributed to greater movement of the synthetic material due to moisture when compared with the hardened cement paste [25]. The swelling and shrinkage movements are substantially smaller in practice (only about 50 % of the values found in the laboratory) as the concretes are not exposed long-term to water and the predominant ambient moisture level is higher [26]. The tests showed that under natural moisture conditions the deformation characteristics of the porous concretes tested with and without the addition of synthetics do not differ substantially from the behaviour of dense road concretes. In the “fresh on fresh” method of construction the stresses at the joint due to different deformation characteristics are therefore low. The stresses can be slightly higher if the concretes are produced at different times (“fresh on solid” construction).

5.1.4 Resistance to freeze-thaw with de-icing salt

With the majority of concretes the testing had to be discontinued because of severe damage before the intended 100 freeze-thaw cycles had been completed. The two test methods (see Section 4.4) produced approximately the same assessment for the resistance to freeze-thaw with de-icing salt of porous concretes with differing compositions. Figures 5 to 7 therefore only show the cube method with freezing in air and thawing in 3 % de-icing salt solution.

Damage due to freeze-thaw or to freeze-thaw with de-icing salt in normal dense concretes can be attributed primarily to alternating physical effects. During an introductory phase the freeze-thaw cycles cause substantially more intense take-up of water into the hardened cement paste matrix of the test piece than occurs with capillary water absorption. The damage starts after the critical water content has been reached. Dense concretes with w/c ratios of 0.25 have a very high resistance to freeze-thaw and to freeze-thaw with de-icing salt as they do not reach the critical saturation level. Neither weathering loss nor damage to the internal structure occurs in these concretes within the 100 freeze-thaw cycles.

On the other hand, porous concrete without any polymer dispersion is completely destroyed after very few freeze-thaw cycles. Due to the open pores of the porous concrete the contact area between the hardened cement paste and aggregate throughout the porous concrete is readily accessible from all sides and can be assumed to take up a great deal of water. The critical saturation level is reached rapidly. The damage which then occurs to the bond between aggregate and hardened cement paste destroys the concrete after only a few cycles (Figure 5). This is also indicated by visual assessment of the test pieces and of the weathered components. No damage was observed to the aggregate or to the cement paste, which is very dense because of the low w/c ratio, outside the contact region. The extent to which different coefficients of expansion between aggregate and mortar matrix contribute to this damage could not be deduced from the investigations. The addition of a polymer dispersion made a slight improvement to the resistance to freeze-thaw with de-icing salt, but no significant difference could be established between the three polymers used on the basis of this invest-

Ausdehnungskoeffizienten zwischen Zuschlag- und Mörtelmatrix zu diesem Schaden beitragen, lässt sich aus den Untersuchungen nicht ableiten. Der Zusatz einer Polymerdispersion verbesserte den Frost-Tausalz-Widerstand geringfügig. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den drei verwendeten Polymeren konnte anhand dieser Untersuchung nicht festgestellt werden (Bild 6). Auch bei zunehmendem Gehalt an Polymer (Bild 5) wurde kein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand erreicht. Eine starke Zunahme der Abwitterung wurde zwar mit steigendem Polymeranteil erst bei höherer Frost-Tauwechsel-Anzahl bemerkbar, die innere Gefügeschädigung bestimmt an Hand der Änderung des dynamischen E-Moduls trat jedoch bei den unterschiedlichen Polymergehalten immer schon ab 20 Frost-Tau-Wechseln ein.

