



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Forschungspaket PLANET EP-6: Anforderungen und Qualitäts- kontrolle

**Paquet de recherche PLANET EP-6: Exigences et contrôle
qualité**

**Research package PLANET EP-6: Requirements and quality
control**

IMP Baustest AG
Dr. Ch. Angst

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
Dr. N. Bueche

**Forschungsprojekt VSS 2010/546 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Dezember 2016

1589

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Forschungspaket PLANET EP-6: Anforderungen und Qualitäts- kontrolle

**Paquet de recherche PLANET EP-6: Exigences et contrôle
qualité**

**Research package PLANET EP-6: Requirements and quality
control**

IMP Baustest AG
Dr. Ch. Angst

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
Dr. N. Bueche

**Forschungsprojekt VSS 2010/546 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Christian Angst

Mitglieder

Dr. Nicolas Bueche

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Heinz Aeschlimann, Zofingen

Mitglieder

Hansruedi Eberhard (Eberhard Bau AG)
Hans-Peter Beyeler (Bundesamt für Strassen ASTRA)
Sandra Dünner (Walo Bertschinger AG)
Martin Horat (Stadt Zürich, Tiefbauamt)
Felix Solcà (BSL Baustofflabor AG)
Adrian Zippo (Nynas)

Gesamtprojektleitung

Dr. Thomas Arn

Antragsteller

Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	11
Summary	15
1 Einleitung	17
1.1 Ausgangslage	17
1.2 Zielsetzung des EP6	17
1.3 Abgrenzungen	18
2 Q-Kontrollen von NT-Mischgut	19
2.1 Anlieferungskontrollen	19
2.1.1 Anlieferungskontrollen bei Wachsmodifizierung	19
2.1.2 Anlieferungskontrollen bei chemischen Additiven	22
2.1.3 Anlieferungskontrollen bei Zeotlihe	23
2.1.4 Anlieferungskontrollen bei Schaumbitumen	24
2.2 Kontrollen der Aufbereitung (Mischgutkontrollen)	24
2.2.1 Zusammensetzung des Mischgutes	24
2.2.2 Nachweis der Zusätze im Mischgut	25
2.2.3 Verdichtung im Labor	26
2.3 Einbaukontrollen	26
3 Versuchsfelder	27
3.1 Konzept	27
3.2 Planung	30
3.3 Realisierung	32
3.3.1 Einbau	32
3.3.2 Einbaukontrollen	33
3.3.3 Mischgutkontrollen	40
3.3.4 Bohrkern-Untersuchungen	44
3.4 Monitoring	45
3.4.1 Zielsetzung und Konzept	45
3.4.2 Instrumentalisierung und Messkampagne	45
3.4.3 Ergebnisse	48
3.5 Deflektionsmessungen	53
4 Verarbeitbarkeit	59
5 Mechanische Eigenschaften	63
5.1 Wasserempfindlichkeit	63
5.2 Verformungswiderstand	64
5.2.1 Spurrinntest	64
5.2.2 Einaxialer Druck-Schwellversuch	65
5.2.3 Triaxialer Druck-Schwellversuch	66
5.2.4 Zusammenfassung Verformungswiderstand	68
5.3 Steifigkeit	69
5.4 Ermüdungswiderstand	71
5.5 Kälteeigenschaften	73
5.5.1 Direkter Zugversuch bei + 5°C	73
5.5.2 Indirekter Zugversuch bei – 10°C	74
5.6 Schichtenverbund	75

6	Empfehlungen	79
6.1	Normen	79
6.1.1	Prüfnormen (EN 12697-xx)	79
6.1.2	Normen für Asphaltmischgut	79
6.1.3	Ausführungsnormen (nationale Elemente)	80
6.2	Anforderungen	80
6.3	„Hinweise für die Praxis“	80
7	Folgerungen	83
	Glossar	105
	Literaturverzeichnis	107
	Projektabschluss	109
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	113

Zusammenfassung

Aus der durchgeführten Forschungsarbeit konnten wertvolle Erkenntnisse im Umgang mit den verschiedenen Techniken zur Herstellung, Einbau und Verdichtung von Niedertemperatur-Asphalt (NT-Asphalt) gewonnen werden. Da bei der konzeptionellen Planung der Teststrecken die Variante der wachsmodifizierten NT-Asphalte ausgeschlossen wurde, liegt das Schwergewicht der Untersuchungen bei den NT-Asphalten, welche mit chemischen Additiven, Zeolithen und geschäumtem Bitumen aufbereitet wurden. Es wurde kein Testfeld mit wachsmodifiziertem NT-Asphalt eingebaut, da mit dieser Technologie bereits viele Objekte und Erfahrungen vorlagen; somit wurde und diese Technik als bekannt vorausgesetzt.

Es wurde untersucht, wie Eingangskontrollen der angelieferten Produkte/Zusätze am einfachsten durchgeführt werden könnten. Bei den chemischen Additiven eignet sich die Durchführung einer FTIR-Spektralanalyse am besten. Diese Prüfung kann mit sehr wenig Material rasch durchgeführt werden und liefert zuverlässige Ergebnisse. Sie liefert allerdings keine Informationen über die Eigenschaft des Produktes, sondern kann lediglich bestätigen, dass die untersuchte Probe einer Referenzprobe entspricht. Bei den im gebrauchsfertigen Zustand angelieferten, wachsmodifizierten Bindemitteln kann mit dem dynamischen Scherrheometer DSR geprüft werden, ob das angelieferte Bindemittel die gewünschten Eigenschaften aufweist. Bei den Zeolithen ist die Messung des Gewichtsverlustes nach einer Lagerung im Wärmeschrank am einfachsten.

Die Durchführung von Kontroll-Prüfungen des NT-Mischgutes und der Bohrkerne erfolgt mit den üblichen Laborprüfmethoden. Einzig bei der Bindemittelrückgewinnung wachsmodifizierter Bindemittel ist darauf zu achten, dass anstelle des üblicherweise verwendeten Lösungsmittels Toluol ein Trichlorethen verwendet wird. Der Nachweis der chemischen Additive in einer Mischgutprobe ist aufgrund der sehr niedrigen Dosierung mit vernünftigem Aufwand nicht möglich. Es wurde nicht untersucht, ob hochauflösende Methoden der Spurenanalytik zum Erfolg führen könnten.

Die Begleitung der Aufbereitung, des Einbaus und der Verdichtung von 5 Testfelder mit einem Referenz-Heissmischgut AC B 16 S (REF), einem chemischen Additiv (PACK), einem Zeolith (ZEO), sowie zweier geschäumter NT-Mischgüter mit und ohne Asphaltgranulat (WATER und WATER+RAP) ermöglichte es, auch anderen Forschungsprojekten im Rahmen eines Forschungspaketes ihre Ziele zu verfolgen. Auf einer Länge von insgesamt 850 m wurden auf 5 Testfelder je 180 t des entsprechenden NT-Mischgutes eingebaut.

Ausgehend von einer Soll-Zusammensetzung des Referenz-Mischgutes, wurden die 4 verschiedenen NT-Mischgut-Typen derart rezeptiert, dass eine möglichst gleiche Zusammensetzung resultierte. Die durchgeführten Mischgutuntersuchungen zeigten, dass alle 5 Mischgutsorten innerhalb der tolerierbaren Abweichungen gemäss SN 640 431-21 „Werkseigene Qualitätskontrolle“ [22] lagen; mit Ausnahme des Füllergehaltes bei der Mischung „WATER“. Aus den Untersuchungen der rückgewonnenen Bindemittel konnte gefolgert werden, dass die Alterung des Bindemittels aus dem Heissmischgut merklich grösser war, als die Alterung aller Warm-Mischguttypen. Dies ist auf die niedrigeren Aufbereitungstemperaturen des NT-Mischgutes zurückzuführen, bei welchen eine geringere oxidative und destillative Alterung stattfinden kann.

Der Schichtenverbund – 5 Monate nach dem Einbau – lag ausser beim Testfeld WATER+RAP bei allen 4 übrigen Feldern zu tief. Bei NT-Mischgut ist dem Schichtenverbund grundsätzlich eine erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken, da die Verklebung der Schichten infolge der niedrigeren Einbautemperatur erschwert ist. Da jedoch auch mit dem Heissmischgut (REF) die Anforderungen bei weitem nicht erfüllt wurden, war eine vertiefte Untersuchung des Schichtenverbundes erforderlich. Da sich die Teststrecke auf einer öffentlichen Strasse befindet, war es nicht möglich eine genügend grosse Anzahl Bohrkerne in periodischen Abständen zu entnehmen, um eine allfällige Zunahme des Schichtenverbundes fundiert zu dokumentieren. Daher wurden in

einer Laboruntersuchung verschiedene NT-Mischgutsorten und ein Heissmischgut auf eine Tragschicht eingebaut und der Schichtenverbund wurde nach 3 Tagen, 3 Wochen und 3 Monaten gemessen. Bei allen Prüfkörpern konnte eine Zunahme des Schichtenverbundes festgestellt werden; bereits nach 3 Tagen erfüllten alle Prüfkörper die in der Norm [7] festgelegte Anforderung für Binderschichten auf Tragschichten, wobei das Heissmischgut mit Abstand die höchsten Werte erreichte.

Während des Einbaus wurden Sensoren für die Messung der Verformung und der Temperatur verlegt, mit welchen punktuelle Messungen realisiert werden konnten. Nach dem Einbau der Teststrecke und der Durchführung der Einbaukontrollen wurde ein mehrjähriges Monitoring der Tragfähigkeit des Oberbaus aufgebaut. Zu diesem Zweck wurden Messungen unmittelbar nach dem Einbau, nach 5 Wochen und nach 5 Monaten durchgeführt. Zudem wurden Messungen der Tragfähigkeit mit dem Falling Weight Deflectometer FWD durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen den zu erwartenden Einfluss der Belags-Temperatur und der Fahrgeschwindigkeit beim Überrollen der Sensoren sehr deutlich, was das zuverlässige Funktionieren der Sensoren nachweist. Innerhalb des relativ kurzen Zeitraumes zwischen Einbau und Messung konnten weder Unterschiede zwischen den Testfeldern, noch eine beginnende Schädigung des Oberbaus festgestellt werden. Dies ist sowohl auf die hinreichende Dimensionierung des Oberbaus mit einer Gesamtschichtdicke von 320 mm zurückzuführen, als auch dadurch bedingt, dass die untersuchte Binderschicht mit unterschiedlichen NT-Asphaltsorten und einer Dicke von 65 mm lediglich ca. 20 % des Gesamtaufbaus ausmacht.

Bezüglich der Wasserempfindlichkeit zeigen die Untersuchungen, dass die Warm-Asphalte die Werte des Heissmischgutes nicht erreichen. Zwar erfüllt nur das Mischgut WATER die Anforderung (> 70%) nicht, doch liegen auch die übrigen NT-Mischgüter PACK, ZEO und WATER+RAP tiefer als das Heissmischgut, wobei WATER+RAP am besten abschneidet.

Die Untersuchung des Verformungswiderstandes bei hohen Temperaturen erfolgte auf der Basis dynamischer Druck-Schwell-Prüfungen (einaxial und tri-axial) sowie auf der Basis des Spurrinntestes. Das Heissmischgut weist bei allen drei Prüfungen den grössten Verformungswiderstand auf, teilweise bedingt durch das etwas härtere Bindemittel. Das Schaumbitumen-Mischgut WATER hat – trotz vergleichbarer Bindemittleigenschaften – global gesehen den niedrigsten Verformungswiderstand. Generell kann auch festgehalten werden, dass Druck-Schwellversuche (ein- und triaxial) eine grössere Spreizung der Ergebnisse als der Spurrinntest erzeugen.

Die Beurteilung des Verhaltens der unterschiedlichen Mischgut-Typen bei mittleren Gebrauchstemperaturen (10 bzw 15°C) erfolgte mittels Bestimmung der Steifigkeit sowie des Ermüdungsverhalten in der 2-Punkt-Biegeprüfung an prismatischen Prüfkörpern. Bei der Steifigkeit weisen REF und PACK etwas höhere Werte als ZEO, WATER und WATER+RAP auf, wobei WATER am niedrigsten liegt. Die Unterschiede sind relativ klein und werden zudem auch durch die unterschiedliche Bindemittelalterung (Verhärtung) beeinflusst. Berücksichtigt man die Penetrationswerte der aus dem Mischgut rückgewonnenen Bindemittel, so können folgende Vergleiche angestellt werden: Obwohl PACK und WATER+RAP analoge Penetrationswerte aufweisen, hat das Mischgut PACK einen deutlich grösseren E-Modul. Auch beim Vergleich ZEO und WATER (analoge Penetrationswerte) hat das Mischgut ZEO einen höheren E-Modul.

Beim Ermüdungswiderstand schneidet das Referenzmischgut REF am schlechtesten ab. Die Mischgüter PACK, ZEO et WATER sind bezüglich der Ermüdungseigenschaften vergleichbar. Das Mischgut in welchem Asphaltgranulat verwendet wurde (WATER+RAP) zeigt das günstigste Verhalten im Ermüdungsversuch. Auch im Vergleich mit dem Mischgut WATER zeigt sich ein deutlicher Unterschied zu Gunsten des Mischgutes WATER+RAP.

Während im direkten Zugversuch bei +5°C keine Unterschiede feststellbar sind, weist der indirekte Zugversuch bei – 10°C auf folgende Unterschiede hin: die geschäumten Asphalte WATER und WATER+RAP haben eine tiefere Bruchspannungen als die übrigen drei Mischgüter, wobei PACK den höchsten Wert erreicht.

Generell kann festgestellt werden, dass teilweise erheblich Unterschiede im mechanischen Verhalten der unterschiedlichen Warm-Asphalte untereinander und im Vergleich zum Referenz-Heissmischgut bestehen. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass das Mischgut der eingebauten Testfelder untersucht wurde, bei welchen kein wachsmodifiziertes Bindemittel verwendet wurde. Der Vergleich der Eigenschaften erfolgte somit im vorliegenden Bericht unter Ausschluss der wachsmodifizierten Asphalte. Im Rahmen des EP1 wird darauf eingegangen.

Die Arbeit schliesst mit Empfehlungen für die Praxis wobei der aktuelle Stand der CEN-Normen berücksichtigt wurde.

Résumé

Sur la base des travaux de recherche réalisés, des enseignements précieux relatifs à la fabrication, pose et compactage des différents enrobés tièdes testés ont pu être mis en évidence. Étant donné que lors de la conception des planches d'essais les technologies d'enrobé tiède avec ajout de cire n'ont pas été retenues, les investigations ont été concentrées sur des technologies tièdes avec additif chimique, ajout de zéolithe et processus de moussage du bitume. Aucune planche d'essai avec liant modifié par ajout de cire n'a été réalisée, ceci car de nombreux objets ont déjà été effectués avec cette technologie qui a donc été considérée comme davantage éprouvée.

La procédure de contrôle la plus simple pouvant être mise en place lors de la réception des produits/additifs a été étudiée. Dans le cas d'additifs chimiques, une analyse par spectroscopie FTIR est la plus adaptée. Cet essai qui peut être réalisé très rapidement avec une faible quantité de matériau fournit des résultats fiables. Cet essai ne fournit toutefois pas d'informations relatives aux propriétés du produit testé, mais il permet seulement de confirmer que l'échantillon évalué correspond à un échantillon de référence. Dans le cas de liants avec ajout de cire fourni prêt à l'emploi (déjà additivé), un essai au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) permet de vérifier que le liant reçu présente bien les caractéristiques attendues. Dans le cas de zéolithe, une mesure de la perte de masse en étuve semble être la méthode la plus adaptée.

La réalisation des essais de contrôle sur les enrobés tièdes et carottes est réalisée avec des méthodes de laboratoire traditionnelles. Seule exception dans le cas de récupération de liant modifié avec cire, il faut alors veiller à utiliser du trichloréthylène comme solvant à la place du toluène généralement utilisé. La preuve de l'utilisation d'un additif chimique dans un échantillon d'enrobé au moyen d'essais raisonnables n'est pas possible étant donné le très faible dosage de ces additifs. L'applicabilité de méthodes d'analyse de trace à haute résolution n'a pas été étudiée dans le cadre de ce projet.

Le suivi de la fabrication, de la pose et du compactage de 5 planches d'essais avec un mélange de référence à chaud AC B 16 S (REF) et quatre enrobés tièdes avec additif chimique (PACK), ajout de zéolithe (ZEO) et deux enrobés avec moussage du bitume avec (WATER+RAP) et sans fraisat d'enrobé (WATER) a également permis aux autres projets de recherche menés dans le cadre du paquet PLANET de poursuivre leurs objectifs. Les 5 planches d'essais représentant chacune 180 t d'enrobé ont été construites sur une longueur totale de 850 m.

Sur la base d'une composition cible du mélange de référence à chaud, les 4 différents enrobés tièdes ont fait l'objet d'essais de réception permettant de les comparer selon une base identique. Les analyses réalisées sur les enrobés montrent que les 5 sortes d'enrobés se situent dans les tolérances normatives admises selon SN 640 431-21 "Maîtrise de la production" [22]; à l'exception de la teneur en filler du mélange "WATER". Il peut être déduit de l'analyse des liants récupérés que le vieillissement du liant dans le cas de l'enrobé à chaud est sensiblement plus important que celui des liants provenant des différents enrobés tièdes. Cela est lié à la température de fabrication plus basse dans le cas d'enrobés tièdes qui conduit à une oxydation moins importante.

A l'exception du champ WATER+RAP, l'adhésion entre les couches, mesurée 5 mois après la pose, est trop basse pour les différentes sections d'essais. De manière générale une attention particulière doit être portée au collage entre les couches dans le cas d'enrobés tièdes, ceci car le collage peut être plus difficile en raison des températures moins élevées. Étant donné que le champ de référence à chaud ne respecte également de loin pas les exigences, une analyse approfondie du collage entre les couches s'est alors avérée nécessaire. Les planches d'essais faisant partie d'une route sous trafic, la réalisation de carottages périodiques afin de documenter suffisamment l'analyse d'une éventuelle augmentation de la liaison inter-couches n'a pas pu être réalisée. Pour cela, une analyse en laboratoire a été menée avec la pose de différents enrobés tièdes et d'un enrobé de référence à chaud sur une couche de base, ceci afin de mesurer l'adhésion

entre les couches après 3 jours, 3 semaines et 3 mois. Pour l'ensemble des enrobés, une augmentation de la liaison entre les couches au cours du temps a été mesurée; les exigences normatives [7] relatives à une couche de liaison sur couche de base étant respectées déjà après 3 jours. Relevons encore que les valeurs les plus élevées ont été obtenues pour l'enrobé à chaud.

Des capteurs permettant des mesures ponctuelles des déformations et des températures au sein de la chaussée ont été installés lors de la construction des planches d'essais. Un large suivi de la portance des chaussées suivant la construction et le contrôle de réception de la a été réalisé. Pour cela, des mesures ont été menées directement après la pose, après 5 semaines ainsi qu'après 5 mois. En outre, des mesures de portance au moyen du déflectomètre à masse tombante FWD ont également été réalisées. Comme attendu, les résultats mettent clairement en évidence l'influence de la température et de la vitesse des véhicules sur le comportement des capteurs, démontrant ainsi leur fiabilité. Les mesures réalisées dans ce laps de temps relativement réduit ne mettent pas en évidence de différence significative de comportement entre les différents champs et aucune amorce de dégradation n'a été identifiée. Cela doit être mis en relation avec le dimensionnement suffisant de la chaussée soit une épaisseur bitumineuse totale de 320 mm, ainsi qu'avec l'épaisseur d'enrobé tiède étudiée de 65 mm qui représente seulement 20% de l'épaisseur bitumineuse totale.

Les analyses relatives à la sensibilité à l'eau montrent que les enrobés tièdes étudiés ne permettent pas d'atteindre les valeurs obtenues pour l'enrobé à chaud. Bien que seul le mélange WATER ne respecte pas les exigences normatives (>70%), les valeurs obtenues pour les mélanges PACK, ZEO et WATER+RAP sont moins élevées que pour l'enrobé de référence à chaud; l'enrobé WATER+RAP étant le plus performant des variantes tièdes.

L'analyse de la résistance aux déformations permanentes à haute température a été réalisée au moyen de l'essai de fluage dynamique (uniaxial et triaxial) ainsi que par des essais d'orniérage. Pour les trois essais réalisés, le mélange à chaud présente la résistance la plus élevée aux déformations permanentes, ceci étant notamment lié au liant plus dur. Malgré des caractéristiques du liant comparables à la référence à chaud, le mélange WATER+RAP avec moussage du bitume présente globalement la résistance la moins élevée aux déformations. De manière générale il peut également être relevé la plus grande dispersion des résultats obtenus avec l'essai de fluage dynamique (uniaxial et triaxial) comparativement à l'essai d'orniérage.

Le comportement des différents enrobés dans le domaine de températures intermédiaires (10 resp. 15 °C) a été évalué au moyen d'essais de rigidité et de fatigue en flexion deux points sur éprouvettes trapézoïdales. Pour la mesure de rigidité (module complexe), les enrobés REF et PACK présentent les valeurs légèrement plus élevées que les mélanges ZEO, WATER et WATER+RAP, le mélange WATER obtenant la rigidité la plus basse. Les différences entre mélanges restent relativement faibles et elles peuvent être influencées notamment par le vieillissement du liant (durcissement). En prenant en compte les valeurs de pénétration des liants récupérés sur enrobés, les comparaisons suivantes peuvent être faites: Bien que les mélanges PACK et WATER+RAP présentent des valeurs analogues, le mélange PACK a un module de rigidité significativement plus élevé. Egalement dans le cas des mélanges ZEO et WATER (pénétrations analogues), le mélange ZEO présente un module de rigidité plus élevé.

Le mélange de référence REF présente la résistance à la fatigue la moins élevée des enrobés testés. Les mélanges PACK, ZEO et WATER sont comparables pour leurs performances en fatigue. Le mélange avec ajout de fraisat d'enrobé WATER+RAP présente la résistance en fatigue la plus élevée; la différence étant également marquée comparativement au même enrobé sans ajout de fraisat (WATER).

Alors que l'essai de traction directe à +5°C ne met pas en évidence de différence significative, l'essai de traction indirecte à -10 °C met en évidence les différences suivantes: Les mélanges avec moussage du bitume WATER et WATER+RAP présentent

une contrainte à la rupture plus faible que les trois autres enrobés; l'enrobé PACK présentant les valeurs les plus élevées.