Da in erster Linie der Kontaktbereich zwischen Zuschlag und Zementstein geschädigt wurde, lag es nahe, diesen Übergangsbereich durch Zugabe von Silicastaub zu verbessern (siehe Bild 7). Die Zugabe von Silicastaub allein (Feststoffgehalt 10 Gew.-%, Beton 15) ohne Polymer führte nicht zu dem gewünschten Erfolg, da der Mörtel sich zu schlecht verarbeiten ließ und die Zuschläge nicht gleichmäßig umhüllt wurden. Dränbeton, der sowohl eine Polymerdispersion als auch Silicastaub enthielt, zeigte einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand. Weder trat bei der Prüfung eine deutliche Abwitterung auf noch kam es zu einem deutlichen Abfall des dynamischen E-Moduls. Es ist anzunehmen, dass das Gefüge des Zementsteins im Übergangsbereich zum Zuschlag so dicht wurde, dass auch hier die kritische Sättigung während des Versuchs nicht erreicht wurde. Ob allerdings in Verbindung mit einem Polymer schon ein Gehalt von 2,5 % Silicastaub ausreicht, muss weiter geklärt werden, da dieser Beton (Nr. 18) ab 80 Frost-Tau-Wechseln eine wenn auch geringe Abnahme des dynamischen E-Moduls aufwies.

Eine Änderung des Wasserzementwerts zwischen 0,25 und 0,30 und des Zementgehalts zwischen 280 kg/m³ und 350 kg/m³ brachte bei dem Dränbeton mit Polymer keine wesentliche Änderung des Frost-Tausalz-Widerstands. Selbst die Verringerung des Hohlraumgehalts von 28 % auf 19 % verbesserte den Frost-Tausalz-Widerstand nur geringfügig.

igation (Figure 6). Adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt could not be achieved even when the polymer content was increased (Figure 5). A sharp increase in the weathering loss with rising proportion of polymer did in fact only become noticeable after quite a large number of freeze-thaw cycles, but the damage to the internal structure determined from the change in dynamic modulus of elasticity always occurred after 20 freeze-thaw cycles with the different levels of polymer.

As the damage occurred primarily in the contact area between aggregate and hardened cement paste it was clear that this transition area might be improved by the addition of silica fume (see Figure 7). The addition of silica fume alone (solids content 10 wt. %, concrete 15) without polymer did not produce the desired success as the workability of the mortar was too poor and the aggregate particles were not uniformly encased. Porous concrete which contains a polymer dispersion as well as silica fume exhibited adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt. Neither a significant weathering loss nor a significant drop in dynamic modulus of elasticity occurred during the testing. It can be assumed that the microstructure of the hardened cement paste became so dense in the transition area to the aggregate that it did not reach the critical saturation level during the test. However, further clarification is needed to find whether a content of 2.5 % silica fume in conjunction with a polymer is sufficient as this concrete (No. 18) exhibited a drop, even though slight, in the dynamic modulus of elasticity after 80 freeze-thaw cycles.

A change in the water/cement ratio between 0.25 and 0.30 and in the cement content between 280 kg/m³ and 350 kg/m³ produced no substantial change in the resistance to freeze-thaw with de-icing salt in the porous concrete with polymer. Even the reduction in voids content from 28 % to 19 % produced only a slight improvement in the resistance to freeze-thaw with de-icing salt.

5.2 Composite test pieces

5.2.1 Laboratory investigations with small slabs

Testing the characteristics of the bond between open-pore porous concrete and dense base course concrete gave the following results:

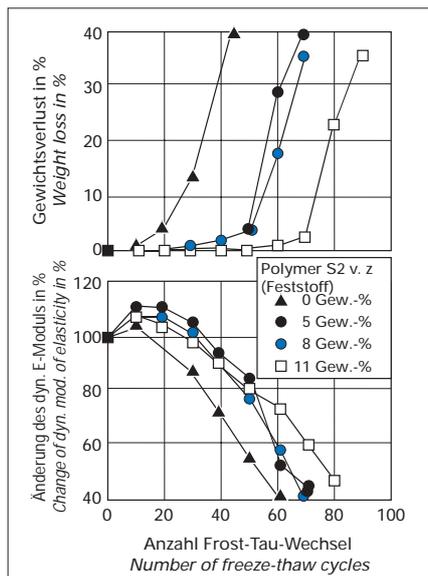


Bild 5: Gewichtsverlust und Änderung des dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Dosierung der Polymerdispersion S2 bei dem Prüfverfahren „Einfrieren an Luft/Tauen in Tausalzlösung“

Fig. 5: Weight loss and change of dynamic modulus of elasticity as a function of the number of freeze-thaw cycles and the dosage of polymer dispersion S2 using the "freezing in air/thawing in a solution of de-icing salt" test method

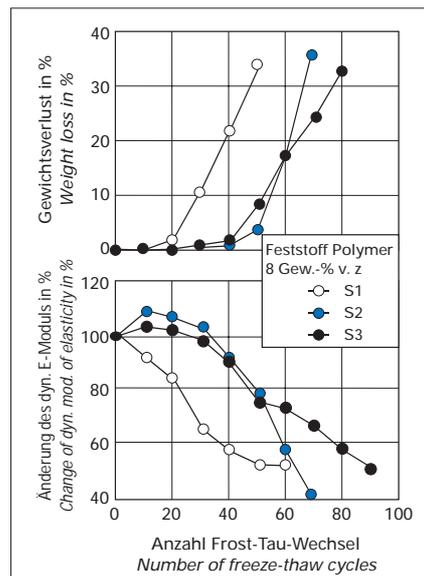


Bild 6: Gewichtsverlust und Änderung des dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Polymerdispersion bei dem Prüfverfahren „Einfrieren an Luft/Tauen in Tausalzlösung“

Fig. 6: Weight loss and change of dynamic modulus of elasticity as a function of the number of freeze-thaw cycles and of the polymer dispersion using the "freezing in air/thawing in a solution of de-icing salt" test method

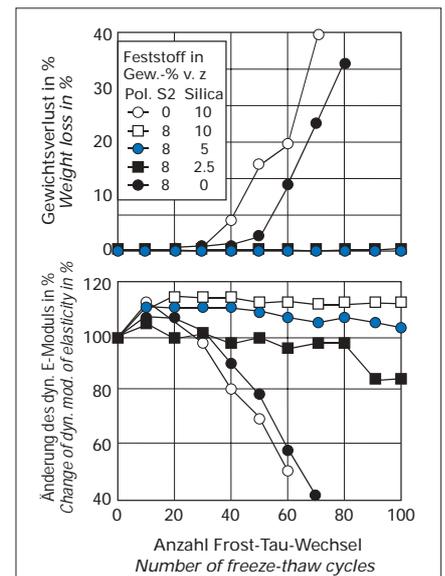


Bild 7: Gewichtsverlust und Änderung des dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der Zugabe der Polymerdispersion S2 und/oder Silicastaub bei dem Prüfverfahren „Einfrieren an Luft/Tauen in Tausalzlösung“

Fig. 7: Weight loss and change of dynamic modulus of elasticity as a function of the number of freeze-thaw cycles and the addition of polymer dispersion S2 and/or silica fume, using the "freezing in air/thawing in a solution of de-icing salt" test method

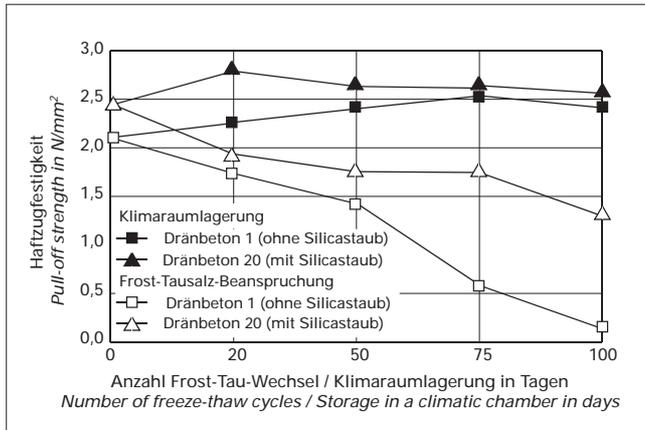


Bild 8: Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bzw. der Dauer der Klimaraumlagerung
 Fig. 8: Pull-off strength as a function of the number of freeze-thaw cycles and of the duration of storage in a climatic chamber