De manière générale, il peut être remarqué que des différences pouvant être considérables entre les enrobés tièdes ainsi qu'en comparaison avec un enrobé de référence à chaud existent. Il doit être à nouveau rappelé que les mélanges testés sur les planches d'essais ne comportent pas de liant modifié avec ajout de cire. La comparaison des performances est donc réalisée sans prise en compte d'enrobés avec ajout de cire. Ceci sera traité dans le cadre du EP3.

Des recommandations pour la pratique avec prise en compte de l'état actuel de la normalisation CEN sont finalement effectuées.

Summary

The research work carried out provides valuable insights on the application of different techniques for the production, laying and compaction of low-temperature asphalt (LT asphalt). Due to the fact that wax-modified low-temperature asphalts were excluded as a variant during the design of the test section, the tests focus on LT asphalts that have been prepared with chemical additives, zeolites and foamed bitumen. None of the test fields were laid with wax-modified LT asphalt because extensive experience had already been gained from several projects using this technology and it was therefore assumed as known.

There was an investigation to find the easiest way to perform incoming goods inspections on the delivered products/additives. For the chemical additives FTIR spectroscopy was the most suitable analysis method. This test can be carried out quickly using very little material and delivers reliable results. It does not, however, provide information on the property of the tested product and can only confirm that the tested specimen corresponds to a reference sample. With the wax-modified binders that are supplied ready for use, the dynamic shear rheometer DSR can be used to test whether the supplied binder features the desired properties. With the zeolites the easiest form of measurement is to measure the weight loss after storing in an oven.

Inspection checks on the LT mix and drilled cores are carried out using common laboratory test methods. It is merely important during the binder recovery of wax-modified binder to make sure that a trichloroethylene is used instead of the commonly used solvent Toluene. The detection of the chemical additive in a mix sample is not possible with common laboratory equipment, due to the very low dose. It was not investigated as to whether high-resolution trace analysis methods would prove successful.

Studying the preparation, laying and compaction of 5 test fields with a reference hot mix AC B 16 S (REF), a chemical additive (PACK), a zeolite (ZEO), as well as two foamed LT mixes with and without asphalt granulate (WATER and WATER+RAP) also made it possible for other research projects to pursue their goals within the framework of a research package. Over a distance of altogether 850 m, 180 tons of the corresponding LT mix were laid on 5 test fields respectively.

Based on a nominal composition of the reference mix the 4 different LT mix types were designed in such a way to provide a composition that was as uniform as possible. The tests carried out on the mixes showed that all 5 mix types were within the tolerable deviations according to SN 640 431-21 „Factory Production Control“ [22]; with the exception of the filler content in the mix „WATER“. From tests carried out on the recovered binder it was possible to conclude that the aging of the binder from the hot mix was significantly greater than the aging of all warm mix types. This is due to the low temperature conditions when preparing the LT mix, during which less oxidative and evaporative aging can occur.

With the exception of the test field WATER+RAP the layer bond 5 months after laying was too low in all of the remaining 4 fields. With an LT mix greater attention is generally to be awarded to layer adhesion due to the fact that low-temperature laying makes an adhesion more difficult. As, however, also the hot mix (REF) was far from meeting the requirements, a more in-depth investigation into of the layer bond was required. Because the test section is on a public road it was not possible to take an adequate number of drilled cores at periodic intervals in order to reliably document any possible increase in the layer bond. For this reason, in a laboratory test, different LT mix types and a hot mix type were laid on a base course and the layer adhesion was measured after 3 days, after 3 weeks and after 3 months. In all test specimens an increase in the layer adhesion was determined; already after 3 days all test specimens satisfied the requirement for binder layers on base courses as specified in the standard [7], whereby the hot mix clearly attained the highest values.

During the paving process sensors were also laid to measure the deformation and the temperature, these also enabling the implementation of spot measurements. After the laying of the test section and the implementation of laying inspections a system for monitoring the bearing capacity of the pavement over several years was set up. For this purpose, measurements were taken immediately after laying, after 5 weeks and after 5 months. Measurements of the bearing capacity were also performed using the Falling Weight Deflectometer FWD. The results clearly show the expected influence of the pavement temperature and the vehicle speed when driving over of the sensors, also proving the reliable operation of the sensors. Within the relatively short period between laying and measurement there were no differences determined between the test fields and there were no signs of damage to the pavement. This being due to adequate dimensioning of the pavement with an overall layer thickness of 320 mm and also due to the fact that the examined binder course with different LT asphalt types and a thickness of 65 mm only makes up 20% of the overall pavement.

With regard to water sensitivity the tests show that the warm asphalts do not reach the performance values of the hot mix. Although it was only the mix WATER that failed to meet the requirement ($> 70\%$), also the remaining LT mixes PACK, ZEO and WATER+RAP fell below the performance of the hot mix, whereby the WATER+RAP mix was the best of the three.

Testing of deformation resistance at high temperatures was carried out using dynamic cyclic compression tests (uniaxial and tri-axial), and also on the basis of rutting tests. In all three tests the hot mix has the highest resistance to deformation, partly due to the slightly harder binder. The foamed bitumen mix WATER has, overall, the lowest deformation resistance, in spite of comparable binder properties. Generally it can be said that cyclic compression tests (uniaxial and tri-axial) produce a broader spread of results than the rutting test.

The assessment of the behaviour of different mix types under average temperature conditions (10 and 15°C) was carried out using the determination of stiffness as well as fatigue behaviour in the 2-point bending test on prismatic test specimens. With regard to stiffness, REF and PACK have slightly higher values than ZEO, WATER and WATER+RAP, wherein WATER has the lowest values. The differences are relatively small and are also influenced by varying binder aging (hardening). Taking the penetration values of the binder recovered from the mix into account the following comparisons can be made: although PACK and WATER+RAP have analogous penetration values, the mix PACK has a significantly larger E-modulus. Also when comparing ZEO and WATER (analogous penetration values) the ZEO mix has a higher E-modulus.

In fatigue resistance the reference mix REF shows the worst performance. The mixes PACK, ZEO and WATER are comparable in terms of fatigue properties. The mix that uses asphalt granulate (WATER+RAP) shows the most favourable behaviour in the fatigue test. Also in comparison with the mix WATER there is a marked difference in favour of the mix WATER+RAP.

Whereas in the direct tensile test at +5°C there are no differences determined, the indirect tensile test at -10°C indicates the following differences: the foamed asphalts WATER and WATER+RAP have a lower tensile stress at break than the other three mixes, whereby PACK attains the highest value.

It can generally be said that there are some considerable differences in the mechanical behaviour of the different warm asphalts amongst each other and in comparison with the reference hot mix. It is pointed out once again at this point that the examined mix of the laid test fields did not use a wax-modified binder. The comparison of properties in this report was therefore carried out under the exclusion of wax-modified asphalts. This is referred to in EP1.

The paper closes with recommendations on the practical application, taking the current status of the CEN standards into account.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das Forschungspaket enthielt insgesamt 7 Einzelprojekte und ein Einzelprojekt EP0 für die Projektleitung. Die Ziele und Aufgaben der Einzelprojekte wurden bereits im Initialprojekt [1] festgelegt:

- EP-0: Projektleitung
- EP-1: Auswirkungen auf die Mischwerke
- EP-2: Energetische und ökologische Bilanz
- EP-3: Rezeptur und Optimierung des Gebrauchsverhaltens
- EP-4: Gebrauchsdauer und Alterung
- EP-5: Globales Auswertungsmodell
- EP-6: Anforderungen und Qualitätskontrolle
- EP-7: Arbeitshygiene

Um die Verbindung zwischen den einzelnen Projekten zu gewährleisten, wurden gemeinsame Mischgutsorten festgelegt, mit welchen alle EP zu arbeiten hatten. Diese Mischgutsorten wurden unter dem Begriff «file rouge» zusammengefasst, da sie den roten Faden durch das Forschungspaket bildeten. Zudem wurden Testfelder geplant und eingebaut, welche die Anforderungen aller Einzelprojekte zu erfüllen hatten. An diesen Testfeldern mit insgesamt 5 unterschiedlichen Mischgutsorten konnten jedes EP seine spezifischen Messungen durchführen und die entsprechenden Daten erheben. Diese Testfelder wurden im vorliegenden Bericht des EP 6 geplant und realisiert.

1.2 Zielsetzung des EP6

Das Einzelprojekt EP6 mit dem Titel „Anforderungen und Qualitätskontrolle“ hat gemäss Projektbeschreibung folgende Zielsetzungen:

- Q-Kontrollen:
Die bei der Aufbereitung und dem Einbau bituminöser Mischungen üblichen Prüfungen sind auf ihre Anwendbarkeit bei Niedertemperatur-Asphalte zu überprüfen. Dabei sind die verschiedenen Technologien zur Temperaturabsenkung zu berücksichtigen.
Es soll eine Auswahl an Prüf- und Kontrollverfahren vorgeschlagen werden, mit welchen die Aufbereitung und der Einbau von NTA überwacht werden kann.
- Anforderungen:
Die Anforderungen an das Mischgut und an die eingebauten Schichten beziehen sich heute ausschliesslich auf heiss aufbereitetes Mischgut. Das EP6 soll aufzeigen, bei welchen Anforderungen allenfalls Anpassungen vorzunehmen sind. In diesen Fällen wird vom EP erwartet, dass konkrete Vorschläge für Anforderungen formuliert werden.
- Handbuch
Die Erkenntnisse sollen in einem Handbuch zusammengefasst werden, mit welchem die Anwendung der NTA-Technologien in der Praxis erleichtert werden soll.

Zudem hat das EP6 den Einbau von Teststrecken zu organisieren und zu überwachen, welche für das gesamte Forschungspaket von grosser Bedeutung sind.

1.3 Abgrenzungen

Unter dem Begriff der temperaturabgesenkten Asphalte werden grundsätzlich alle Verfahren zusammengefasst, bei welchen eine niedrigere Verarbeitungs-Temperatur als bei Heissmischgut möglich ist. Die SN-Norm 640 420 Asphalt, Grundnorm [6] unterscheidet je nach Aufbereitungstemperatur zwischen

- Kaltes Mischgut
- Halbwarmes Mischgut
- Warmes Mischgut
- Heisses Mischgut

Kaltes und halbwarmes Mischgut wird bei Aufbereitungstemperaturen $< 100\text{ °C}$ erstellt; warmes und heisses Mischgut $> 100\text{ °C}$. Bei warmem Mischgut geht man erfahrungsgemäss von einer Temperatur zwischen ca. 120 und 140 °C aus.

Unter dem Begriff Niedertemperatur-Asphalt (NT-Asphalt) wird in diesem Projekt warmes Mischgut gemäss SN 640 420 [6] verstanden.

2 Q-Kontrollen von NT-Mischgut

Zur Herstellung von NT-Mischgut gibt es verschiedene Verfahren, welche sich grundlegend unterscheiden:

- **Wachsmodifikation**
Die Zugabe von Wachsen verändert die rheologischen Eigenschaften des Bitumens, sodass bei niedrigeren Temperaturen Mischgut aufbereitet werden kann. Heute werden in der Regel gebrauchsfertig angelieferte, modifizierte Bindemittel verwendet. Es besteht aber auch die Möglichkeit Wachs Zusätze direkt in den Mischer der Aufbereitungsanlage zu geben.
- **Chemische Additive**
Diese Produkte reduzieren die Oberflächenspannung des Bitumens und erlauben dadurch eine Temperaturreduktion
- **Zeolith**
Gesteinskomponenten, welche kristallin gebundenes Wasser bei Temperaturen oberhalb 100 °C abgeben, ermöglichen ebenfalls eine Temperaturabsenkung.
- **Schaumbitumen**
Mit Wasser aufgeschäumtes Bitumen hat eine deutlich geringere Viskosität und ermöglicht dadurch die Aufbereitung und den Einbau von Mischgut bei tieferen Temperaturen.

Bei jedem der oben aufgeführten Möglichkeiten NT-Asphalt herzustellen, werden unterschiedliche Zusätze bzw Verfahren verwendet. Daher sind die Qualitätskontrollen für jedes einzelne Verfahren separat zu betrachten.

2.1 Anlieferungskontrollen

Die Anlieferungskontrolle dient dem Abnehmer einer Ware, um sich selbst ein Bild über die gelieferte Qualität des Produktes zu beschaffen. Diese Kontrollen werden stichprobenweise durchgeführt und deren Ergebnisse sollten möglichst rasch zur Verfügung stehen, denn bei allfälligem Nichterfüllen der Anforderungen sind Massnahmen angesagt. Anlieferungskontrollen führen zu Transparenz in der Schnittstelle Verkäufer / Käufer und spielen daher eine bedeutende Rolle.

2.1.1 Anlieferungskontrollen bei Wachsmodifizierung

Die Zugabe von Wachsen beschränkt sich in der Regel auf Fischer-Tropsch-Wachse (FT-Wachs) oder auf Montan-Wachs (M-Wachs). Amidwachse haben einen Schmelzbereich von ca. 140°C und eignen sich nicht für die Herstellung von NT-Asphalt.

Die zur Temperaturabsenkung verwendeten Wachse haben deutlich längere Kohlenstoff-Molekül-Ketten als die erdöleigenen Paraffine. Aus diesem Grunde eignet sich die für bituminöse Produkte üblicherweise angewendete Destillationsmethode zur Bestimmung des Paraffingehaltes [12] nicht.

Wachse führen zu einer deutlich messbaren Veränderung der rheologischen Eigenschaften des Bindemittels, wie dies in der Abb.1 dargestellt ist. Diese Abbildung zeigt das Ergebnis einer Messreihe, bei welcher 6 verschiedene Wachse untersucht wurden. Dabei wurde mit einem Labor-Rührer 3 Masse-% Wachs einem Standard-Strassenbaubitumen B 70/100 zu dosiert und homogenisiert. Der Wachsgehalt von 3 Masse-% liegt im Rahmen der üblichen Anwendungen in der Praxis. An den Proben wurde mit einem dynamischen Scher-Rheometer DSR der komplexe Schubmodul gemäss [9] bei verschiedenen Temperaturen bestimmt.

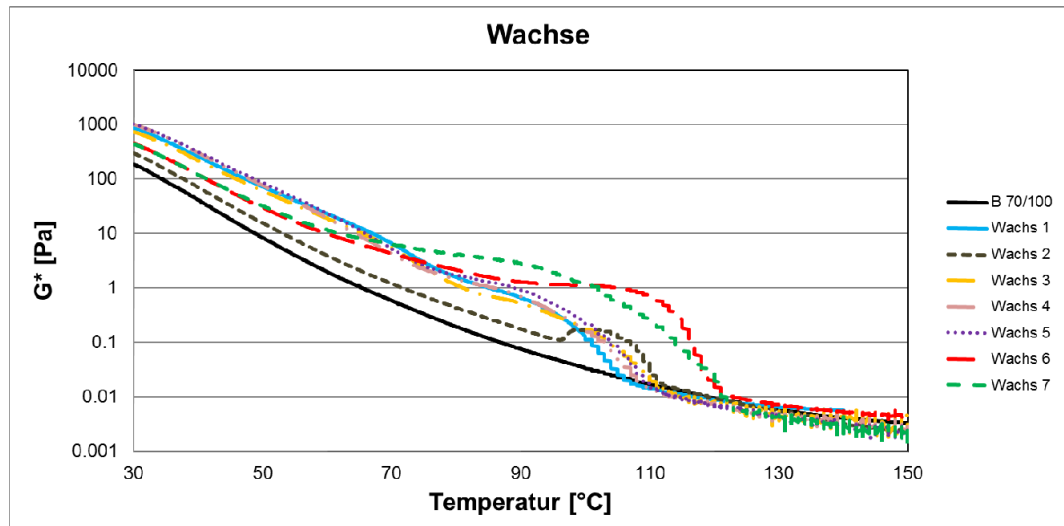


Abb.1 Komplexer Schubmodul G^* verschiedener, wachsmodifizierter Bitumen im Vergleich zu einem B 70/100

Zur Kontrolle der Anlieferung eines wachsmodifizierten Bindemittel (Bitumen oder PmB) eignet sich die Messung des Schubmoduls bei verschiedenen Temperaturen. Diese Messung kann ab Probeneingang im Labor innert 24 bis 48 h erfolgen.

Um abzuklären ob sich auch die Aufnahme eines FTIR-Spektrums zur Anlieferungskontrolle von wachsmodifizierten Bitumen eignen könnte, wurden drei verschiedene Wachse in reiner Form, sowie deren Mischungen mit Bitumen untersucht. Dabei wurde ein Bitumen B 70/100 mit 3 % des entsprechenden Wachs gemischt.

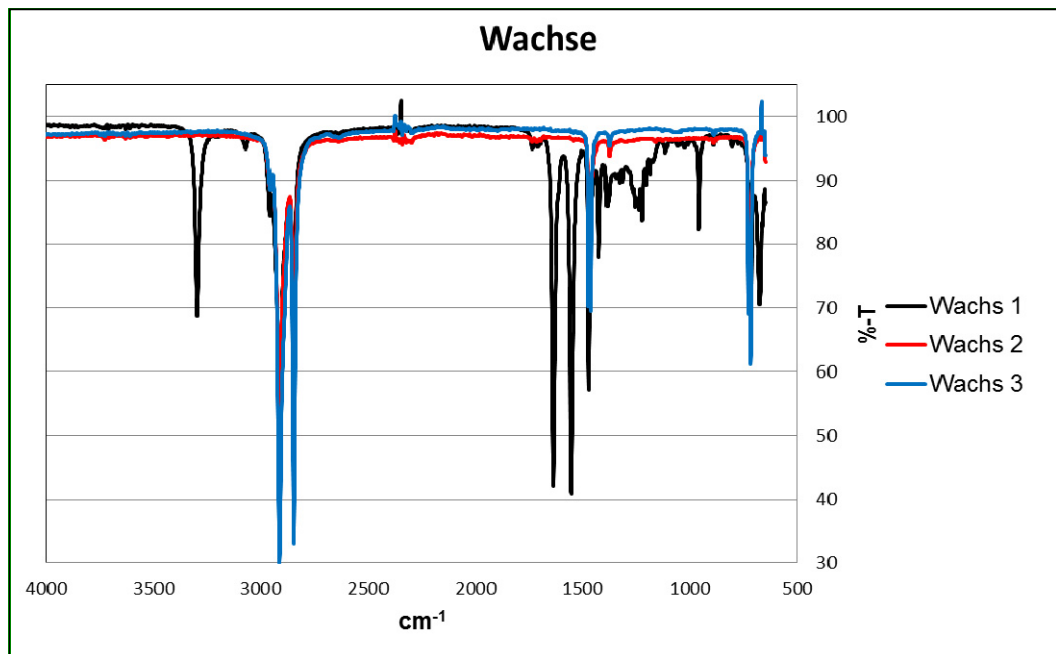
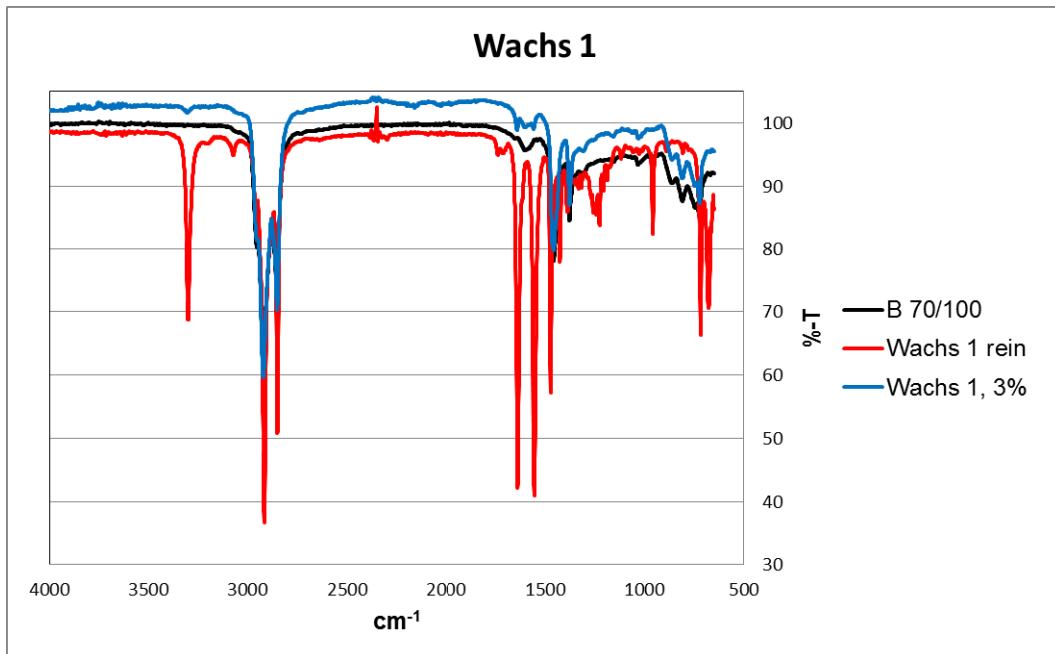


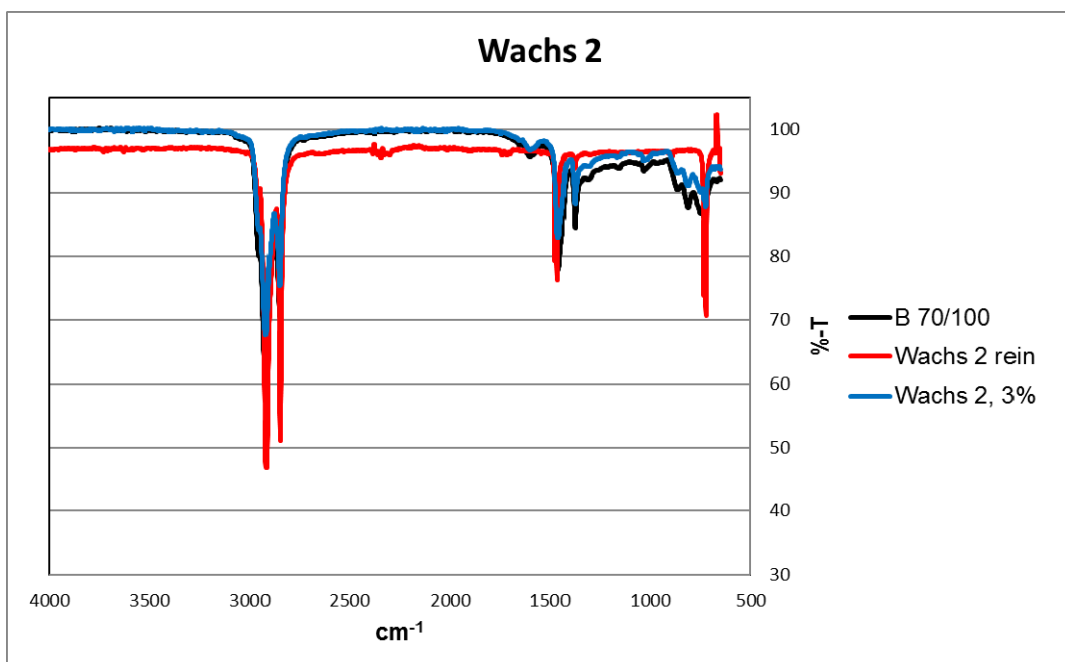
Abb.2 FTIR-Spektren dreier Wachse

Wie der Abb.2 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die FTIR-Spektren der Wachse 2 (rot) und 3 (blau) kaum. Dies bedeutet, dass die Aufnahme eines FTIR-Spektrums für die Identifikation einer unbekannten Wachsprobe nicht in jedem Falle eine zuverlässige Aussage liefert. Daraus folgt, dass die FTIR-Spektralanalyse keine zuverlässige Methode zur Durchführung einer raschen Eingangskontrolle bei der Lieferung von Wachsen für die Herstellung von Niedertemperatur-Asphalt ist.