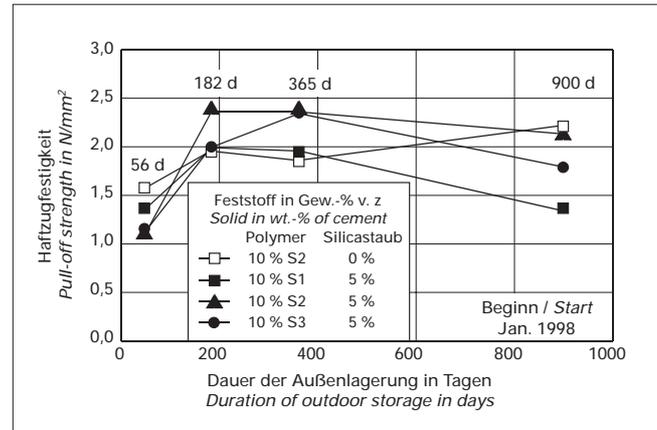


Bild 9: Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Dauer der Außenlagerung und der Mischungszusammensetzung des Dränbetons
 Fig. 9: Pull-off strength as a function of the duration of outdoor storage and of the mix composition of the porous concrete

5.2 Verbundprobekörper

5.2.1 Laboruntersuchungen mit kleinformatischen Platten

Die Prüfungen des Verbundverhaltens zwischen offenporigem Dränbeton und dichtem Unterbeton ergaben folgende Ergebnisse:

– Haftzugfestigkeit bei Lagerung im Klimaraum

Die Haftzugfestigkeit stieg mit der Dauer der Klimaraumlagerung nur geringfügig an (Bild 8) und betrug 28 Tage nach dem Aufbringen des Dränbetons rd. 2,5 N/mm² (Nr. 1, 20). Die Zugabe von Silicastaub (5 Gew.-% Feststoff) und eine Erhöhung der Polymer-Zugabe von 8 Gew.-% auf 10 Gew.-% Feststoff (Nr. 20) verbesserte den Verbund. Der Bruch verlief mit wenigen Ausnahmen im Dränbeton.

– Haftzugfestigkeit nach Frost-Tausalz-Beanspruchung

Die Haftzugfestigkeiten sanken nach 50 Frost-Tau-Wechseln bei dem Dränbeton 1 ohne Silicastaub von rd. 2,1 N/mm² auf 1,4 N/mm² (Bild 8). Zu diesem Zeitpunkt versagte zum Teil die Haftbrücke und zum Teil der Dränbeton. Beim Versagen des Dränbetons verlief der Bruch immer 0,50 cm bis 1,00 cm oberhalb der Verbundfuge. Nach 75 Frost-Tau-Wechseln versagte stets die Haftbrücke. Nach 100 Frost-Tau-Wechseln sank die Haftzugfestigkeit auf rd. 0,2 N/mm² ab. Durch Zugabe von Silicastaub (Nr. 20) ließ sich der Abfall der Haftzugfestigkeit durch die Frost-Tausalz-Beanspruchung verringern (Bild 8).