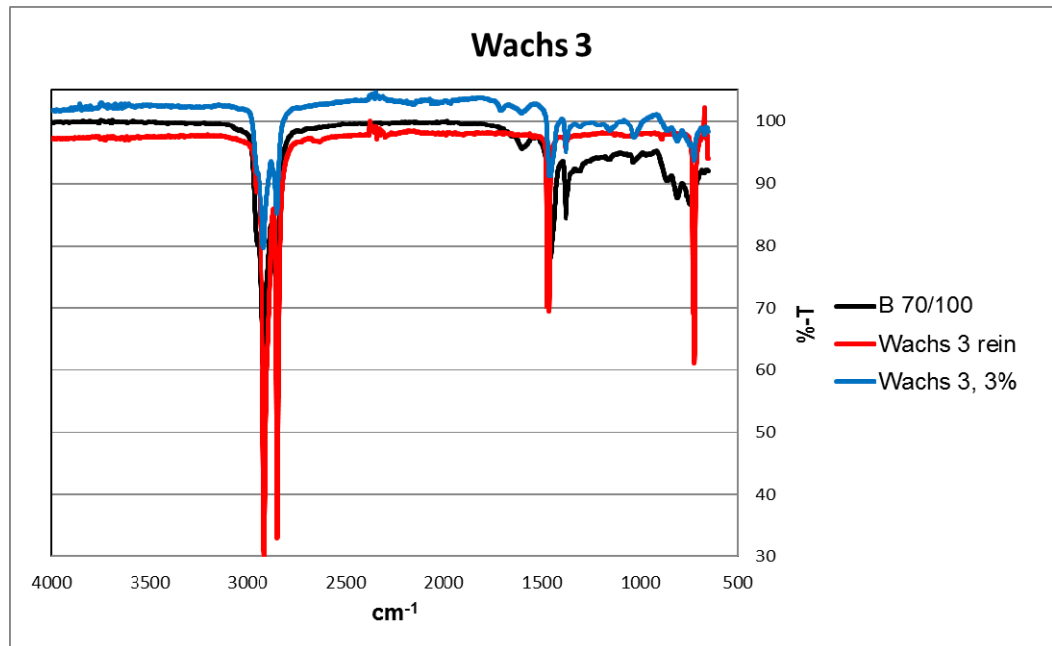
Bei der Anlieferungskontrolle eines im gebrauchsfertigen Zustand modifizierten, wachshaltigen Bindemittel stellt sich die Frage, ob mittels FTIR-Analyse zuverlässig erkannt werden kann, ob in einer angelieferten Probe Wachs enthalten ist. In der Abb.3 sind von den drei bereits in der Abb.2 aufgeführten Wachsen weitere Spektren dargestellt, nämlich der Wachs im reinen Zustand, in einer 3%-Mischung mit einem B 70/100 und zu Vergleichszwecken das Spektrum eines unmodifizierten Strassenbaubitumens. Einzig beim Wachs 1 kann aus dem Spektrum der 3-%igen Wachs/Bitumen-Mischung erkannt werden, dass diese Probe Wachs enthält. Bei den Spektren der Wachs/Bitumen-Mischungen 2 und 3 sind die für das Wachs typischen Peaks in der Mischung entweder nicht mehr zu erkennen, oder sie fallen mit einem der Peaks des Bitumens zusammen und sind daher infolge der Überlagerung nicht zu erkennen.



3a)



3b)



3c)

Abb.3 FTIR-Spektren der Wachse (rot) und deren 3%-Mischungen (blau) mit einem Bitumen B 70/100 (schwarz)

- a) Wachs 1
- b) Wachs 2
- c) Wachs 3

Generell kann festgehalten werden, dass mit dem DSR ein taugliches Prüfverfahren zur Verfügung steht, um Eingangskontrollen von wachsmodifizierten Bindemitteln durchzuführen. Die FTIR-Spektralanalyse hingegen eignet sich zu diesem Zwecke nicht.

2.1.2 Anlieferungskontrollen bei chemischen Additiven

Mit drei verschiedenen chemischen Additiven wurden analoge Untersuchungen mit dem DSR, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, durchgeführt. Wie aus der Abb.4 zu entnehmen ist, verändert die Zugabe der chemischen Additive 1, 2 und 3 die Rheologie des Bindemittels nicht; die Messung des Schubmoduls ist somit bei diesen Produkten nicht zielführend.

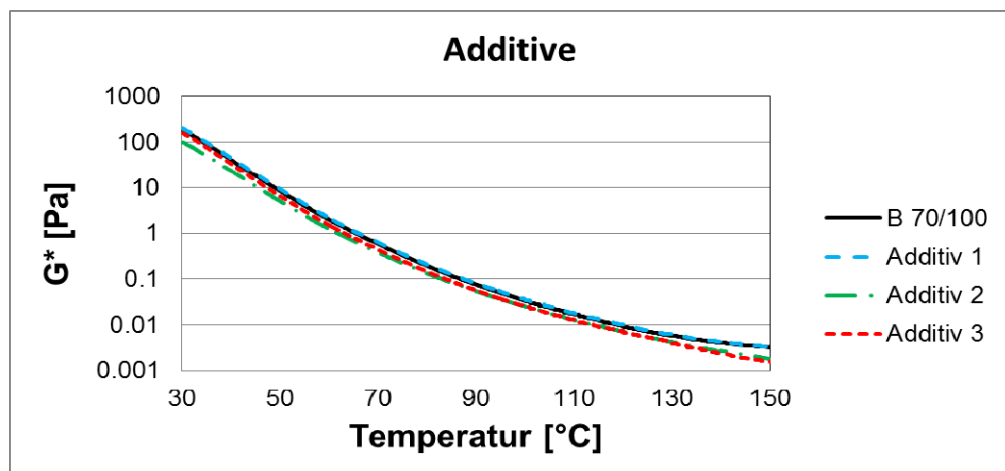


Abb.4 Komplexer Schubmodul G^* verschiedener Bitumen-Additiv-Gemische im Vergleich zu einem B 70/100

Chemische Produkte werden im Rahmen von Qualitätskontrollen oft mit einem Fingerprint charakterisiert. Dabei ist die IR-Spektralanalyse mit anschliessender Fourier-Transformations-Analyse (FT IR) eine sehr geeignete Methode. An zwei Additive wurden FTIR-Analysen im Anlieferungszustand durchgeführt und in der Abb.5 dargestellt. Für jedes Produkt sind charakteristische Spektren zu erkennen, beim Produkt 1 bei einer Wellenlänge von 1100 und 3040 cm^{-1} , beim Produkt 2 bei 1740 cm^{-1} .

Zur Durchführung einer Eingangskontrolle kann somit – bei bekanntem Spektrum des Produktes - mit einer FTIR-Analyse rasch erkannt werden, ob das gelieferte Produkt der bestellten Ware entspricht.

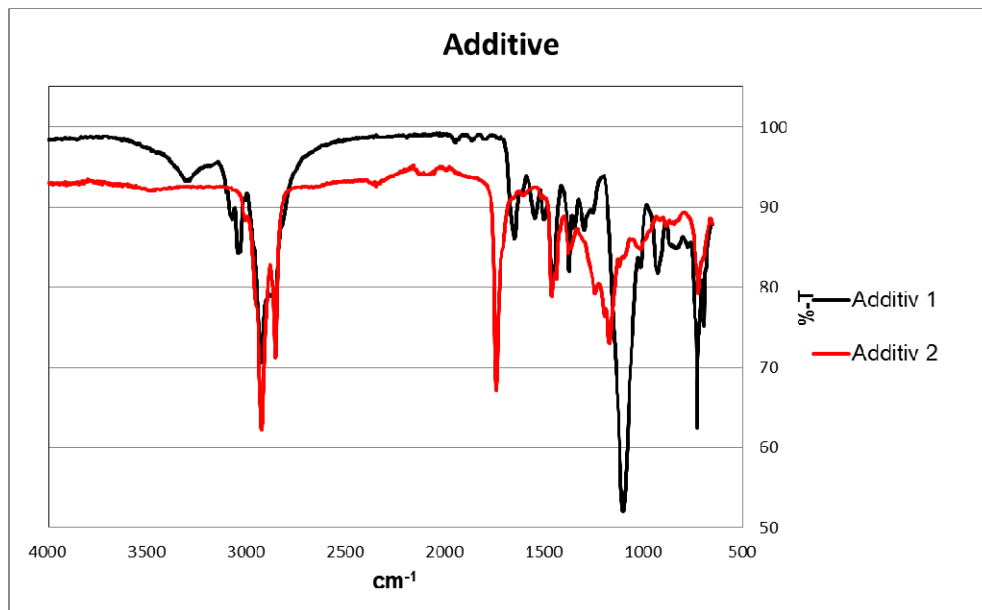


Abb.5 FTIR-Spektren der chemischen Additive

2.1.3 Anlieferungskontrollen bei Zeotlihe

Zeolithe sind Gesteinskörnungen, welche bei Temperaturen oberhalb des Siedepunktes von Wasser, kristallin gebundene Wasser-Moleküle abgeben. Gemäss Herstellerangaben können bis zu 20 Masse.-% des Zeolithes in Form von feindispersen Dampf aus der Gesteinskörnung treten. Dieser Masse-Verlust kann zur Anlieferungskontrolle genutzt werden:

- **Differential-Scanning Calorimetry DSC:**
Bei dieser, in der chemischen Analytik gebräuchlichen Methode, wird eine Probe auf einem Wägetisch kontinuierlich erhitzt. Der Gewichtsabfall in Funktion der Temperatur gibt Aufschlüsse über die Zusammensetzung der Probe. Bei der Untersuchung eines Zeolithes wird dadurch die aus der Gesteinskörnung ausgetretenen Menge Wasser erfassbar. Die DSC wird auch in [8] für einen qualitativen und quantitativen Nachweis empfohlen.
- **Masse Verlust**
Der Masse-Verlust kann auch ganz einfach festgestellt werden, indem eine Probe Zeolithe in einen Wärmeschränk bei ca. 130 °C gelagert wird und der Masse-Verlust gemessen wird. Durch Vergleich mit einer Referenzprobe kann das Verfahren zur Anlieferungskontrolle eines bestimmten Produktes präzise festgelegt werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Zeolithe ein feines Pulver ist, welches die Umgebungsfeuchte rasch aufnimmt. Es empfiehlt sich daher, die Probe vorgängig bei Temperaturen deutlich unterhalb von 100 °C (zum Beispiel 40°C) bis zur Massekonstanz zu trocknen.

2.1.4 Anlieferungskontrollen bei Schaumbitumen

Bei der Herstellung von NT-Asphalt mit der Schaumbitumen-Technologie werden die herkömmlichen Bindemittel und Gesteinskörnungen verwendet. Die Temperaturabsenkung erfolgt durch ein Mischverfahren direkt in der Anlage; es fallen keine Zwischenprodukte an. Aus diesem Grunde erfordert dieses Verfahren keine besonderen Anlieferungskontrollen, ausser den bei einer Aufbereitungsanlage üblichen, routinemässigen Kontrollen.

2.2 Kontrollen der Aufbereitung (Mischgutkontrollen)

2.2.1 Zusammensetzung des Mischgutes

Eine der Zielsetzungen des vorliegenden Projektes ist es, zu überprüfen, ob die üblichen Prüfverfahren zur Kontrolle von Heissmischgut auch für NT-Asphalte verwendet werden können. Zudem soll eine Auswahl an Prüf- und Kontrollverfahren vorgeschlagen werden, mit welchen die Aufbereitung und der Einbau von NTA überwacht werden kann

Die Überwachung der Mischgutaufbereitung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle WPK basiert auf Standard-Laborprüfungen, wobei folgende Kenngrössen bestimmt werden:

- löslicher Bindemittelgehalt
- Korngrössenverteilung
- Marshall-Hohlraumgehalt
- Erweichungspunkt RuK des rückgewonnenen Bindemittels sofern Asphaltgranulat verwendet wird

Grundsätzlich ist auch diese Frage für jede Sorte der NT-Asphalte einzeln zu bearbeiten:

- Wachsmodifizierte NT-Asphalte
Die Bestimmung der Zusammensetzung des Mischgutes in einer Extraktion mit anschliessender Siebanalyse wird seit vielen Jahren völlig problemlos durchgeführt. Bei der Bindemittelrückgewinnung besteht bezüglich des verwendeten Lösemittels zurzeit eine gewisse Verunsicherung. Einerseits werden gewisse Lösemittel in naher Zukunft nicht mehr erhältlich sein (REACH) und andererseits legen die Prüfnormen nicht einheitlich fest, welche Lösemittel zu verwenden sind. Die EN 12697-3 [10] lässt eine Vielzahl an Lösemittel zu. Die SN 670 403 [11] legt als Standard-Lösemittel Toluol fest, für wachsmodifizierte Bindemittel wird die Verwendung von Trichlorethen empfohlen. Auch das Merkblatt für Temperaturabsenkung der FGSV [8] schreibt die Verwendung von Trichlorethen vor.
Die zurzeit in der Schweizer Norm festgelegte Regelung stellt einen bestmöglichen Kompromiss auf der Basis der heutigen Sachlage dar.
- NT-Asphalt mit chemischen Additiven
Die Dosierung der Additive liegt bei etwa 0.4 Masse-% bezogen auf das Bindemittel; auf das Mischgut bezogen entspricht diese Dosierung etwa 0.02 %. Die im Strassenbaulabor verwendeten Prüfverfahren weisen – auch unter Berücksichtigung der Inhomogenität des Mischgutes – Wiederholbarkeiten auf, die deutlich grösser als 0.02 % sind. Die zudosierte Menge von ca. 200 Gramm pro Tonne Mischgut lässt sich im Labor nicht feststellen.
Somit können die Prüfverfahren zur Bestimmung der Zusammensetzung des Mischgutes bedenkenlos verwendet werden.

- **NT-Asphalt mit Zeolithe**
Bei der Verwendung von Zeolithe werden die mineralischen Komponenten bei der Rezeptierung dem Füller zugeschlagen; bei der Bestimmung der Korngrössenverteilung fallen sie in der Füllerkomponente an. Es könnte allenfalls argumentiert werden, dass das aus dem Zeolithe freiwerdende Wasser die Laborprüfungen beeinflussen könnten. Analog der Mengenbetrachtung bei den chemischen Additiven sein auch hier die Grössenordnungen aufgeführt: Zeolithe werden zu ca. 2.5 kg pro Tonne Mischgut beigemischt. Nimmt man einen maximalen Wasserausstoss von 20 % an, so ergeben sich ca. 0.05 % Wasser im Mischgut. Diese Menge ist bei der Untersuchung der Zusammensetzung des Mischgutes vernachlässigbar.
- **Schaumbitumen**
Schaumbitumen wird durch Beigabe von ca. 2 bis 3 Masse-% Wasser, bezogen auf das Bindemittel, erstellt. Dies bedeutet, dass bei einem angenommenen Bindemittelgehalt von 5 Masse-%, das Mischgut ca. 0.1 bis 0.15 M.-% Wasser enthält. Die Angabe des Wassergehaltes im Rahmen einer Erstprüfung kann dazu dienen, im Zweifelsfall via Bestimmung des Wassergehaltes festzustellen, ob bei der Aufbereitung Probleme entstanden sind.
Erfahrungsgemäss können bei Wassermengen von mehr als 0.5 M.-% die mechanischen Eigenschaften des Mischgutes entscheidend verändert werden.

2.2.2 Nachweis der Zusätze im Mischgut

Der Nachweis der verwendeten chemischen Zusätze aus einer Mischgutprobe könnte in der Praxis eine interessante Fragestellung sein. Daher wurden zwei Mischungen eines Bitumen B70/100 mit zwei unterschiedlichen Additiven in deren üblichen Dosierung von 0.3 Masse-% im FTIR-Spektrometer untersucht. Die Spektren sind in der *Abb.6* dargestellt. Die aus der Untersuchung der Additive in reiner Form bekannten Peaks (siehe *Abb.5*) sind infolge der sehr geringen Dosierung nicht mehr ersichtlich. Somit kann festgehalten werden, dass sich die Methode der FTIR-Analyse zur nachträglichen Bestimmung einer allfälligen Zugabe von chemischen Zusätzen nicht eignet.

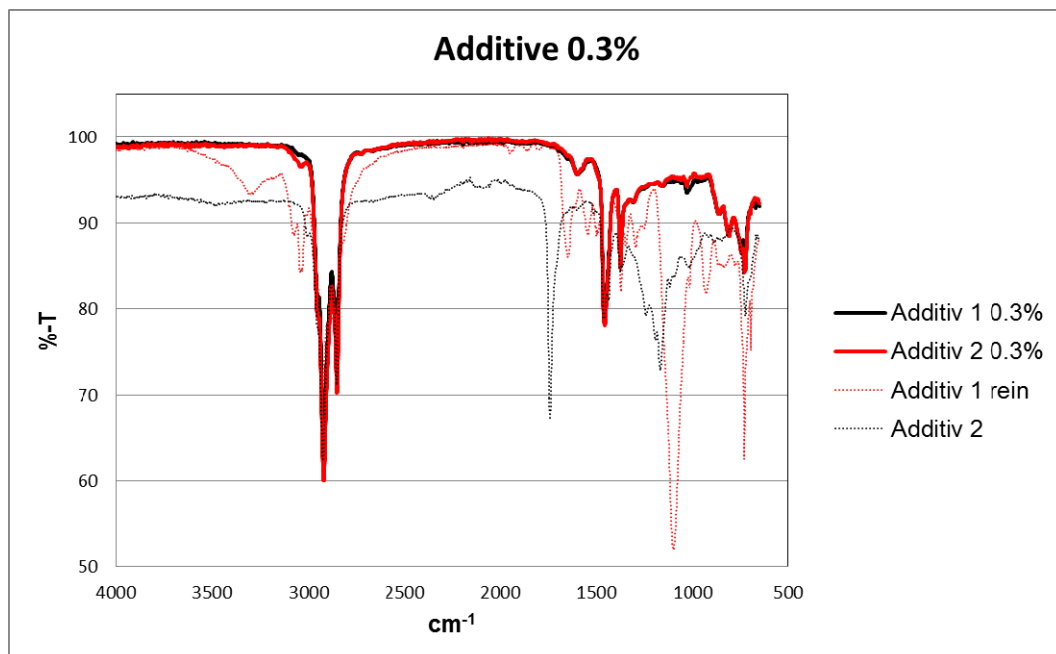


Abb.6 FTIR-Spektren von Mischungen eines B 70/100 mit chemischen Additiven in deren üblichen Dosierung von 0.3 Masse-% (auf das Bitumen bezogen) im Vergleich zu den Spektren der reinen Additive.

2.2.3 Verdichtung im Labor

Verdichtungstemperatur

Die Temperatur, bei welcher die Referenz-Raumdicke zur Beurteilung der Verdichtungsleistung auf der Baustelle bestimmt wird, spielt eine bedeutende Rolle. Im Rahmen des Forschungspaketes wurde diese Temperatur durch Voruntersuchungen (siehe Kapitel 4) festgelegt und von allen Forschungsstellen einheitlich angewendet.

In der Praxis ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Angabe des Lieferanten:
der Lieferant des zur Aufbereitung von NT-Asphalt verwendeten Bindemittels gibt die Verdichtungstemperatur Marshall an. Diese ist in der Erstprüfung aufzuführen.
- Die Marshall-Verdichtungstemperatur wird im Labor gem. dem Merkblatt für Temperaturabsenkung der FGSV [8] bestimmt. Dabei wird die Raumdicke des NT-Mischgutes sowohl bei 3 unterschiedlichen Temperaturen als auch bei der in der Norm SN 470 430 [13] festgelegten Verdichtungstemperatur bestimmt. Durch Interpolation wird diejenige Temperatur für das NT-Mischgut gewählt, bei welcher die gleiche Raumdicke wie beim nicht modifizierten Heissasphalt erreicht wird.

Zeitlicher Ablauf der Laboruntersuchungen

Die viskositätsreduzierende Wirkung von Zeolithe und Schaumbitumen ist – im Unterschied zur Modifikation mittels Wachs oder chemischem Zusatz - zeitlich begrenzt, was prinzipiell zu Verfälschungen der Ergebnisse führen könnte. Eine nicht mehr aktive, viskositätsreduzierende Wirkung könnte sich massiv auf die Raumdicke im Marshall-Prüfkörper auswirken. Aufgrund der Erfahrungen und der Angaben der Lieferanten kann dazu bemerkt werden, dass keinerlei Probleme auftreten, solange die auch für Heissbitumen geltenden zeitlichen Abläufe im Labor eingehalten werden

2.3 Einbaukontrollen

Die Durchführung von Verdichtungskontrollen mittels Isotopen-Sonde kann problemlos durchgeführt werden.

Die Entnahme von Bohrkernen kann, analog dem Heissmischgut, nach vollständigem Erkalten der Schicht erfolgen.

Die Bestimmung der volumetrischen Kennwerte am Bohrkern (Raumdicke und daraus abgeleitet Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad) kann analog dem Heissmischgut erfolgen.

Bei der Bestimmung des Schichtenverbundes gelten die gleichen Bemerkungen wie für Heissmischgut auch: Falls die Werte aus Bohrkernen, welche unmittelbar nach dem Einbau entnommen wurden die Anforderungen nicht erfüllen, sind frühestens 6 Monate später erneut Bohrkern zu untersuchen. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Schichthaftung mit der Zeit zunimmt.

3 Versuchsfelder

3.1 Konzept

Bereits im Initialprojekt zum Forschungspaket [1] wurde der Einbau von Versuchsfeldern vorgesehen. Damit soll allen Einzelprojekten die Gelegenheit geboten werden, ihre spezifischen Bedürfnisse an den gleichen Testfeldern abzudecken. Indem alle Einzelprojekte an den gleichen Versuchsfeldern arbeiten, konnte nicht nur eine effiziente Arbeitsweise erreicht werden, sondern es boten sich auch viele Synergien an. Im Rahmen des geplanten Syntheseberichtes zum Forschungspaketes können somit über alle Einzelprojekte Schlussfolgerungen gezogen werden.

Nach mehreren Gesprächen mit verschiedenen Bauherren im Mittelland, konnte mit der Strecke in Wohlen bei Bern eine optimale Lösung gefunden werden. Auf einer Länge von 850 m war auf dieser Strasse ein Totalersatz der bestehenden Schichten geplant. Ab Dorfende bis zum Wald (siehe Abb.7) liegt die Strasse in offenem Gelände, sodass die Witterungsverhältnisse auf der gesamten Länge als vergleichbar gelten. Auf der Strecke gibt es weder Abzweigungen noch Kreuzungsbereiche; die Verkehrsbelastung ist somit für alle Testfelder innerhalb der Teststrecke gleich. Das zuständige Tiefbauamt des Kantons Bern war sehr an der Weiterentwicklung der Niedertemperatur-Asphalte interessiert und unterstützte das Projekt grosszügig.



Abb.7 Lage der Uettlingenstrasse auf welcher die Testfelder eingebaut wurden

Ursprünglich waren 3 Testfelder vorgesehen, wie dies in der Ausschreibung zum Forschungsprojekt beschrieben ist. Aufgrund verschiedener, zusätzlicher Bedürfnisse wurden dann insgesamt 5 Testfelder zu je 170 m Länge eingebaut. Die Länge der Testfelder erlaubte einen kontinuierlichen Einbau; die erforderliche Mischgutmenge von 180 t pro Feld bot Gewähr, dass auch die Aufbereitung der unterschiedlichen Mischgutsorten unter praxisgerechten Bedingungen erfolgen konnte. Die gesamte Teststrecke umfasste eine Fläche von 5 800 m².

Die Wahl der Mischgutsorte fiel auf eine Binderschicht mit einem Grösstkorn von 16 mm. Dies liess sich wie folgt begründen:

- Die meisten Anwendungen von NT-Asphalt mit Bitumen-Schaum-Technologie finden in den Trag- und Binderschichten statt. Es ist dementsprechend sinnvoll eine der häufigsten Schichten zu wählen
- Die Aufbereitung des Mischgutes für die einzelnen Testfelder musste eine möglichst grosse Menge umfassen, um eine kontinuierliche Aufbereitung zu gewährleisten. Dies sprach für ein grobkörniges Mischgut, welches in grosser Schichtdicke eingebaut wird
- Aus labortechnischer Sicht sind feinkörnige Mischgutsorten erwünscht, um Entmischungen vorzubeugen. Auch sind mit feinkörnigen Mischungen kleinere und handlichere Prüfkörper möglich.

Die Wahl einer AC B 16 stellt einen guten Kompromiss der unterschiedlichen Bedürfnisse dar.

In Absprache mit dem Tiefbauamt des Kanton Bern wurde folgender Aufbau vorgesehen:

Aufbau:

Deckschicht	AC 11	4.0 cm
Binderschicht	ACB 16	6.5 cm; Schicht der Testfelder
Tragschicht	ACT 22	9.5 cm
Fundationsschicht	ACF	12 cm

Bei der Wahl der Art des NT-Asphaltes wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

• **Fil rouge»:**

Im Initialprojekt [1] wurde für das Forschungspaket ein sogenannter „roter Faden“ definiert. Die Idee war, dass alle Einzelprojekte (EP) je nach Fragestellung wohl unterschiedliche Mischgutsorten untersuchen sollen, dass jedoch alle EP einige ausgewählte Mischgutsorten untersuchen sollen. Damit wollte man eine Brücke zwischen den einzelnen EP bauen. Für den fil rouge wurden folgende Verfahren vorgegeben:

- NTA mit chemischem Zusatz
- NTA mit Zeolith
- NTA mit wachsmodifiziertem Bindemittel
- NTA mit Schaumbitumen-Technologie

• **Recycling-Asphalt**

Um die Anzahl der Parameter zu reduzieren wurde beschlossen, die Mischgutsorten des „fil rouge“ ohne Recyclingasphalt (RA) aufzubereiten. Dieser Entscheid fiel nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund des laufenden Forschungsprojektes zum Thema Recycling.

Im Rahmen der Vorbereitungen der Teststrecke wurde argumentiert, die Verwendung von RA in Trag- und Binderschichten sei heute bei Heissaufbereitungen üblich und gewinne zunehmend an Bedeutung. Mit der Verwendung von RA-Mischgut bei einem einzigen Testfeld wurde der Link zur Praxis erstellt. Auch wurde beschlossen ein Referenzfeld mit Heiss-Mischgut einzubauen, um nicht nur einen relativen Vergleich der verschiedenen NTA-Sorten zu ermöglichen, sondern auch einen Bezug zu den herkömmlichen Mischgutsorten zu erhalten.

• **Keine wachsmodifizierten Bindemittel**

Infolge der beschränkten Anzahl der Testfelder wurde entschieden, kein Feld mit wachsmodifiziertem Mischgut einzubauen. Einerseits wurden mit wachsmodifizierten Bindemittel schon viele Teststrecken eingebaut und analysiert, andererseits wollte man den Fokus auf Technologien setzen, bei denen bisher in der Schweiz wenig untersucht wurde. Da das wachsmodifizierte Mischgut im «fil rouge» enthalten ist, beschäftigt sich das Forschungspaket auch mit der Wachsmodifikation.

- **Wahl der Verfahren:**

Auf der Basis der oben aufgeführten Argumente wurden folgende Mischgutsorten ausgewählt:

Referenz-Mischgut : AC B 16 S
Bitumen B 50/70
Bezeichnung: **REF**

Chemischer Zusatz: AC B 16 S
Bitumen B 50/70
0.4 % chemischem Zusatz bezogen auf das Bindemittel;
Bezeichnung: **PACK** (diese Kurzbezeichnung leitet sich vom französischen Begriff „package chimique“ ab.)

Bei chemischen Zusätzen handelt es sich um Additive, welche die Oberflächenspannung des Bitumens reduzieren und somit das Mischgut „flüssiger“ machen. Dieser Effekt wird genutzt, um bei niedrigeren Temperaturen arbeiten zu können. Diese Additive wirken einzig als Einbauhilfe und verändern die Rheologie des Bitumens in der Gebrauchstemperaturspanne (ca. -20 bis + 60°C) in keiner Art und Weise. Die zu dosierte Menge ist mit ca. 200 g pro Tonne Mischgut sehr gering.

Zeolith: AC B 16 S
Bitumen B 50/70
2.5 kg Zeolith pro Tonne Mischgut
Bezeichnung: **ZEO**

Zeolithe sind natürlich vorkommende oder künstlich hergestellte, kristalline Alkali- bzw. Erdalkalisilikate, bei denen Wassermoleküle im Kristallgitter eingebunden sind. Wird dieser mineralische Zusatz auf über 100°C erhitzt, tritt feindisperser Dampf aus dem Gestein, welcher lokal zu einer Schaumbildung führt. Dieser Schaum reduziert die Viskosität des Mischgutes, sodass dieser einfacher eingebaut werden kann. Dieser Effekt wird zur Reduktion der Einbautemperatur genutzt.

Schaum AC B 16 S
B 250/330 + B35/50 geschäumt
Bezeichnung: **WATER**

Bei dieser Technologie werden die Gesteinskörnungen mit einer Doppel-Ummantelung umhüllt. In einem ersten Schritt wird etwa die Hälfte des Bitumengehaltes in einer weichen Bitumensorte zu dosiert (B 250/330). In einem zweiten Schritt wird dann hartes Bitumen in der Aufbereitungsanlage aufgeschäumt und zu dosiert. Analog zur Schaumbildung beim Zeolith reduziert sich die Viskosität des Mischgutes, welches dann bei niedrigeren Temperaturen eingebaut und verdichtet werden kann.

Schaum mit R AC B 16 S
B 250/330 + B70/100 geschäumt
50 % RA (Recycling Asphalt)
Bezeichnung: **WATER+RAP**

Das Verfahren ist das gleiche wie beim „Schaum“, allerdings werden weichere Bitumensorten verwendet, um das harte, gealterte Bitumen aus dem Asphaltgranulat zu kompensieren.

3.2 Planung

Die Koordination der Aufbereitung und des Einbaus wurde unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der einzelnen EP an gemeinsamen Sitzungen der Projektleiter der EP unter der Federführung des EP6 durchgeführt.

Das Bauprogramm zur Instandstellung der Uetzingenstrasse wurde vom Tiefbauamt des Kantons Bern derart angepasst, dass der Einbau der 5 Versuchsfelder am Samstag 6. Oktober 2012 stattfinden konnte.

Die Reihenfolge der Versuchsfelder wurde wie folgt festgelegt.

1. REF (Heissmischgut als Referenz)
2. PACK (chemisches Zusatzmittel)
3. ZEO (Zeolith)
4. WATER (Schaumbitumen)
5. WATER + 50% RAP (Schaumbitumen mit Zugabe von 50% Asphaltgranulat)

Für die Anlage wäre es sinnvoller gewesen mit absteigender Temperatur vorzugehen, d.h. nach REF die Mischung WATER + 50% RAP zu produzieren. Für die Messungen der Luftqualität durch EP7 wäre diese Reihenfolge aber sehr ungünstig gewesen, denn es wurde befürchtet, dass die allenfalls im Recycling-Material (RAP) vorhandenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (Teer) die weiteren Aufbereitungen kontaminieren könnten. Daher wurde beschlossen, das Mischgut mit Recyclinganteile zuletzt einzubauen.

Vor dem Einbau der Versuchsfelder mussten unterschiedliche Vorbereitungen getroffen werden. Für das EP3 wurden Schächte für die Sensoren in die Strasse eingebaut, für das EP6 wurden 3 Probemischungen hergestellt und für das EP7 musste der Zugang zu den Anrainer Parzellen für den Aufbau von Messgeräten sichergestellt werden.

Der Einbautag begann um 03.45 Uhr mit der Beurteilung der Wetterprognose; die Aufgaben der einzelnen Entscheidungsträger wurden minutiös geplant und in einer Tabelle zusammengefasst (siehe *Abb.8*). In den Tagen nach dem Einbau musste für Bohrkernentnahmen und andere Messungen ein Verkehrsdienst organisiert werden.

Datum	Wer	Was
X - 21/14 Tage	Weibel	Probeaufbereitungen: Cecabase, Zeolith, FR-Water Probenahme durch Weibel; je 5 MG-Schachteln
X - 30 Tg	SMT	Info an Anwohner
X - 14 Tg	EMPA	Bauverwalter Peter Känzig; 031 828 81 64 Info an IMP wann Besprechung vor Ort stattfindet (Info an Bauer wegen Land)
	EMPA	Meteostation aufbauen (300 m von Strasse weg)
X - 7 Tg	EMPA	Besichtigung Fertiger
X-1 Tg	Weibel	pro Messfeld ein Schacht für die Sensoren des LAVOC
X-1 Tg	EMPA	Messeinrichtung an Fertiger montieren
X -1 Tg	Rupp/Angst	Einbau ja/nein?; Mitteilung per SMS / Mail an Projektleiter der EP, welche die eigene Organisation informieren
X	Einbau der Binderschicht ACB 16S	
3.45 h	Rupp/Angst	Einbau ja/nein?; Mitteilung per SMS / Mail an Projektleiter der EP, welche die eigene Organisation informieren
04.00 Uhr	SMT	Vollsperrung
08.00 h	alle	Beginn Einbau
laufend	IMP / LAVOC	Probenahme in der Anlage; 1 t auf Lieferwagen; 2 Laboranten füllen Schachteln ab; Entnahme ab 3. LW
laufend	Neosys	Ablezen der Zähler (Oel) nach jeder Produktion eines Mischguttypes
X - 1 Stunde	LAVOC	Installation der Messzellen: 5 x für Dehnungen / 2 Temp. Fühler pro Feld
X - 1 Stunde	Weibel	alle Maschinen voll betankt (Diesel)
	Weibel	Einbau: 125 t pro Testfeld / 5 LW / Fertigergeschwindigkeit 3 m / Min. Fertiger wird nicht ausgefahren; Uebergangszone von ca. 10 m
	IMP	Uebergangszonen markieren (Anfang = abkippen der folgenden Mischgutsorte in den Fertiger/ Ende= 10 m danach)
	IMP	Lage der Sensoren LAVOC festhalten/markieren
	EMPA EP7	mind. 45 Min. Messung während Einbau = Fertigergeschwindigkeit 3 m / Min
	EMPA EP7	30 Min. Umhängen der PAK/VOC-Röhrchen
	IMP	Entnahme Mischgutproben auf den Probestrecken (4 x 2 Schachtel pro Feld)
	IMP	Einbauprotokoll gem.
	IMP	Messungen der Temperaturen (LW / Fertigermulde / hinter Fertiger)
	IMP	Verdichtungskontrollen Troxler an definierten Profilen
	Ammann/IMP	IR-Fotos hinter dem Fertiger
	IMP	Foto-Doku: systematisch alle x Minuten ein Bild aufnehmen
Einbau Ende	Weibel	alle Maschinen betanken zur Berechnung des Diesel-Verbrauches
X +1 Kalendertag	SMT	aufheben der Vollsterrung am folgenden Morgen
X +1 Werktag	IMP	BK-Entnahme

Abb.8 Systematische Planung des Einbautages

3.3 Realisierung

3.3.1 Einbau

Der Einbau der Binderschicht AC 16 B S in den 5 aufeinanderfolgenden Testfeldern erfolgte am Samstag 06.10.2012 bei besten Einbaubedingungen unter Vollsperrung der Strasse. Der Einbau der Deckschicht erfolgte am 13.07.2013 dh ein Jahr später.



Abb.9 Ideale Witterung beim Einbau



Abb.10 Minutiöse Kontrolle des Einbaus



Abb.11 Grosses Interesse der Presse

3.3.2 Einbaukontrollen

Die Temperaturen des Mischgutes wurden sowohl in der Mulde des Fertigers als auch hinter der Fertigerbohle gemessen, die Ergebnisse sind in der Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1 Mischgut-Temperaturen in der Mulde des Fertigers und hinter der Bohle [°C]					
	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+RAP
Soll-Aufbereitungs Temperatur	165	130	130	115	115
Temperatur in der Mulde	158	132	137	112	118
Temperatur hinter dem Fertiger	145	123	128	107	106

Die gemessenen Temperaturen entsprechen recht genau den angestrebten Mischguttemperaturen.

In jedem Testfeld wurde an 2 bis 4 Messstellen die Oberflächentemperatur und die Zunahme des Verdichtungsgrades in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen aufgezeichnet. In den untenstehenden Abb.12 bis Abb.16 sind die Ergebnisse der einzelnen Messstellen grafisch dargestellt.

Es fällt auf, dass beim Testfeld REF die Temperatur deutlich schneller abfiel als bei den übrigen Testfeldern. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das Testfeld REF als erstes Feld am frühen Morgen, bei noch etwas tieferen Temperaturen, eingebaut wurde.

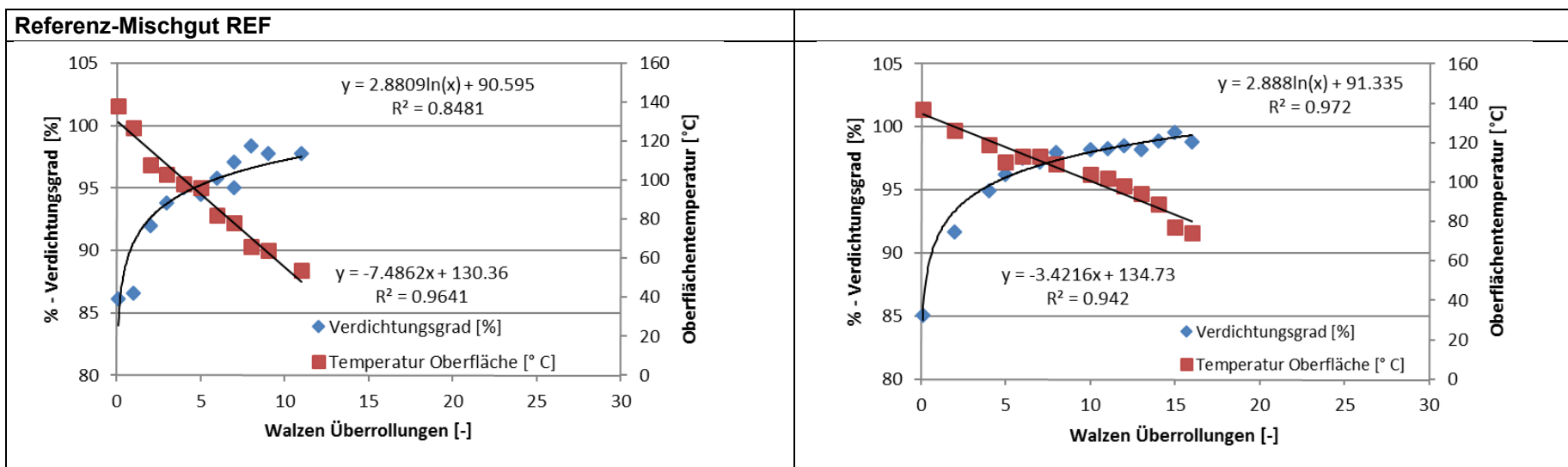


Abb.12 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen des Verdichtungsgrades und der Temperatur während des Verdichtungsvorganges beim Testfeld REF (Referenz-Heissmischgut)

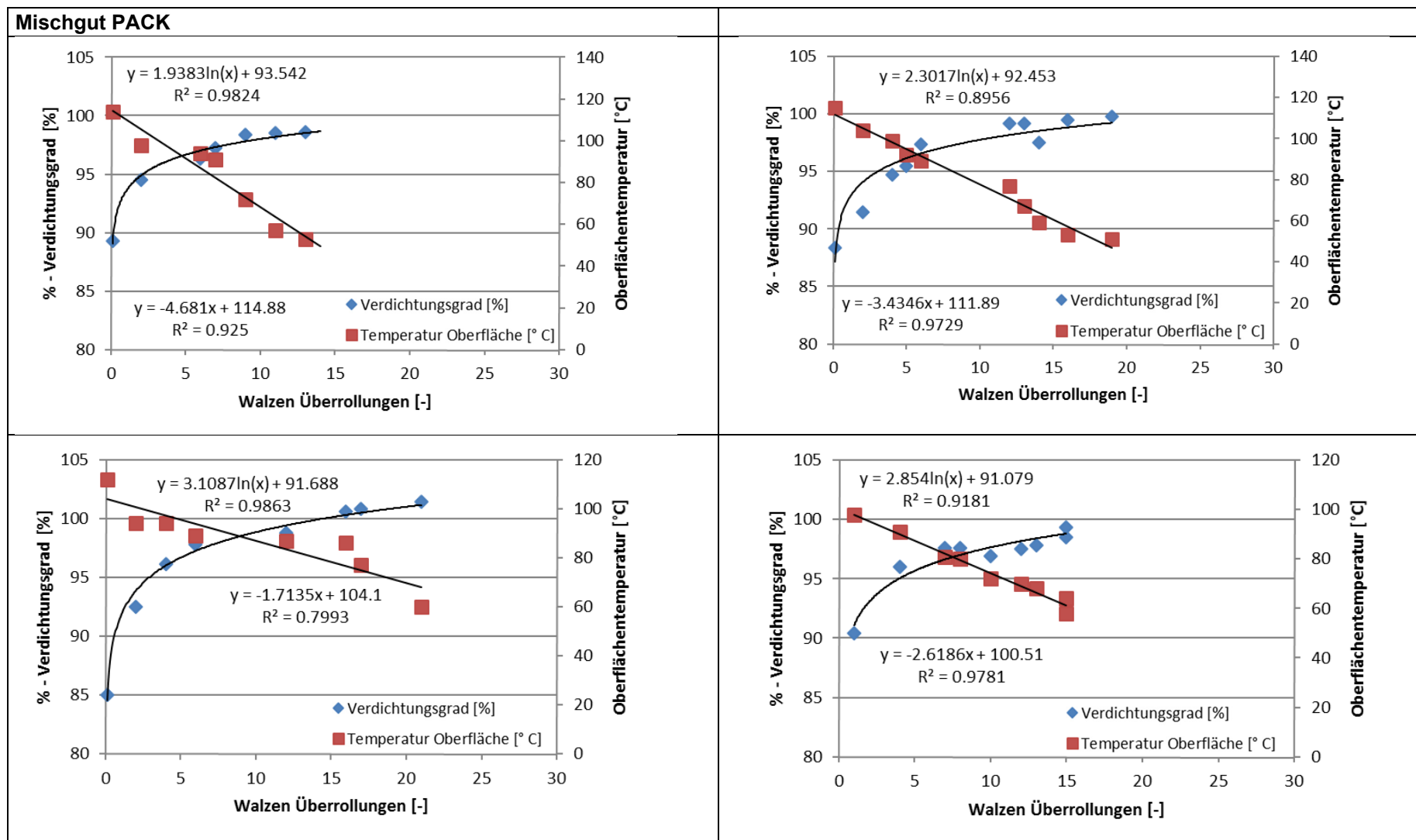


Abb.13 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen des Verdichtungsgrades und der Temperatur während des Verdichtungsvorganges beim Testfeld PACK (NTA mit chemischem Additiv)