5.2.2 Außenlagerung großformatiger Platten

Vier Platten wurden Anfang Januar 1998 drei Tage nach dem Betonieren der Dränbetone (Nr. 19 bis 22) ausgelagert. In den ersten beiden Wochen nach Auslagerung war kein Frost zu verzeichnen. Im Gegensatz zu den kleinformatischen Laborprobekörpern (Temperaturwechsel zwischen +20 °C und -20 °C) waren die großformatigen Platten in der Außenlagerung infolge der milden Winter einer vergleichsweise geringen Temperaturbeanspruchung unterworfen. Die Temperaturmessungen im Dränbeton (Messfühler in Plattenmitte 0,50 cm über der Verbundfuge) ergaben während eines Zeitraums von rd. 2,5 Jahren (1/1998 bis 5/2000) nur 15 Frost-Tau-Wechsel mit einer Tiefsttemperatur von rd. -5 °C. Die Haftzugfestigkeit erreichte 56 Tage nach dem Aufbringen des Dränbetons infolge der verzögerten Festigkeitsentwicklung durch die anfänglichen niedrigen Umgebungstemperaturen nur Werte zwischen 1,0 N/mm² und 1,5 N/mm² und stieg danach bis auf rd. 1,8 N/mm² bis 2,5 N/mm² an (Bild 9). Ein Abfall der Haftzugfestigkeit konnte bis zum Alter von einem Jahr bei keiner Mischungszusammensetzung festgestellt werden. Auch Unterschiede in der Mischungszusammensetzung machten sich kaum bemerkbar. Erst bei der Prüfung nach 2,5 Jahren war bei den Dränbetonen 19 und 21 (Polymer S1 bzw. S3 und Silicastaub) erstmals eine Verringerung der Haftzugfestigkeit um rd. 0,6 N/mm² festzustellen.

– Pull-off strength on storage in climatic chamber

The pull-off strength increased only slightly with the duration of the climatic chamber storage (Figure 8) and was approximately 2.5 N/mm² (Nos. 1, 20) 28 days after application of the porous concrete. The addition of silica fume (5 wt. % solids) and an increase in the polymer addition from 8 wt. % to 10 wt. % solids (No. 20) improved the bond. With few exceptions the fracture took place in the porous concrete.

– Pull-off strength after stressing by freeze-thaw with de-icing salt

With porous concrete 1 without silica fume the pull-off strength fell after 50 freeze-thaw cycles from about 2.1 N/mm² to 1.4 N/mm² (Figure 8). At this point the failure was sometimes in the bond coat and sometimes in the porous concrete. When the failure lay in the porous concrete the fracture always ran 0.50 cm to 1.00 cm above the joint. After 75 freeze-thaw cycles the failure always occurred in the bond coat. After 100 freeze-thaw cycles the pull-off strength had fallen to about 0.2 N/mm². The drop in pull-off strength caused by the stressing by freeze-thaw with de-icing salt was reduced by the addition of silica fume (No. 20) (Figure 8).

5.2.2 Outside storage of large slabs

At the beginning of January 1998 four slabs were placed in outside storage three days after placing the porous concrete (Nos. 19 to 22). No frost occurred in the first two weeks after the outside storage. Due to the mild winter the large slabs in the outside store were subjected to comparatively little temperature stressing when compared with the small laboratory test pieces (temperature cycle between +20 °C and -20 °C). The temperature measurements in the porous concrete (sensor in the centre of the slab 0.50 cm above the joint) showed only 15 freeze-thaw cycles with a lowest temperature of about -5 °C during a period of about 2.5 years (1/1998 to 5/2000). Due to the delayed strength development caused by the initially lower ambient temperatures the pull-off strength only reached values of between 1.0 N/mm² and 1.5 N/mm² 56 days after application of the porous concrete, after which it rose to about 1.8 N/mm² to 2.5 N/mm² (Figure 9). Up to one year no drop in pull-off strength was observed with any of the mix compositions. There were also hardly any appreciable differences between the mix compositions. Only in the test after 2.5 years was a reduction in pull-off strength by about 0.6 N/mm² detected in porous concretes 19 and 21 (polymers S1 or S3 with silica fume).

6 Summary

The laboratory investigations were intended to examine questions about the long-term characteristics of open-pore porous concretes and the durability of the bond between open-pore top concrete and the dense base course concrete. The strength properties – compressive, flexural tensile, and tensile splitting strengths – of porous concretes with the differing compositions were established and

6 Zusammenfassung

Mit den Laboruntersuchungen sollten Fragen zum Langzeitverhalten offenporiger Dränbetone und zur Dauerhaftigkeit des Verbunds zwischen offenporigem Oberbeton und dichtem Unterbeton untersucht werden. Hierzu wurden die Festigkeitseigenschaften – Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit – verschieden zusammengesetzter Dränbetone ermittelt sowie deren Frost-Tausalz-Widerstand mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht. In orientierenden Versuchen wurden Schwinden und Quellen bestimmt. Die Dauerhaftigkeit des Verbunds wurde an Verbundprobekörpern durch die Prüfung der Haftzugfestigkeit beurteilt. Es ergaben sich folgende Einflüsse auf die Eigenschaften des Dränbetons und die Dauerhaftigkeit des Verbunds:

- Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit des Dränbetons werden in erster Linie vom Hohlraumgehalt beeinflusst. Mit steigendem Hohlraumgehalt vermindert sich die Festigkeit. Daher sollte bei der Herstellung des Dränbetons der vorgesehene Hohlraumgehalt, der aus lärmtechnischen Gründen bei etwa 25 % liegen sollte, nicht überschritten werden. Die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit lässt sich durch die Zugabe einer Polymerdispersion steigern. Trotz dieser Festigkeitssteigerung kann die Druckfestigkeitsanforderung der ZTV-Beton für hoch belastete Autobahnen (Bauklasse SV) nicht eingehalten werden. Allerdings kann die geforderte Biegezugfestigkeit durch die Zugabe einer Polymerdispersion erreicht werden.

- Quellen und Schwinden der Dränbetone und des dichten Straßenbetons unterschieden sich kaum, so dass bei den geprüften Betonen hierdurch keine wesentliche zusätzliche Beanspruchung in der Verbundzone auftrat.

- Der Frost-Tausalz-Widerstand lässt sich durch die Verringerung des Hohlraumgehalts und eine möglichst hoch dosierte Zugabe einer geeigneten Polymerdispersion geringfügig verbessern. Bei den Laborprüfungen ließ sich aber ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand nur erzielen, wenn dem Beton gleichzeitig zum Polymer auch Silicastaub zugegeben wurde. Der Silicastaub verbessert die Haftung des Zementleims am Zuschlag und die Grünstandfestigkeit, verschlechtert allerdings die Verarbeitbarkeit.

- Die Entwicklung der Haftzugfestigkeit bei kleinformatischen Probekörpern aus offenporigem Dränbeton und dichtem Unterbeton zeigt, dass infolge einer Frost-Tausalz-Beanspruchung die Haftzugfestigkeit stark abfällt. Durch Silicastaub lässt sich dieser Abfall verringern. Großformatige Verbundprobekörper, die in einer rd. zweieinhalbjährigen Außenlagerung den natürlichen Witterungsbedingungen mit 15 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt waren, zeigten auch nach 2,5 Jahren noch keinen der Laborlagerung vergleichbaren starken Abfall der Haftzugfestigkeit.

- Nach den vorliegenden Laboruntersuchungen wird für weitere Erprobungen ein Dränbeton mit einem rechnerischen Hohlraumgehalt von maximal 25 %, einem Zementgehalt von rd. 280 kg/m³ bis 300 kg/m³ und einem w/z-Wert von rd. 0,25 empfohlen. Als Zuschlag sollte ein polierresistenter Splitt (PSV-Wert > 53) mit möglichst geringem Anteil an Überkorn verwendet werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen keinen nennenswerten positiven Einfluss einer Sandzugabe. Erfahrungsgemäß schwankt aber gerade bei Sanden die Eigenfeuchte stärker, so dass das Einhalten des vorgegebenen w/z-Werts bei dem ohnehin geringen Wassergehalt des Dränbetons erschwert wird. Daher sollte kein Sand verwendet werden. Als Zusatzmittel sollte eine Polymerdispersion in einer Dosierung von rd. 10 Gew.-% (Feststoff) und eine Silicastaubsuspension in einer Dosierung von mindestens 3,5 Gew.-% (Feststoff) verwendet werden. Um Erfahrungen mit der Verarbeitbarkeit eines Dränbetons mit Silicastaub zu sammeln, sollte zunächst eine Versuchsstrecke auf einer untergeordneten Verkehrsfläche gebaut werden.