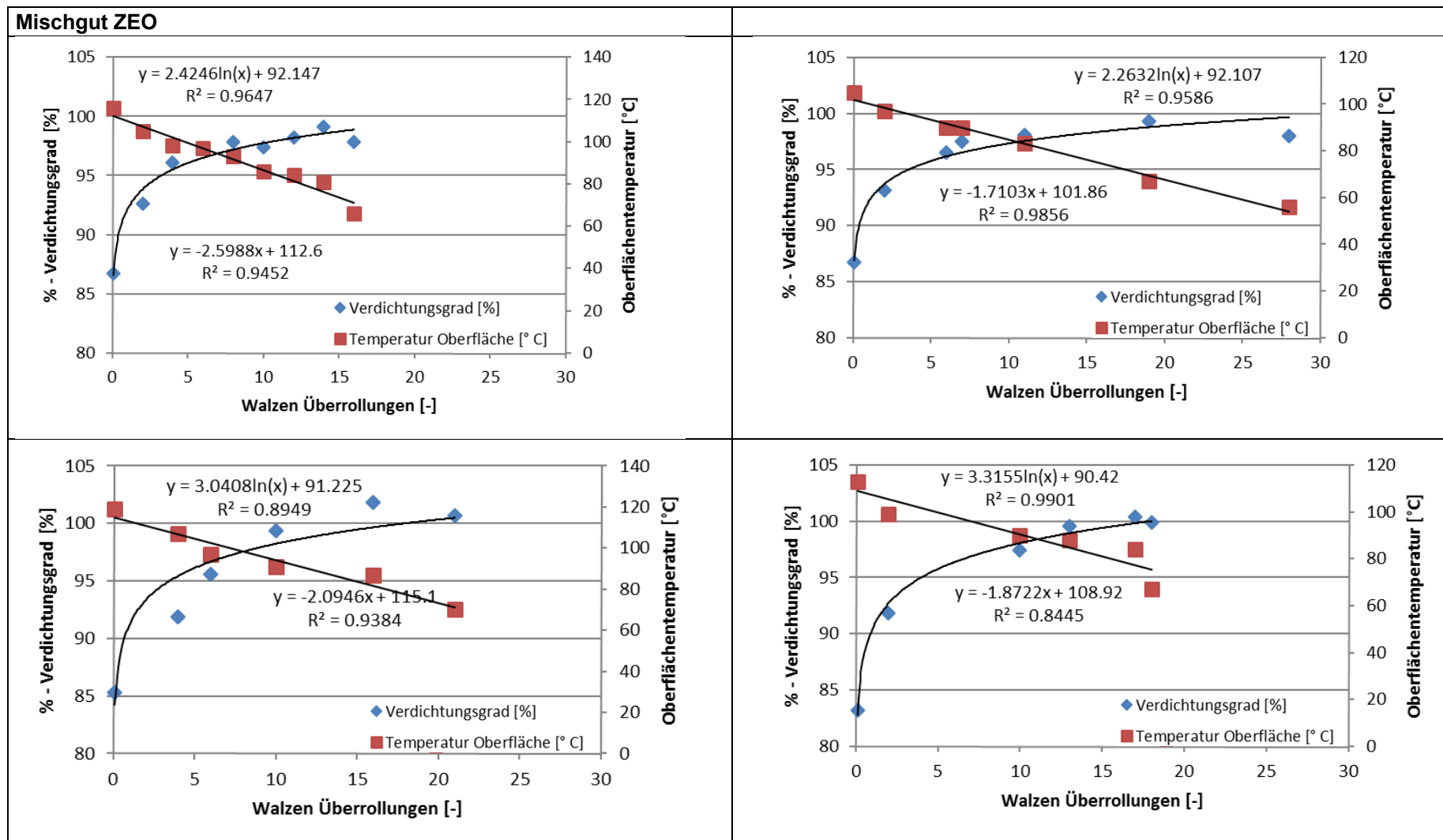


Abb. 14 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen des Verdichtungsgrades und der Temperatur während des Verdichtungsvorganges beim Testfeld ZEO (NTA mit Zeolith)

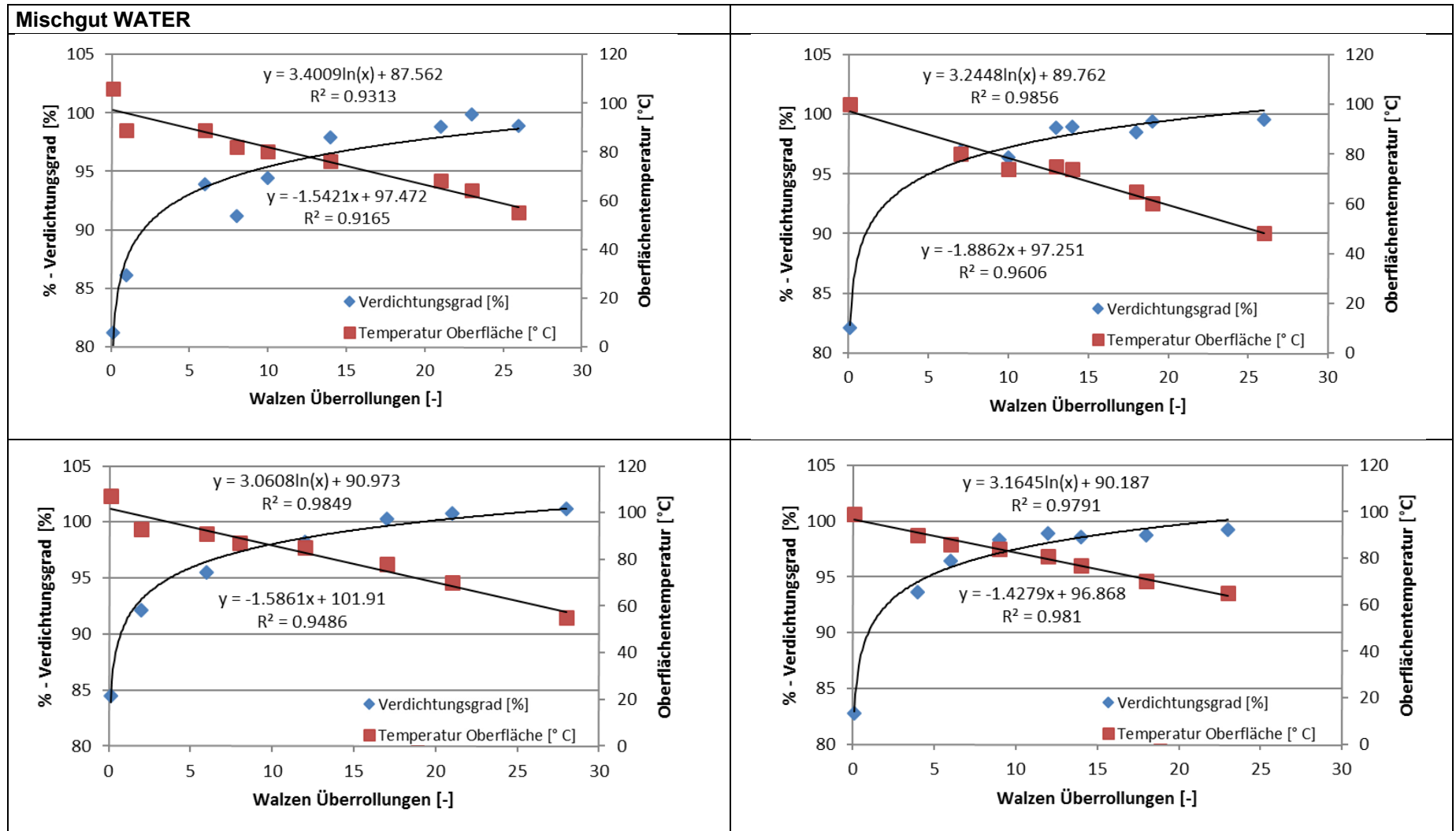


Abb.15 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen des Verdichtungsgrades und der Temperatur während des Verdichtungsvorganges beim Testfeld WATER (NTA mit Schaumbitumen)

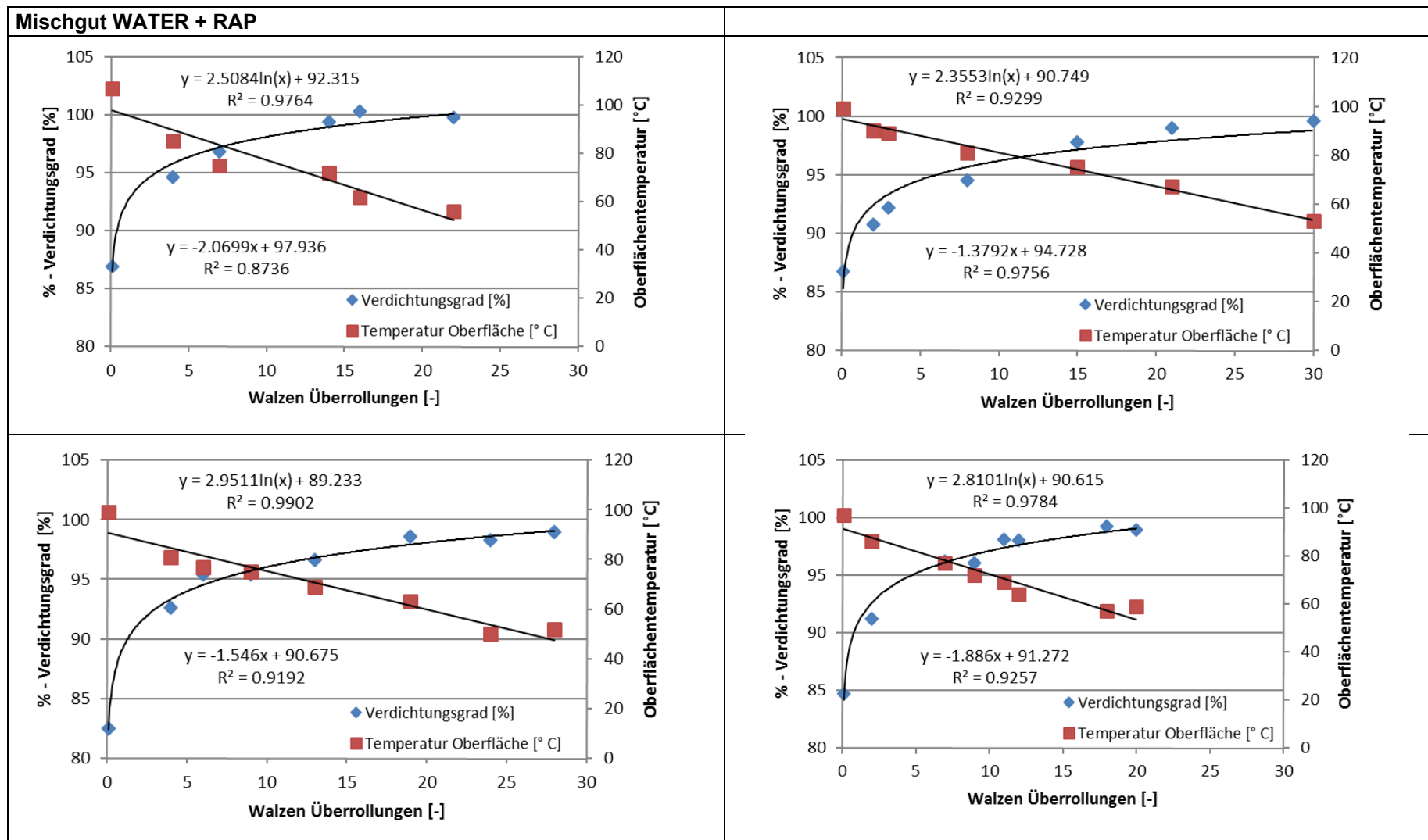


Abb.16 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen des Verdichtungsgrades und der Temperatur während des Verdichtungsvorganges beim Testfeld WATER +RAP (NTA mit Schaumbitumen und Asphaltgranulat)

Die Zunahme des Verdichtungsgrades in Funktion der Anzahl Überrollungen wurde mit folgender Funktion modelliert:

$$y = a \ln x + b$$

Wobei:

y: Verdichtungsgrad

x: Anzahl Überrollungen

In der Tab. 2 wurden die Regressionskurven ausgewertet und die zur Erreichung eines Verdichtungsgrades von 99% (bzw. 100%) erforderlichen Anzahlen Walzübergänge berechnet. Wie aus der grafischen Darstellung der erforderlichen Anzahl Übergänge in Abb.17 zu entnehmen ist, benötigt die Mischung mit Asphaltgranulat (WATER RAP) deutlich mehr Walzübergänge als die übrigen Mischungen. Während bei den Mischungen REF, PACK, ZEO und WATER 21 bis 25 Walzübergänge erforderlich waren, um einen Verdichtungsgrad von 100% zu erreichen, benötigte die Mischung WATER+RAP 33 Übergänge. Daraus wird klar ersichtlich, dass die Verwendung von Asphaltgranulat einen der Vorteile der Schaumbitumen-Technologie massiv beeinträchtigt.

Beim Vergleich mit dem Heissmischgut REF ist zu beachten, dass dieses erste Testfeld bei noch tieferen morgendlichen Temperaturen eingebaut wurde.

Global betrachtet sind die Unterschiede zwischen den Mischgutsorten – mit Ausnahme des Mischgutes WATER+RAP – nicht sehr gross; sie liegen innerhalb von $\pm 10\%$ im Vergleich zum Heissmischgut REF. Beim Mischgut WATER + RAP wurden deutlich mehr Walzübergänge benötigt. Daraus wird klar ersichtlich, dass die Verwendung von Asphaltgranulat die Wirkung des Schaumbitumens reduziert. Dies ist nicht erstaunlich, denn der Anteil Bitumen aus dem Recyclingasphalt (40 %) kann nicht geschäumt werden.

Tab. 2 Auswertung der Regressionskurven des Verdichtungsgrades in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen

		REF	PACK	ZEO	WATER	WATER RAP
a-Wert	Messpunkt 1	2.881	1.938	2.425	3.401	2.508
	Messpunkt 2	2.888	2.302	2.263	3.245	2.355
	Messpunkt 3		3.109	3.041	3.061	2.951
	Messpunkt 4		2.854	3.316	3.165	2.810
	Mittelwert	2.884	2.551	2.761	3.218	2.656
b-Wert	Messpunkt 1	90.595	93.542	92.147	87.562	92.315
	Messpunkt 2	91.335	92.453	92.107	89.762	90.749
	Messpunkt 3		91.688	91.225	90.973	89.233
	Messpunkt 4		91.079	90.420	90.187	90.615
	Mittelwert	90.965	92.191	91.475	89.621	90.728
Verdichtungsgrad		Anzahl erforderlicher Walzübergänge				
99%		16	14	15	18	23
100%		23	21	22	25	33

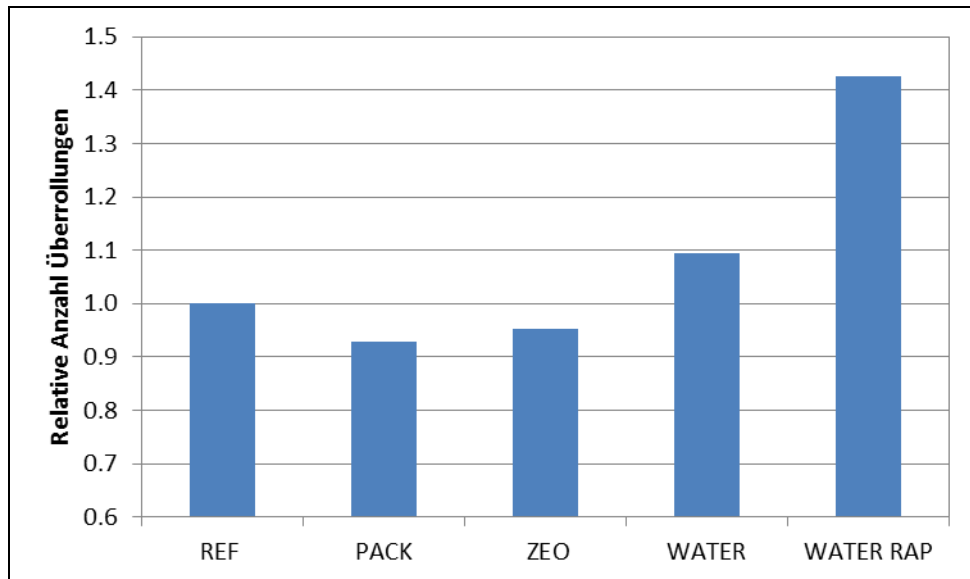


Abb.17 Relative Anzahl erforderlicher Walzenübergänge um einen Verdichtungsgrad von 100 % zu erreichen

Tab. 3 Gemessene Vorverdichtung hinter dem Fertiger

Testfeld	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER + RAP
Verdichtungsgrad [%]	85.6	87.6	85.5	82.7	85.2

Die mit dem Fertiger erreichte Vorverdichtung wurde bestimmt, indem die Troxler-Werte direkt hinter der Bohle aller Messpunkte ausgewertet wurden. Aus der *Tab. 3* geht hervor, dass REF, ZEO und WATER+RAP etwa die gleiche Vorverdichtung erreichten, bei WATER lag sie um ca. 3 % tiefer, bei PACK um ca. 2 % höher. Mit der einbauenden Unternehmung wurde vereinbart, dass zu Vergleichszwecken die Einstellungen am Fertiger nicht verstellt wurden. Für die Unterschiede gibt es keine plausible Erklärung.

3.3.3 Mischgutkontrollen

In der Aufbereitungsanlage wurden Proben entnommen und im Labor untersucht, die Ergebnisse sind in der *Tab. 4* zusammengefasst und die Siebsummenkurven in der Abb.18 grafisch dargestellt.

Tab. 4 Ergebnisse der Mischgutuntersuchungen

	Marshall-Versuch				Zusammensetzung Mischgut					
	Stab S	Flies F	Raum- dichte	Hohlraum- gehalt	lösl. BM- Anteil	0.063 mm	1 mm	2 mm	8 mm	Wasser- gehalt
	kN	mm	kg/m ³	Vol.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
REF	14.3	3.3	2412	3.5	4.50	6.8	24.6	33.9	66.3	-
PACK	10.8	3.3	2404	3.8	4.89	8.3	27.9	37.9	72.8	-
ZEO	10.7	3.6	2412	3.3	4.83	9.3	29.8	39.8	75.4	0.09
WATER	9.8	3.4	2400	4.5	4.86	11.6	30.0	40.2	75.3	0.13
WATER + RAP	10.0	3.7	2394	4.5	4.65	8.2	26.9	36.5	67.7	0.14
Sollwerte	> 10	< 3.5		4.0	4.60	8.0	26.0	37.0	69.0	

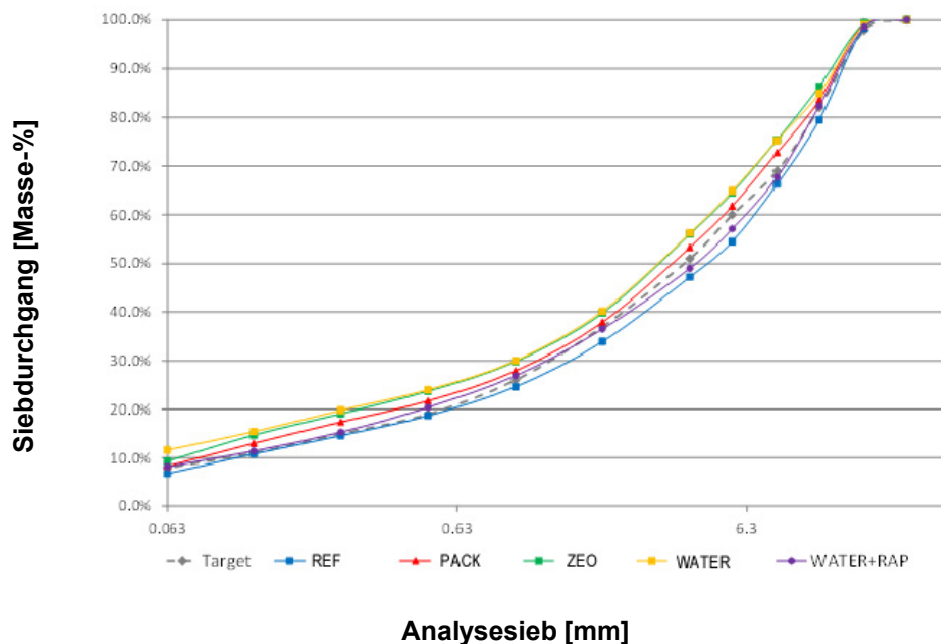


Abb. 18 Siebsummenkurven der 5 Testfelder

Die verschiedenen Mischungen sind bezüglich deren Zusammensetzung (siehe Tab. 4) grundsätzlich vergleichbar. Es ist allerdings zu bemerken, dass der Füllergehalt der Mischungen ZEO und WATER im Vergleich zu den übrigen Mischungen auffällig hoch ist.

Es ist bekannt, dass bei NT-Asphalten, bei denen Wasser zur Temperaturreduktion beigemischt wurde, ein zu hoher Wassergehalt sehr rasch zu einem massiven Abbau der mechanischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit führen kann. Aus diesem Grunde erfolgte die Bestimmung des Wassergehalt bei den Mischungen, welche mit der Schaumbitumen-Technologie aufbereitet wurden sowie bei der Mischung mit Zeolith. Aufgrund der Erfahrungen aus [3] kann der festgestellte Wassergehalt zwischen 0.09 und 0.14 Masse-% als vernachlässigbar betrachtet werden.

Tab. 5 Eigenschaften des aus dem Mischgut rückgewonnenen Bindemittels

	Bindemittleigenschaften			
	Penetration 1/100 mm	Erweichungspunkt RuK °C	Penetrationsindex PI	Fraass Brechpunkt °C
REF	35	56.4	-0.5	-7
PACK	41	53.3	-0.8	-9
ZEO	44	52.7	-0.8	-10
WATER	43	52.2	-1.0	-10
WATER + RAP	40	55.6	-0.4	-12

Die Alterung des Bindemittels aus dem Heissmischgutes ist merklich grösser als die Alterung aller Warm-Mischgutsorten.

Die rückgewonnenen Bindemittel der Mischungen ZEO und WATER haben eine geringere Alterung des Bindemittels infolge Aufbereitung und Einbau als das Referenzmischgut REF (Penetrationswerte etwas höher und ein geringerer

Erweichungspunkt RuK). Aufgrund der niedrigeren Temperatur bei der Aufbereitung und dem Einbau war dies bei diesen Mischungen zu erwarten

Die negativen Werte für den Penetrationsindex weisen darauf hin, dass die Bindemittel wenig temperaturempfindlich sind.

Beim Mischgut mit Asphaltgranulat WATER + RAP kann der Einfluss des harten (gealterten) Bindemittels aus dem Recyclingmaterial beobachtet werden. Das resultierende, rückgewonnene Bindemittel ist härter als beispielsweise das Bindemittel des vergleichbaren Mischgutes WATER. Bei der Rezeptierung von NT-Mischgut sind sowohl die Zugabe des Asphaltgranulates als auch die Aufbereitungstemperatur zu berücksichtigen.

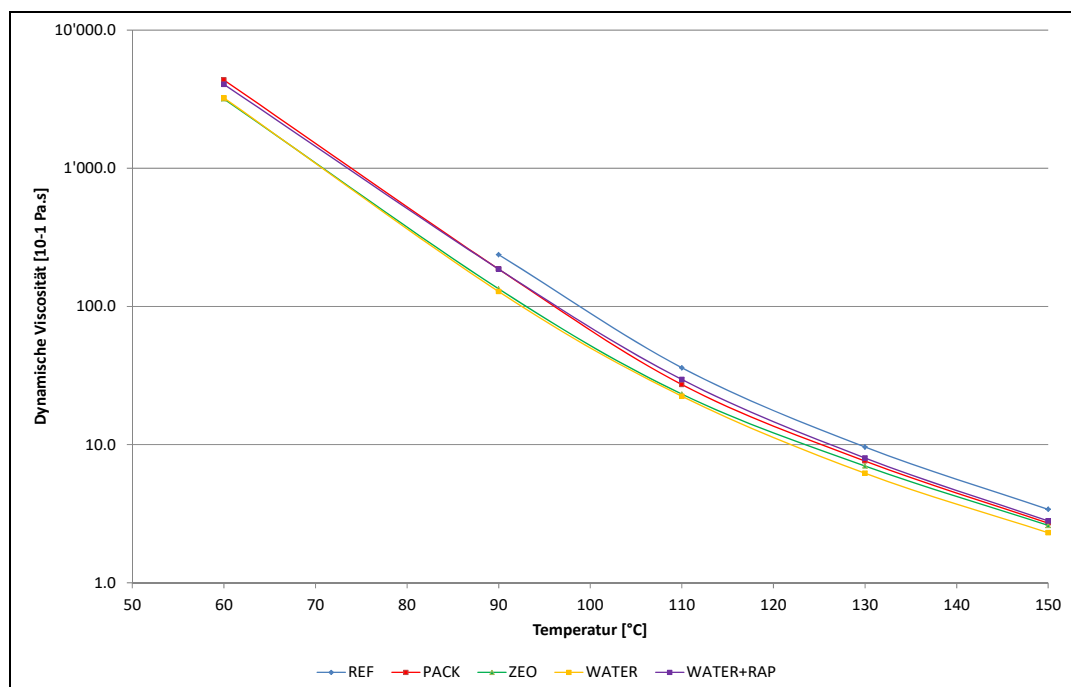
Die Untersuchung des Kälteverhaltens (Breachpunkt Fraass) zeigt auf, dass die NT-Asphalte generell tiefere Werte als das Referenzmischgut aufweisen. Aufgrund der niedrigeren Aufbereitungstemperatur konnte dies erwartet werden.

Tab. 6 Bestimmung der dynamischen Viskosität am rückgewonnen Bindemittel mit einem Rotationsviskosimeter (Konus und Platte)

	dynamische Viskosität [10^{-1} Pas]				
	60 °C	90 °C	110 °C	130 °C	150 °C
REF	-	237	36.0	9.6	3.4
PACK	4352	186	27.2	7.6	2.7
ZEO	3174	134	23.2	7.0	2.6
WATER	3226	128	22.4	6.2	2.3
WATER + RAP	4045	186	29.6	8.0	2.8

Am rückgewonnenen Bindemittel wurde auch die dynamische Viskosität mit einem Rotationsviskosimeter Typ Konus/Platte bei verschiedenen Temperaturen zwischen 90 und 150 °C gemessen; die Ergebnisse sind sowohl in der Tab. 6 als auch in der Abb.19 zusammengefasst.

Das Bindemittel des Referenzmischgutes REF weist generell eine höhere Viskosität auf als die übrigen Bindemittel. Die Bindemittel der Mischgutsorten PACK und WATER+RAP haben ähnliche Viskositäten, während die Mischgutsorten ZEO und WATER die niedrigsten Viskositäten aufweisen. Diese beiden Mischgutsorten sind aufgrund der tieferen Viskosität besser verarbeitbar. Diese Ergebnisse weisen auf das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Warmasphalte hin. Weitergehende Untersuchungen zum Verhalten des bituminösen Mörtels sowie des Mischgutes wurden im Einzelprojekt EP 3 durchgeführt.

**Abb.19** Bestimmung der dynamischen Viskosität am rückgewonnen Bindemittel mit einem Rotationsviskosimeter (Konus und Platte)

3.3.4 Bohrkern-Untersuchungen

Zur Beurteilung der Eigenschaften der eingebauten Binderschicht AC 16 B S mit unterschiedlichem Mischgut auf den 5 Testfeldern, wurden pro Feld 4 Bohrkern (Ø 150 mm) entnommen und untersucht; die Ergebnisse sind in der *Tab. 7* aufgeführt.

Tab. 7 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen (Mittelwerte aus 4 Einzelwerte; der Schichtenverbund wurde 5 Monate nach dem Einbau bestimmt)

	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+ RAP
Schichtdicke [mm]	62	66	71	70	75
Hohlraumgehalt [Vol.-%]	5.9	5.1	4.3	5.9	4.5
Verdichtungsgrad [%]	97.5	98.6	99.3	98.5	100
Schichtenverbund [kN]	7.1	6.8	4.3	6.9	13.3

Die Sollsichtdicke betrug 65 mm. Ausgehend von einer tolerierbaren Abweichung der Mittelwerte von ± 5 % ergibt sich ein Sollwertbereich von 62 ... 68 mm. Die Testfelder REF und PACK wurden in konformer Schichtdicke eingebaut; die Felder ZEO, WATER und WATER + RAP wurden zu dick eingebaut.

Der Verdichtungsgrad des Feldes REF liegt mit 97.5 % unterhalb des minimal erforderlichen Wertes von 98 %. Die Felder PACK, ZEO, WATER und WATER + RAP erfüllen die Anforderung der Norm SN 640 430 [7].

Die Hohlraumgehalte aller 5 Felder erfüllen die normierten Anforderungen.

Beim Schichtenverbund fordert die Norm [7] zwischen einer Binder- und einer Tragschicht einen minimalen Wert von 12 kN. Erfahrungsgemäss können die Werte des Schichtenverbundes zu tief liegen, falls die Prüfung an Bohrkernen durchgeführt wird, welche unmittelbar nach dem Einbau entnommen wurden. Aus diesem Grunde sind in der *Tab. 7* die Werte nach 5 Monaten aufgeführt. Ausser dem Testfeld WATER + RAP erfüllt kein Testfeld die Anforderung. Bei NT-Mischgut ist dem Schichtenverbund grundsätzlich eine erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken, da die Verklebung der Schichten infolge der niedrigeren Einbautemperatur erschwert ist. Da jedoch auf den Teststrecken auch das Heissmischgut des Referenzfeldes REF die Anforderungen bei weitem nicht erfüllen, kann keine Aussage zur Problematik des Schichtenverbundes von NT-Mischgut gemacht werden. Das Thema wird in Kapitel 5.6 eingehend untersucht.

3.4 Monitoring

3.4.1 Zielsetzung und Konzept

Nach dem Einbau der Teststrecke und der Durchführung der Einbaukontrollen wurde ein mehrjähriges Monitoring der Tragfähigkeit des Oberbaus aufgebaut.

Zu diesem Zweck wurden zwei verschiedene Messungen periodisch durchgeführt:

- Während des Einbaus wurden Sensoren für die Messung der Verformung und der Temperatur verlegt (siehe Abb. 21), mit welchen punktuelle Messungen realisiert werden konnten
- Messungen der Tragfähigkeit mit dem Falling Weight Deflectometer FWD

Während die Tragfähigkeitsmessungen direkt auf dem fertig erstellten Oberbau durchgeführt werden, erfolgt die Messung der Verformung und der Temperatur mittels der eingebauten Sensoren. Die Verformungsmessung erfolgt in der Regel in der Zone, welche die grössten Spannungen aufzunehmen hat, d.h. in den unteren Schichten, wo die Ermüdungsbeanspruchung am grössten ist. Im vorliegenden Projekt stand jedoch nicht der Gesamtaufbau im Fokus, sondern die mit NT-Mischgut ausgeführte Binderschicht. Daher wurden die Sensoren unterhalb der 65 mm dicken Binderschicht aus AC B 16 verlegt.

Die Durchführung und Auswertung der oben aufgeführten Messungen erlaubt es, die Entwicklung des mechanischen Verhaltens des Oberbaus im Verlaufe der Zeit aufzuzeichnen und mögliche Unterschiede zwischen den verschiedenen, verwendeten NT-Mischgutsorten – insbesondere hinsichtlich der Steifigkeit und der theoretischen Nutzungsdauer - zu erkennen.

3.4.2 Instrumentalisierung und Messkampagne

Es wurden folgende drei Sensoren eingebaut :

- A: Verformungsmesser "ASG"
- K: Verformungsmesser "Kyowas"
- T: Temperaturfühler Pt100

Die prinzipielle Anordnung der Sensoren ist in der *Abb.20* dargestellt. Grundsätzlich wurden 5 Verformungsmesser Kyowas sowie zwei Temperaturfühler PT100 in jeder Teststrecke eingebaut. Die Verformungsmesser sind längs und quer versetzt angeordnet, um die Lage der Überrollung durch das Messfahrzeug (Belastungsspitze) präzise lokalisieren zu können. Die Verformungsmesser „ASG“ waren ursprünglich nicht vorgesehen und wurden zu Vergleichszwecken probeweise eingebaut. Deren Auswertung wird in diesem Bericht nicht weiter kommentiert werden.

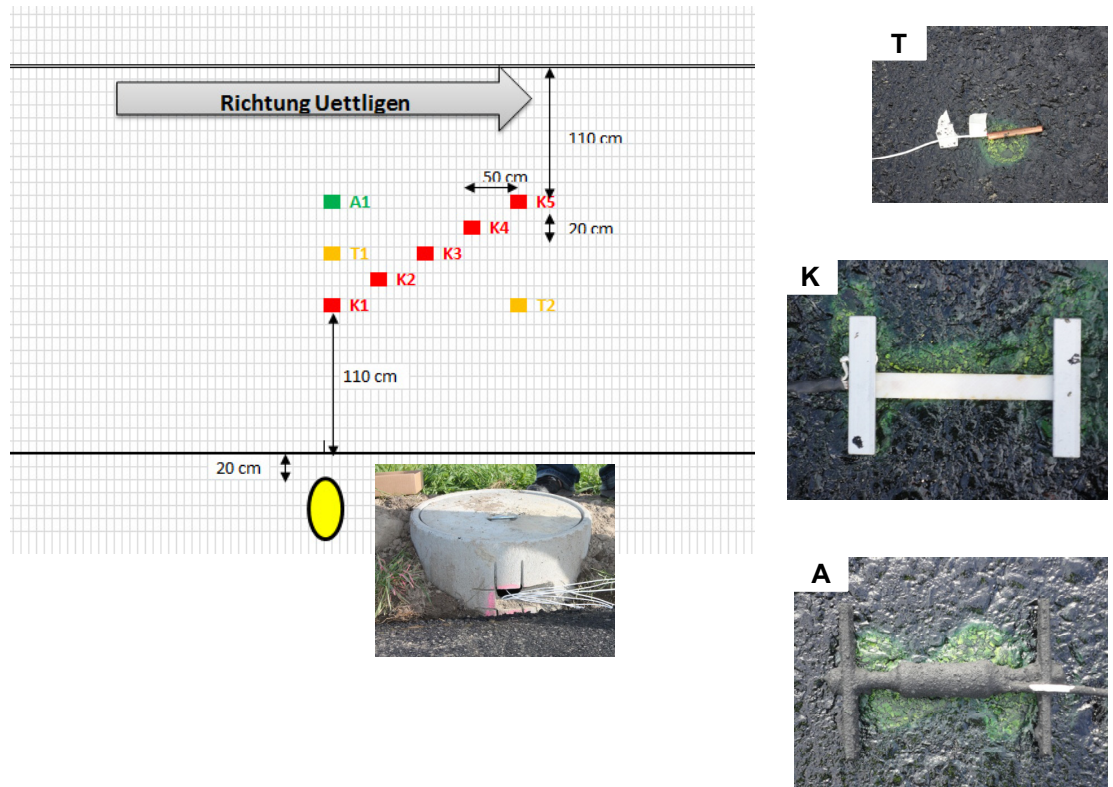


Abb.20 Generelle Anordnung der Messfühler der einzelnen Testfelder



Abb. 21 Verlegung der Messfühler auf der Tragschicht AC T 22S

Eine Zusammenfassung der Funktionstüchtigkeit der Sensoren ist in der Tab. 8 für verschiedene Zeiträume aufgeführt. 76 % der Fühler waren nach dem Einbau funktionstüchtig. Unter Berücksichtigung der relativ dünnen, eingebauten Schicht über den Fühlern (ca. 65 mm), der durchgeführten Vibrationsverdichtung sowie der starren Unterlage (AC T 22) kann dieses Ergebnis als zufriedenstellend bezeichnet werden. Es kann auch festgehalten werden, dass ohne äussere Einwirkung, wie Beschädigungen des Belages, die Sensoren langfristig genutzt werden können.

Tab. 8 Zusammenfassung der Funktionstüchtigkeit der Verformungsmesser Kyowas

	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+ RAP	TOTAL
Nach dem Einbau	3/5	5/5	4/5	2/5	5/5	19/25 (76%)
Nach 5.5 Wochen	3/5	5/5	4/5	2/5	4/5	18/25 (72%)
Nach 5 Monaten	2/5	5/5	4/5	2/5	4/5	17/25 (68%)

Es wurden zwei Messkampagnen durchgeführt:

- 5 Monate nach Einbau (01.03.2013), $T_{NTA}=1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 9 Monate nach Einbau (04.07.2013), $T_{NTA}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$

Zur Beanspruchung der Sensoren wurden Überfahrten mit einem definierten Lastwagen wie folgt durchgeführt:

- 2-Achs-Lastwagen (Gesamtgewicht 20 Tonnen); der LW wurde vor den Messungen gewogen
- Messungen auf 4 Testfelder (das Testfeld WATER+RAP war nicht zugänglich)
- 3 Geschwindigkeiten der Überrollungen: 20, 40 und 60 km/h.
- Pro Lastfall wurde anfänglich drei Messungen durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Messungen zu überprüfen



Abb. 22 Aufgebautes Messsystem während den Überrollungen



Abb. 23 Verwendeter Lastwagen zur Gewährleistung gleichbleibender Überrollungen

3.4.3 Ergebnisse

Die Abb. 24 stellt beispielhaft die Messung der Verformung unter einer Überrollung dar, wobei negative Werte einer Zugspannung an der Unterseite der bituminösen Schicht entsprechen. Die erste Zugspannungs-Spitze entspricht der Vorderachse des Lastwagens, die zweite Spitze der hinteren Achse. In der weiteren Auswertung wird lediglich die maximale Zugspannung, dh diejenige der hinteren Achse berücksichtigt. Weitergehende Angaben zur Auswertung und Analyse der Verformungssignale sind in [5] zu finden.

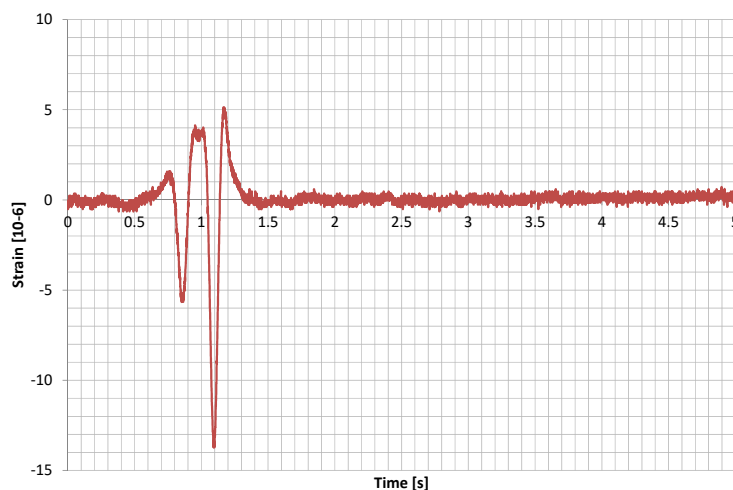


Abb. 24 Typisches Signal der Verformungsmessungen (Messung vom 04.07.2013, REF, 60 km/h, Sensor K4, negative Werte entsprechen einer Zugspannung)

Vor der Auswertung der Messdaten wurden die einzelnen Sensoren auf deren Funktionstüchtigkeit hin überprüft, um allfällige Fehler und Ungereimtheiten zu erkennen. In der Folge wurden nur die Werte derjenigen Sensoren ausgewertet, welche einwandfrei funktionierten.

Wiederholbarkeit der Messungen

Die Wiederholbarkeit der einzelnen Messungen wurde in einem ersten Schritt überprüft, um die Zuverlässigkeit des Messsystems zu hinterfragen, sowie um sicher zu stellen, dass keine Sensoren durch den Einbau des Mischgutes beschädigt worden waren. Grosse Unterschiede in den Werten aufeinanderfolgender Messungen würden auf defekte Systeme hinweisen.

In den Abb. 25 und Abb. 26 sind einige Auswertungen zur Untersuchung der Wiederholbarkeit der Messungen zweier Sensoren in unterschiedlichen Testfeldern aufgeführt. Generell kann festgestellt werden, dass die Wiederholbarkeit der Messungen sehr zufriedenstellend ist und dass die Sensoren stabil funktionieren. Auf der Basis der durchgeführten Messungen kann die Wiederholbarkeit zu ca. 1...1.5 [10^{-6}] geschätzt werden.

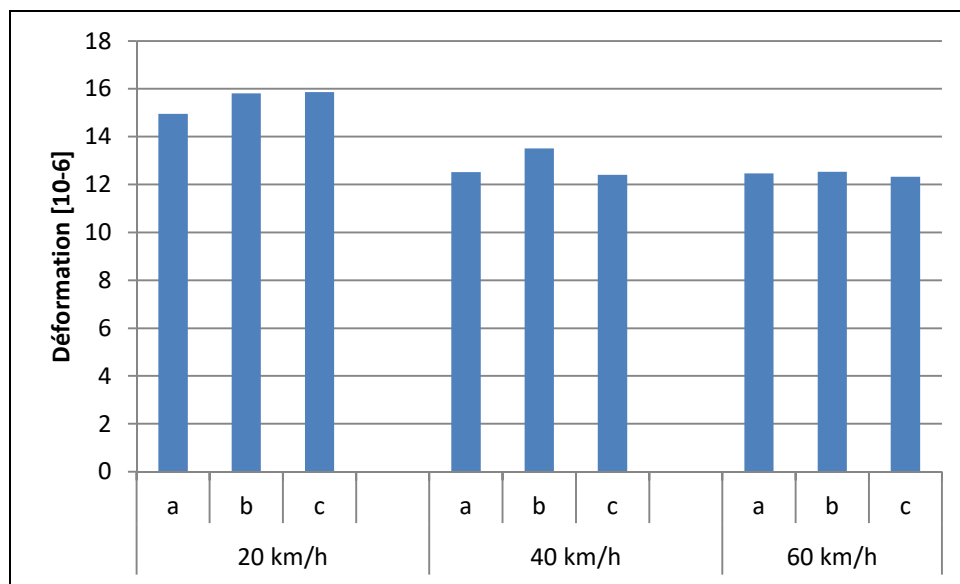


Abb. 25 Beispiel einer Untersuchung der Vergleichbarkeit (01.03.13, PACK, Sensor K8)

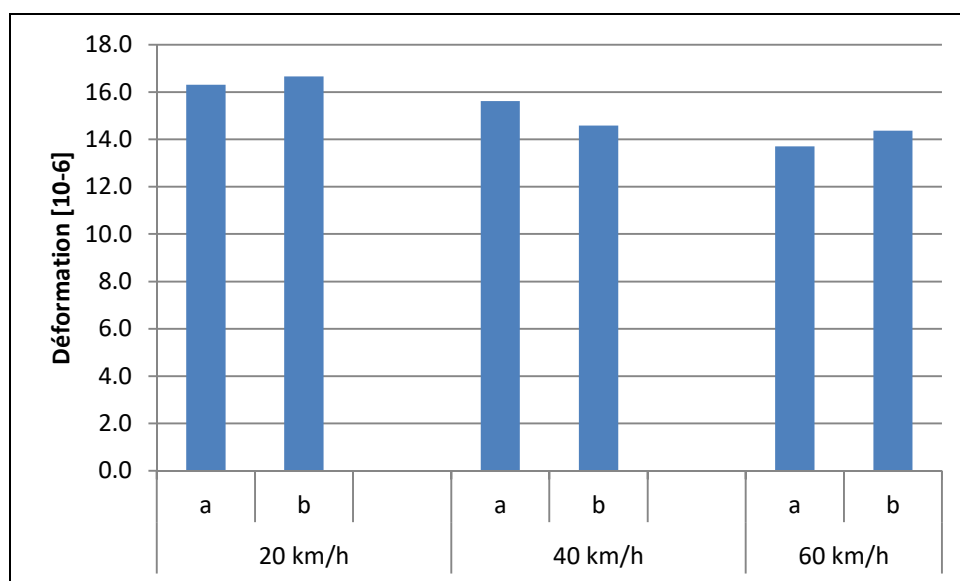


Abb. 26 Beispiel einer Untersuchung der Vergleichbarkeit (04.07.13, REF, Sensor K4)

Einfluss der Fahrgeschwindigkeit und der Temperatur

Der Einfluss der Geschwindigkeit und der Temperatur ist in den untenstehenden Abbildungen dargestellt, in welchen für jedes Testfeld der Mittelwert der Verformungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Temperaturen aufgeführt ist. Es kann generell festgehalten werden, dass die Messergebnisse plausibel sind, denn die Verformungen nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit (Frequenz) der Belastung ab. Auch nehmen die Verformungen mit steigender Temperatur zu.