- Der wichtige Einfluss dynamischer Beanspruchungen auf das Langzeitverhalten unter Verkehr wurde in der vorliegenden Arbeit mangels geeigneter Laborprüfverfahren nicht untersucht. Das Langzeitverhalten bzw. die Verarbeitbarkeit eines im Labor optimierten Dränbetons muss daher noch in der Praxis überprüft werden. Es muss festgestellt werden, ob nicht einzelne Zuschlagkörner an der Oberfläche des Dränbetons durch die Verkehrsbeanspruchung herausgerissen werden.

their resistance to freeze-thaw with de-icing salt was investigated by various test methods. Shrinkage and swelling were determined in preliminary investigative trials. The durability of the bond was assessed on composite test pieces by testing the pull-off strength. The following factors were found to affect the properties of the porous concrete and the durability of the bond:

- The compressive, flexural tensile, and tensile splitting strengths of the porous concrete are affected primarily by the voids content. The strength falls with increasing voids content. The specified voids content, which for acoustic reasons is 25 %, should therefore not be exceeded when producing the porous concrete. The flexural tensile and tensile splitting strengths can be increased by the addition of a polymer dispersion. In spite of this increase in strength it is not possible to comply with the compressive strength specification for road concrete for heavily loaded autobahns (construction class SV). However the required flexural tensile strength can be achieved by the addition of a polymer dispersion.

- There is hardly any difference between the swelling and shrinkage of porous concretes and of dense road concrete, so no substantial additional stresses occurred in the bond zone with the concretes tested.

- The resistance to freeze-thaw with de-icing salt can be improved by lowering the voids content and using the highest possible addition of a suitable polymer dispersion. However, the resistance to freeze-thaw with de-icing salt could only be improved substantially in the laboratory tests when silica fume was also added at the same time as the polymer. The addition of silica improves the green strength and the adhesion of the cement paste to the aggregate, but it impairs the workability.

- The development of the pull-off strength in small test pieces made of porous concrete and dense base course concrete shows that stressing by freeze-thaw with de-icing salt causes a sharp drop in the pull-off strength. This drop can be reduced by addition of silica fume. Large composite test pieces which had been exposed for about two and a half years to natural weather conditions with 15 freeze-thaw cycles during external storage showed none of the sharp drop in pull-off strength comparable to the laboratory storage even after 2.5 years.

- After these laboratory investigations it is recommended that further testing should be carried out on a porous concrete with a maximum theoretical voids content of 25 %, a cement content of about 280 kg/m³ to 300 kg/m³ and a w/c ratio of about 0.25. Polish-resistant chippings (PSV value > 53) with the smallest possible percentage of oversize material should be used as the aggregate. The results of the investigation show no appreciable beneficial effect from the addition of sand. In fact, experience shows that the inherent moisture content of sand varies quite sharply so that it becomes more difficult to maintain the specified w/c ratio at the water content of the porous concrete, which in any case is low. Therefore no sand should be used. A polymer dispersion at an addition of about 10 wt. % (solids) and a silica fume suspension at an addition of at least 3.5 wt. % (solids) should be used as admixtures. In order to gain experience with the workability of porous concrete made with silica fume a test section should be constructed initially on a secondary vehicle surface.

- The important influence of dynamic stressing on long-term behaviour under traffic was not investigated in this work through lack of suitable laboratory test methods. The long-term behaviour and the workability of a porous concrete which has been optimized in the laboratory must therefore still be tested under practical conditions. It is necessary to establish whether single chippings can be torn from the surface of the porous concrete by exposure to traffic wear.