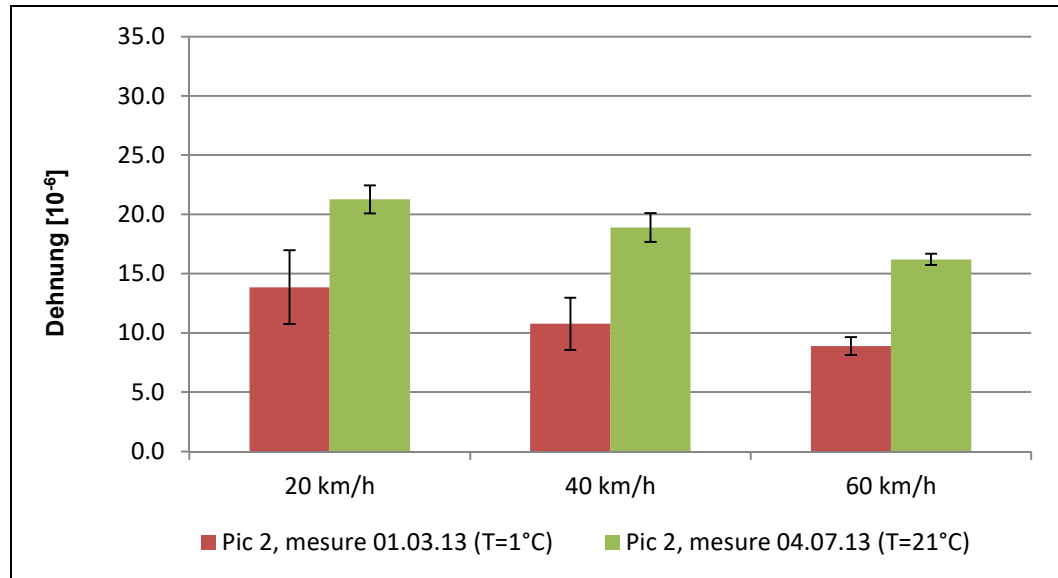


Abb. 27 Mittlere Verformung Testfeld REF

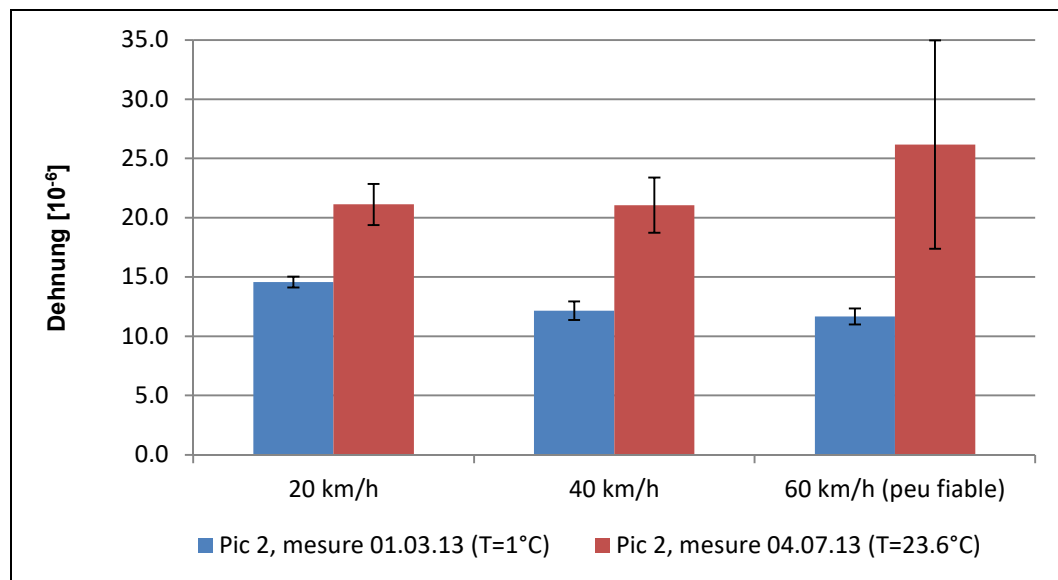


Abb. 28 Mittlere Verformung Testfeld PACK

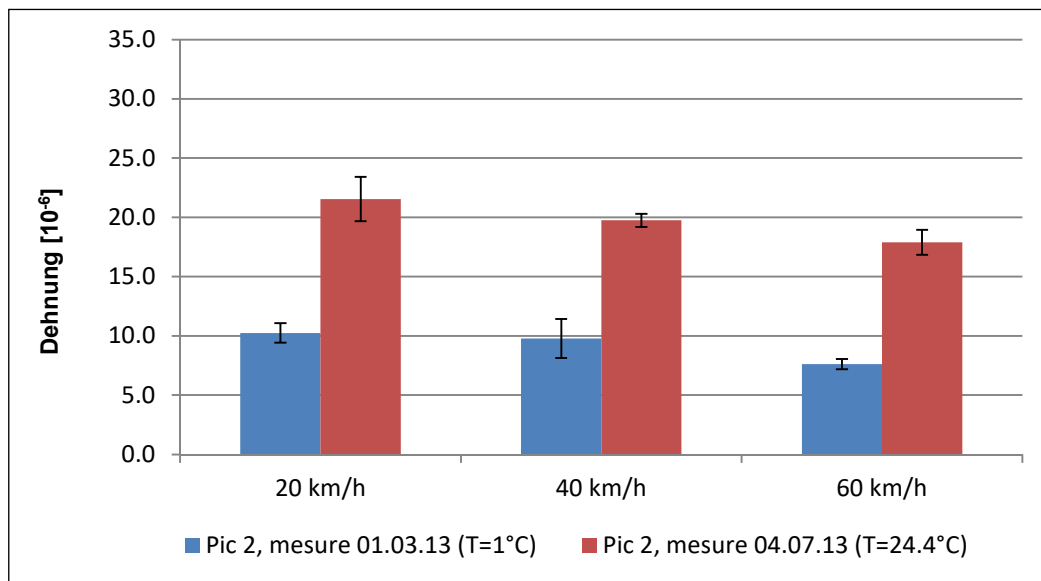


Abb. 29 Mittlere Verformung Testfeld ZEO

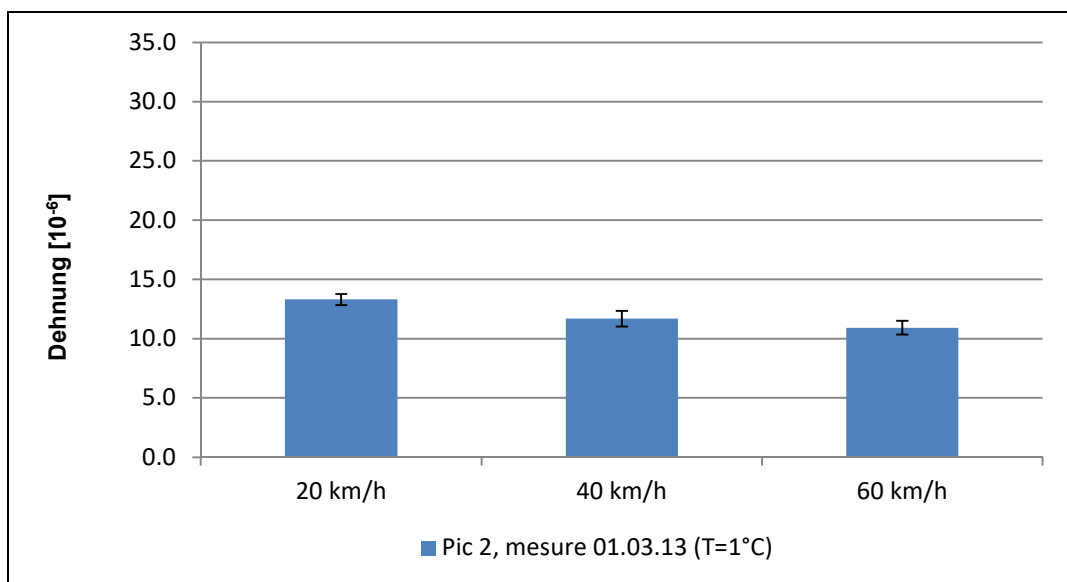


Abb. 30 Mittlere Verformung Testfeld WATER

Vergleich der Testfelder

Das Ziel der Messungen bestand darin festzustellen, ob sich bei den verschiedenen Testfeldern Unterschiede im mechanischen Verhalten zeigen würden. In den untenstehenden Abbildungen werden die Ergebnisse der Verformungsmessungen (bei 40 km/h) der einzelnen Messkampagnen miteinander verglichen, wobei die Mittelwerte (dunkelblau) und die Einzelwerte (hellblau) einzeln dargestellt sind:

- Die Ergebnisse der Messung welche im Monat März durchgeführt wurden sind deutlich kleiner als diejenigen aus dem Juli. Dies ist auf die tieferen Belagtemperaturen im Frühjahr zurückzuführen.
- Aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit den eingesetzten Sensoren, sind die gemessenen Werte als relativ klein einzustufen. Die Messergebnisse weisen nicht auf eventuelle Schäden des Oberbaus hin, was aufgrund der kurzen Dauer der Beanspruchung der Teststrecke von 6 Monaten zu erwarten war.
- Bei der Messung nach 5 Monaten (01.03.2013) scheint das Testfeld ZEO etwas kleinere Verformungen aufzuweisen. Allerdings sind die Unterschiede zu klein, um als signifikant bezeichnet zu werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse des Testfeldes REF massiv durch das Ergebnis des Sensors K2 beeinflusst wird, welcher deutlich höhere Werte als die beiden übrigen Sensoren lieferte.
- Die Messungen nach 9 Monaten (04.07.2013) weisen ebenfalls nicht auf signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Testfeldern hin.
- Vorausgesetzt die Sensoren bleiben funktionstüchtig, sind weitere Messkampagnen zu einem späteren Zeitpunkt sehr zu empfehlen, um allfällige Unterschiede im mechanischen Verhalten der Testfelder aufzuzeigen.

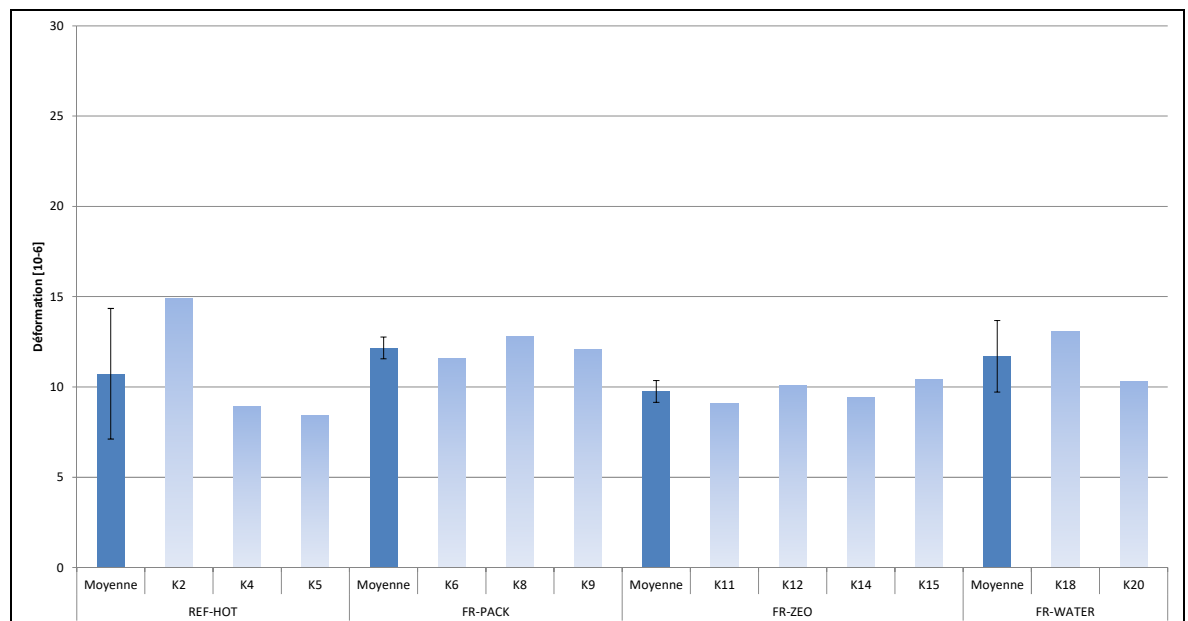


Abb. 31 Messungen vom 01.03.2013, Überrollgeschwindigkeit 40 km/h (positive Werte stehen für Zugspannungen)

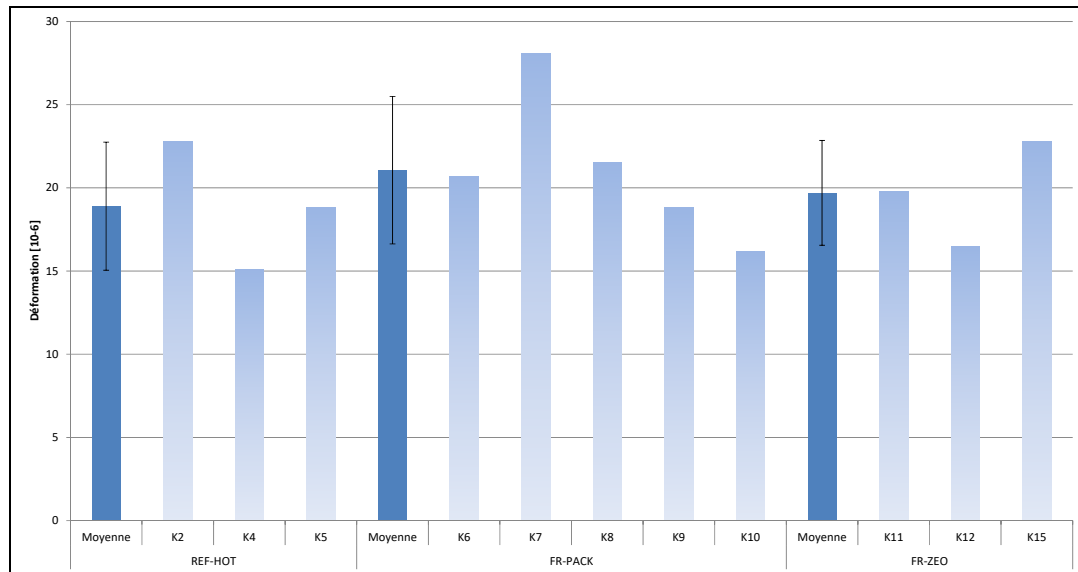


Abb. 32 Messungen vom 04.07.2013, Überrollgeschwindigkeit 40 km/h (positive Werte stehen für Zugspannungen)

3.5 Deflektionsmessungen

Deflektionsmessungen wurden 9 Monate nach dem Einbau der Teststrecke am 04.07.2013 durchgeführt, um einerseits die unterschiedlichen Mischgutsorten der Binderschichten in den Testfeldern zu vergleichen und andererseits um eine allfällige beginnende Schädigung des Oberbaus festzustellen. In jedem Testfeld wurden 14 Messpunkte gewählt; beim Referenzfeld REF waren es 18 Messpunkte.

Die Messungen wurden mittels Falling Weight Deflectometer FWD durchgeführt, dessen Messprinzip in der Abb. 33 dargestellt ist; das Messsystem ist in der Abb. 34 fotografisch festgehalten. Dabei wird eine Masse aus einer definierten Höhe auf den Strassenoberbau fallen gelassen und mit 9 Geophonen die entstehende Setzungsmulde präzise in einem Abstand von bis zu 1800 mm vom Belastungspunkt gemessen. Diese Belastung entspricht der Überrollung eines Lastwagenrades.

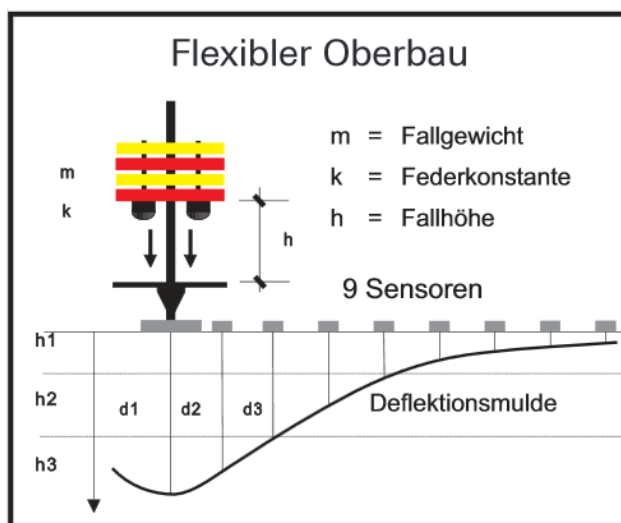


Abb. 33 Messprinzip des FWD



Abb. 34 Zugfahrzeug und FWD-Messanhänger zur Durchführung der Tragfähigkeitsmessungen

Die einzelnen Setzungsmulden der Testfelder sind in der Abb. 35 dargestellt und werden wie folgt kommentiert:

- Grundsätzlich können die Messwerte der Geophone, welche sich in der Nähe des Fallgewichtes befinden den bituminösen Schichten zugeordnet werden; die Werte der Geophone in grösserem Abstand zum Fallgewicht werden von den Eigenschaften der Foundationsschicht beeinflusst.
- Die mittlere Setzungsmulde der Testfelder REF und PACK ist vergleichbar. Die kleineren Deformationen dieser zwei Felder weisen - im Vergleich zu den anderen Feldern - auf eine höhere Steifigkeit des Oberbaus hin.
- Beim Testfeld WATER+RAP konnte die grösste Setzungsmulde festgestellt werden; dieser Oberbau weist offenbar die kleinste Steifigkeit aller Testfelder auf.

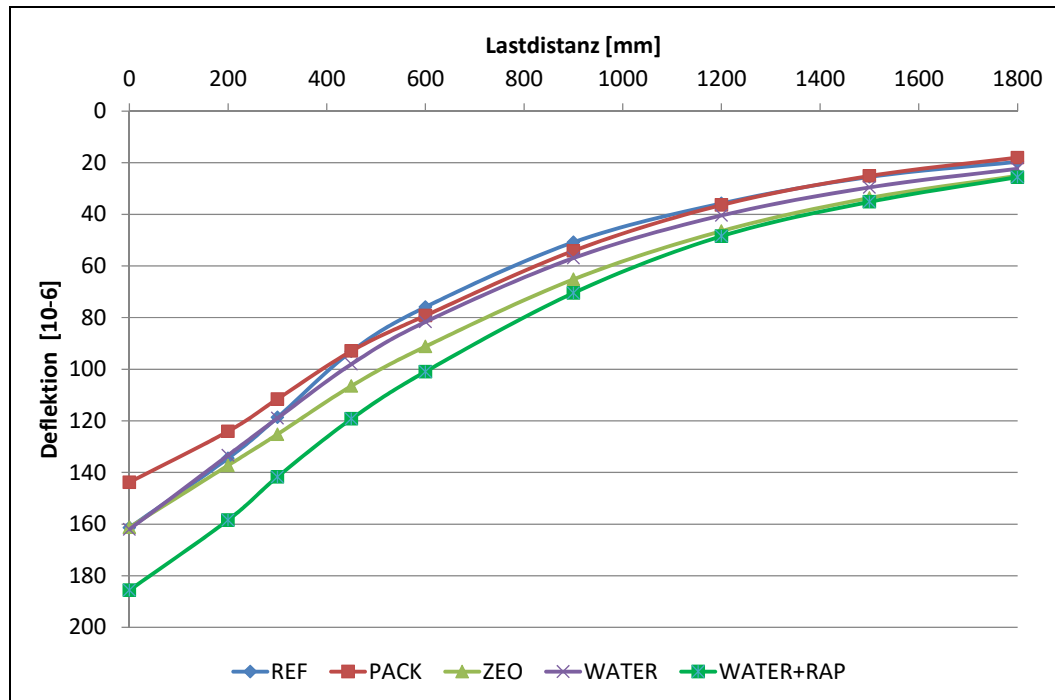


Abb. 35 Mittlere Setzungsmulde der Deflektionsmessungen der verschiedenen Testfelder

Die Auswertung der Deflektionsmessungen erfolgte mittels Backcalculation (Rückrechnung). Dabei wird die gemessene Deflektionsmulde in einem zweischichtigen Modell berechnet, wobei die Steifigkeit der bituminösen Schichten und der Fundationsschicht solange variiert werden, bis die berechnete Setzungsmulde der gemessenen Mulde möglichst gut entspricht. Es stehen diverse Software-Lösungen zur Durchführung der Backcalculation zur Verfügung. Die wesentlichen Annahmen zur Berechnung sind folgende:

- Rückrechnung mit der Methode MET (method of equivalent thickness), welche auf der Theorie von Odemark-Boussinesq basiert.
- Zwei-Schichten-Modell in welchem E_1 [MPa] der Steifigkeit der bituminösen Schichten und E_2 [MPa] derjenigen der ungebundenen Fundationsschicht entspricht. Zudem wird angenommen, dass kein Schichtenverbund zwischen den bituminösen Schichten und der Fundationsschicht besteht.
- Der Poisson-Koeffizient wird für alle Schichten zu 0.35 angenommen.
- Die Temperatur in der Zwischenschicht Binder-Deckschicht betrug während den Messungen 25°C. Die berechneten Module wurden auf die Referenztemperatur von 15°C umgerechnet, indem die Formel von BELLS3 Anwendung fand.

Die berechneten Steifigkeiten der bituminösen Schichten aller Messpunkte sind in der Abb. 36 dargestellt. Es fällt auf, dass einige Messpunkte der Referenzstrecke REF relativ kleine Steifigkeiten aufweisen. Detaillierte Untersuchungen ergaben, dass sich diese Messpunkte in der Anfangszone des Testfeldes befinden und die tiefen Steifigkeitswerte somit vermutlich auf den Umstand zurückgeführt werden können, dass zu Beginn der Teststrecke der Einbau infolge der noch niedrigeren morgendlichen Temperaturen nicht optimal war. Tatsächlich kann aus der **Abb. 16** entnommen werden, dass im ersten Messprofil, in welchem die Zunahme des Verdichtungsgrades in Funktion der Anzahl Walzenübergänge aufgezeichnet wurde, ein geringerer Verdichtungsgrad erreicht wurde als beim zweiten (späteren) Messprofil. Aus diesen Gründen wurden die betreffenden Steifigkeiten als „nicht repräsentativ“ betrachtet und in der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt.