Literatur

- [1] Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen RLS 90, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Ausgabe 1990
- [2] Allg. Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/1991, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 25.4.1991
- [3] Eickschen, E., Siebel, E.: Dauerhaftigkeit von Dränbeton für Betonfahrbahndecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 764, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 1998
- [4] Brite/Euram Project BE 3415: "Surface properties of concrete roads in accordance with traffic safety and reduction of noise". Final technical report, Oktober 1994.
- [5] Brite/Euram Project BE 3415: "Surface properties of concrete roads in accordance with traffic safety and reduction of noise". State-of-the-art-report and recommendations for practice and further developments, Oktober 1994.
- [6] Huschek, S.: General Report Theme 5 – Safety and Environment. 8. Internationales Betonstraßensymposium, 13.-16. September 1998, Lissabon, Proceedings, CEMBUREAU 1999
- [7] Bijen, J.: „Die Entwicklung lärmindernder Betondecken in den Niederlanden“. Betonstraßentagung 1989, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, H. 19, Köln 1991.
- [8] Rosell, J., Aguado, A., and Josa A.: Porous Concrete for Urban Pavements. 6th International Symposium on Concrete Roads, Madrid, 1990
- [9] Straßen der Zukunft. Beton 44 (1994) H. 11, S. 651.
- [10] Autoreifen flüstern auf grobkörniger Betonoberfläche. VDI-Nachrichten 49 (1995) S. 26
- [11] Siebel, E., Eickschen, E.: Lärmarme Betonfahrbahndecken – ein europäisches Forschungsprojekt. Straße und Autobahn 46 (1995) H. 11, S. 658-662
- [12] Onstenk, E., Aguado, A., Eickschen, E., Josa, A.: Laboratory study of porous concrete for its use as top-layer of concrete pavements. Paper presented at the 5th International Conference on Concrete Pavements, Design and Rehabilitation, Purdue University, USA, April 1993
- [13] Josa, A., Onstenk, E., Jofré, C., Eickschen, E., Aguado, A.: Porous top layer for concrete pavements: laboratory study and structural analysis. Paper presented at the conference "Concrete across boarders", Odense Denmark, Juni 1994
- [14] Eickschen, E., Siebel, E.: Noise reducing concrete surfaces. Paper presented at the conference "Concrete across boarders", Odense Denmark, Juni 1994
- [15] Riffel, E.: Deckschichten aus Dränbeton – eine ökologische Bauweise. Straße und Autobahn 47 (1996) H. 11, S. 653-659
- [16] Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 422, Beuth-Verlag, Berlin 1991
- [17] Eickschen, E., Siebel, E.: Drain-HGT als wasserdurchlässige Tragschicht im Verkehrswegebau. Straße und Autobahn 45 (1994), H. 4, S. 193-199
- [18] Swedish Standard SS 137244. Concrete testing – Hardened concrete – Frost resistance
- [19] Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, ZTV-SIB 90. Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund 1990
- [20] Projektgruppe „Lärmindernde Straßendecken“: Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST, Straßenbau Heft S 12, Bergisch Gladbach 1996
- [21] Hilsdorf, H.: Dauerhaftigkeit von hochfestem Beton. Darmstädter Massivbau-Seminar „Hochfester Beton“, Band 6, Darmstadt 1991
- [22] Stark, J.: Zu einigen Aspekten der „Dauerhaftigkeit von Hochleistungsbeton“. Leipziger Massivbau-Seminar „Erfahrungen mit Hochleistungsbeton (HLB)“, Band 7, Leipzig 1998
- [23] ZTV Beton-StB 93, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, 1993
- [24] Schiebl, P., Alfes, C., Sybertz, F., Vannahme, S.: Verwendung von Kunststoffdispersionen als Zusatzstoff für Beton nach DIN 1045 bei Einwirkung umweltgefährdender Flüssigkeiten. Bauingenieur 68 (1993) S. 19-26
- [25] Schorn, H.: Kunststoffmodifizierter Beton/PCC. Schriften zur Materialtechnologie des Bauingenieurs, Vulkan-Verlag Essen, 1989
- [26] Eickschen, E., Siebel, E.: Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton. beton 48 (1998) H. 9, S. 580-586 u. H. 10, S. 641-646
- [27] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton 42 (1992) H. 9, S. 496-501
- [28] Großkurth, K. P., Konietzko, A.: Polymermodifizierter zementgebundener Beton als Konstruktionswerkstoff. Bauingenieur 64 (1989) S. 173-179