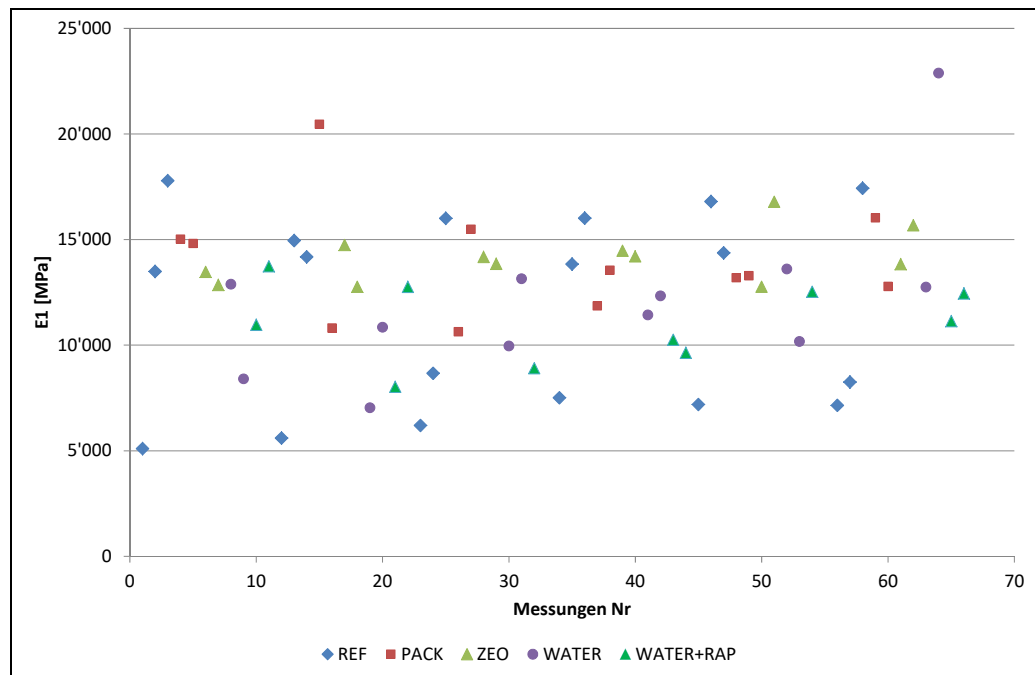


Abb. 36 Steifigkeitswerte der bituminösen Schichten (E_1) in den Messpunkten der Deflektion

Die Ergebnisse der Berechnung der E-Module sind in der Tab. 9 zusammengefasst und werden wie folgt kommentiert:

- Grundsätzlich liegt der E-Modul der bituminösen Schichten aller Testfelder in der gleichen Grössenordnung. Bei den Testfeldern REF, PACK und ZEO liegen die Module etwas höher, während beim Testfeld mit Asphaltgranulat (WATER+RAP) der E-Modul vergleichsweise klein ist. Dieses Ergebnis stimmt mit der Form der Setzungsmulde überein. Unter Berücksichtigung der Streuung der Ergebnisse (Standardabweichung und Variationskoeffizient) sind diese Unterschiede allerdings mit Vorsicht zu betrachten.
- Die berechneten E-Moduli der einzelnen Testfelder liegen etwas oberhalb der Erfahrungswerte, welche üblicherweise bei der analytischen Dimensionierung verwendet werden (ca. 9'300 MPa bei 15 °C). Die höheren Werte waren zu erwarten, denn einerseits ist der Oberbau mit einer Gesamtschichtdicke von 320 mm relativ stark konzipiert und andererseits erfolgten die Messungen auf dem noch jungen (9 Monate alten), unbeschädigten Oberbau.
- Wie bereits erwähnt, beträgt die Gesamtschichtdicke 320 mm, wobei die untersuchte Binderschicht aus unterschiedlichen Warmasphalten 65 mm dick ist. Somit ist der Einfluss dieser Schicht (ca. 20 % der totalen Schichtdicke) auf den E-Modul des gesamten Paketes der bituminösen Schichten beschränkt.
- Die Variationskoeffizienten liegen erfahrungsgemäss im zu erwartenden Bereich. Bei einer Rückrechnung können die Varianzkoeffizienten bis zu 30 % betragen.
- Die Auswertung der E-Module der bituminösen Schichten weist bei keinem der Testfelder auf frühzeitige Schäden im Oberbau hin, was aufgrund kurzen Dauer zwischen Einbau und Messung zu erwarten war.
- Die Module E_2 (Fundationsschicht und Untergrund) sind plausibel und liegen im Rahmen der Erfahrungswerte. Deren Streuung der Ergebnisse ist kleiner als bei den Modulen E_1 für die bituminösen Schichten.

Tab. 9 Zusammenfassung der Rückrechnung (Backcalculation)

	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+RAP
E1 (15 °C)					
Mittelwert [MPa]	14'309	13'992	14'131	12'118	11'043
Standard Abweichung [MPa]	3'070	2'675	1'203	3'937	1'846
Varianzkoeffizient [%]	21	19	9	32	17
E2					
Mittelwert [MPa]	180	190	144	175	136
Standard Abweichung [MPa]	27	56	12	41	21
Varianzkoeffizient [%]	15	29	9	24	15

4 Verarbeitbarkeit

Im Rahmen des Einzelprojektes EP3 wurde eine eingehende Untersuchung der Erwärmungsprozesse der Proben im Labor durchgeführt, um optimale Bedingungen für die Erwärmung der Proben unterschiedlicher Warmasphalte im Labor festzulegen. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung wiedergegeben; weitergehende Informationen und Details sind im Bericht des EP3 enthalten.

In der Folge werden die Ergebnisse der Verdichtbarkeit bei unterschiedlichen Temperaturen dargelegt, welche mit den untenstehenden Verdichtungsverfahren durchgeführt wurden:

- Gyrator-Verdichtung
- Marshallverdichtung

Die Ergebnisse sind in der Tab. 10 sowie in der Abb. 37 und Abb. 38 zusammengefasst. Es fällt auf, dass für das Warmmischgut mit einem chemischen Additiv PACK nur eine einzige Temperatur gewählt wurde. Dies erfolgte auf der Basis der Ergebnisse einer eingehenden Untersuchung [3], bei welcher die optimale Verarbeitungstemperatur im Labor zu 120°C festgelegt wurde. Auch beim Referenzmischgut REF wurde nur eine Verarbeitungstemperatur in der Untersuchung gewählt (155°C). Die Hohlraumgehalte und Verdichtungsgrade des Mischgutes REF, welche bei der normierten Verdichtungstemperatur von 155°C erzielt wurden, galten als Referenzwerte für die Warmasphalte.

Bezüglich der Marshall-Verdichtung sind folgende Bemerkungen zu berücksichtigen:

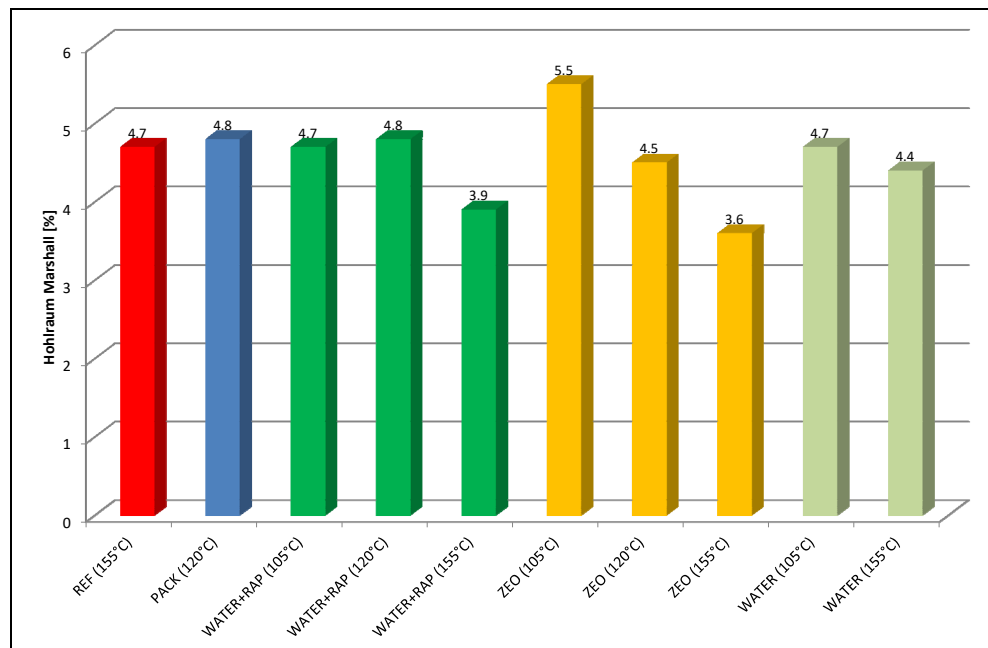
- Die Raumdichte wurde mittels Tauchwägung ermittelt.
- Die Verarbeitungstemperatur hat – insbesondere für die Mischgutsorten ohne Asphaltgranulat – einen entscheidenden Einfluss auf den Hohlraumgehalt.
- Die für die Heiss-Mischgutsorten üblicherweise verwendeten Verarbeitungstemperaturen können offensichtlich für die Warmasphalte nicht verwendet werden, denn bei diesen Verdichtungstemperaturen werden die Warmasphalte zu stark verdichtet, was in keiner Art und Weise den Bedingungen in der Praxis entspricht.

Bezüglich der Gyrator-Verdichtung sind folgende Bemerkungen zu berücksichtigen:

- Analog zur Marshallverdichtung zeigt auch die Verdichtung mit dem Gyrator den grossen Einfluss der Verdichtungstemperatur auf Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad.
- Um die Gyratorverdichtung mit den in situ erreichten Verdichtungswerten zu vergleichen, bzw um die Werte aus der Gyrator-Verdichtung als Referenzwerte zur Beurteilung der in situ-Verdichtung zu verwenden, wird in der Regel angenommen, dass 10 Umdrehungen pro cm (10mm) der eingebauten Schicht erforderlich sind (französische Erfahrungswerte). Somit sind für die in den Testfeldern eingebaute Binderschicht (Dicke 65 mm) die Verdichtungswerte nach 60 ... 70 Umdrehungen von Bedeutung.
- Der Hohlraumgehalt bei 60 Umdrehungen beträgt 4...5 Vol.-% (Ausmessverfahren) was als plausibel betrachtet wird. Dies bedeutet, dass die Zusammensetzung des Mischgutes hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit zufriedenstellend ist.
- Bei 60 Umdrehungen weisen die Warmasphalte generell höhere Verdichtungsgrade als das Referenzmischgut auf. Für die Verdichtung in situ dürfte dies grundsätzlich keine Probleme verursachen, allerdings ist auf einen genügenden minimalen Hohlraumgehalt zu achten.
- Der Wert nach einer Umdrehung C1 gilt generell als Indikator für die Verarbeitbarkeit des Mischgutes.

Tab. 10 Marshall-Verdichtung (2 x 50 Schläge 50/50) bei verschiedenen Temperaturen

	Hohlraumgehalt [Vol.-%]		Raumdichte [Mg/m³]	
	Gemessener Wert	Δ REF	Gemessener Wert	Δ REF
REF (155°C)	4.7	-	2.387	-
PACK (120 °C)	4.8	0.1	2.385	-0.002
WATER+RAP (105 °C)	4.7	0.0	2.388	0.001
WATER+RAP (120 °C)	4.8	0.1	2.384	-0.003
WATER+RAP (155 °C)	3.9	-0.8	2.407	0.020
ZEO (105°C)	5.5	0.8	2.366	-0.021
ZEO (120°C)	4.5	-0.2	2.393	0.006
ZEO (155°C)	3.6	-1.1	2.416	0.029
WATER (105°C)	4.7	0.0	2.388	0.001
WATER (155°C)	4.4	-0.3	2.396	0.009

**Abb. 37** Marshall-Hohlraumgehalt der verschiedenen Warmasphalte in Abhängigkeit zur Verdichtungstemperatur

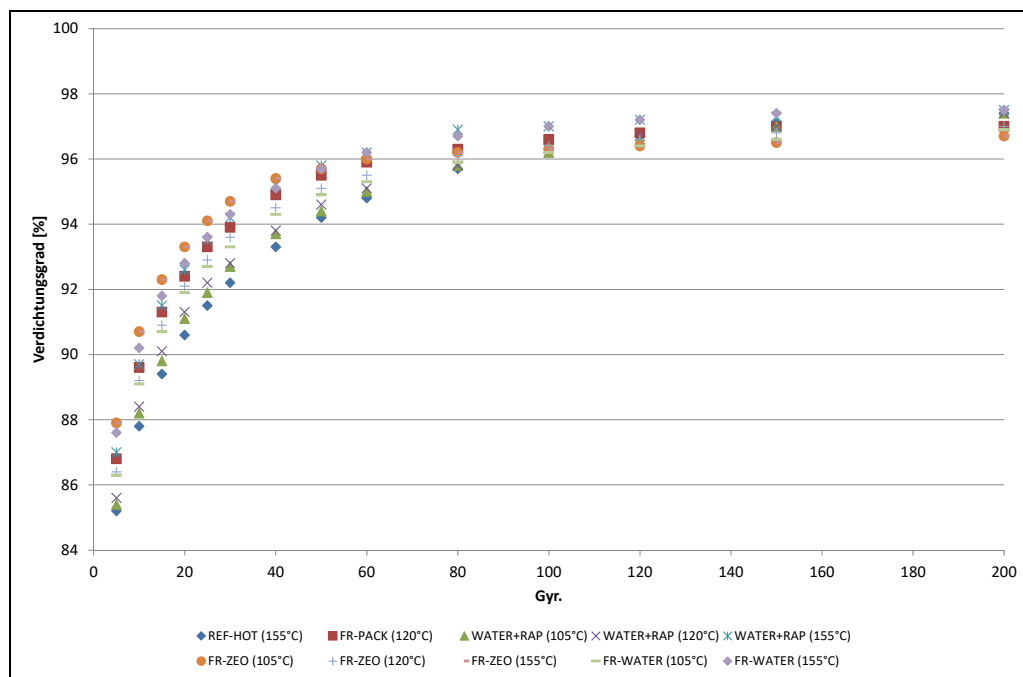


Abb. 38 Gyrator-Verdichtung der verschiedenen Warmasphalte in Abhängigkeit zur Verdichtungstemperatur

Tab. 11 Gyrator-Verdichtung bei verschiedenen Verdichtungstemperaturen

	C1 [%]	C60 [%]	C200 [%]	Steigung Regression.	C60 _{ΔREF} [%]
REF (155°C)	80.2	94.8	97.4	3.45	-
PACK (120 °C)	83.7	95.9	97.0	2.79	1.1
WATER+RAP (105 °C)	80.9	95.0	97.4	3.32	0.2
WATER+RAP (120 °C)	81.3	95.1	97.4	3.24	0.3
WATER+RAP (155 °C)	83.6	96.2	97.5	2.89	1.4
ZEO (105°C)	81.9	95.0	96.6	3.02	0.2
ZEO (120°C)	83.1	95.5	97.0	2.87	0.7
ZEO (155°C)	86.0	96.0	96.7	2.27	1.2
WATER (105°C)	82.9	95.3	96.9	2.87	0.5
WATER (155°C)	84.4	96.2	97.5	2.72	1.4

Vergleich man die markierten Werte für 60 Umdrehungen, so stellt man fest, dass die für das Projekt gewählte Verdichtungs-temperatur der NT-Mischungen gut gewählt war, denn alle Werte liegen recht nahe beieinander (94.8 ... 95.9). Dies bedeutet, dass alle Mischgutsorten bei der objektspezifischen Anzahl Umdrehungen von 60 etwa den gleichen Verdichtungsgrad erreichen.

Betrachtet man hingegen die Steigung der Kurven, so fällt auf dass REF und WATER+RAP deutlich oberhalb von 3 liegen, während die übrigen Mischungen deutlich unterhalb 3 liegen. Hiermit wird nochmals aufgezeigt, dass die Verwendung von Asphaltgranulat die Wirkung des Schaumbitumens reduziert. Bereits bei der Verdichtungskontrolle wurde dies beobachtet (siehe Abb. 17)

5 Mechanische Eigenschaften

5.1 Wasserempfindlichkeit

Die ITSR-Werte zur Beurteilung der Wasserempfindlichkeit sind in der Abb. 39 dargestellt. Der Wert ITSR ist die Verhältniszahl der indirekten Zugfestigkeit ITS zweier Prüfkörperserien, welche nass bzw trocken gelagert wurden. Die Ergebnisse werden wie folgt kommentiert:

- Es können markante Unterschiede zwischen den verschiedenen untersuchten Mischgutsorten festgestellt werden. Das Referenz-Heissmischgut REF scheint am wenigsten wasserempfindlich zu sein; PACK, ZEO und WATER+RAP liegen auf vergleichbarem Niveau, während das geschäumte Mischgut WATER offenbar eine grössere Wasserempfindlichkeit aufweist.
- Die Schweizer Norm stellt an die Wasserempfindlichkeit eine erfahrungsgemäss einfach zu erreichende Anforderung von > 70%. Ausser dem Mischgut WATER erfüllen alle übrigen Mischgüter diese Anforderung.
- Ausser dem Verhältnis der beiden Spaltzugfestigkeiten nach/vor Wasserlagerung (ITSR) ist es auch interessant die Grössenordnungen der Spaltzugfestigkeiten miteinander zu vergleichen. Das Referenz-Heissmischgut REF hat die grössten Spaltzugfestigkeiten, gefolgt von PACK und ZEO. Die beiden geschäumten Mischgüter WATER und WATER+RAP weisen Zugfestigkeiten auf, welche wesentlich kleiner sind als bei den übrigen Mischgutsorten.

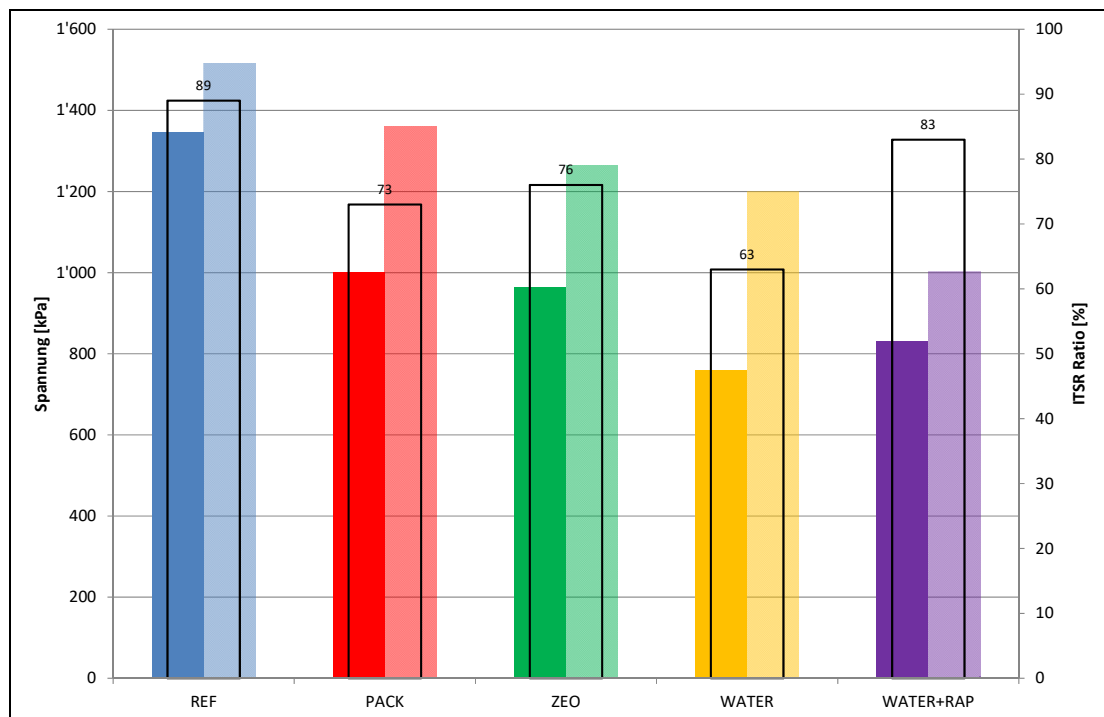


Abb. 39 Wasserempfindlichkeit ITSR (schwarzer Rahmen) sowie Spaltzugfestigkeiten trocken (helle Farben) und nass (dunkle Farben)

5.2 Verformungswiderstand

5.2.1 Spurrinntest

Die Ergebnisse des Spurbildungstestes bei 60°C gemäss [17] sind in der Abb. 40 grafisch dargestellt; es lassen sich untenstehende Folgerungen ziehen:

- Das Referenz-Heissmischgut weist im Vergleich zu den Warm-Asphalten einen deutlich günstigeren Verformungswiderstand auf. Die Mischgutsorten PACK, WATER und vor allem ZEO sind deutlich verformungsanfälliger als das Heissmischgut.
- Die Zugabe von Recycling-Asphalt, bei welchem das Bindemittel relativ hart ist, verbessert den Verformungswiderstand des Schaumbitumen-Mischgutes markant. Es scheint, dass die Kombination von Asphaltgranulat und Schaumbitumen eine vielversprechende Lösung darstellen könnte.
- Die in der Norm festgelegte Anforderung an die Ergebnisse des Spurrinntestes [7] liegt bei < 10 % bei 10'000 Zyklen. Einzig das Mischgut ZEO erfüllt diese Anforderung nicht; es ist allerdings zu bemerken, dass auch die Werte für die Mischgutsorten WATER und PACK als kritisch zu betrachten sind.
- Für alle untersuchten Mischgüter wurden die gleichen Gesteinskörnungen und das gleiche Rezept verwendet. Dass das Heissmischgut besser als die Warm-Mischgut-Sorten abschneidet, konnte aufgrund unterschiedlicher Kurzzeitalterung als Folge der tieferen Aufbereitungstemperatur erwartet werden. Dies unterstreicht, dass zur Herstellung von Warm-Mischgut die Rezepte spezifisch optimiert werden müssen; die Verwendung völlig identischer Heissmischgut-Rezepte zur Aufbereitung von Warm-Asphalt kann nicht empfohlen werden.

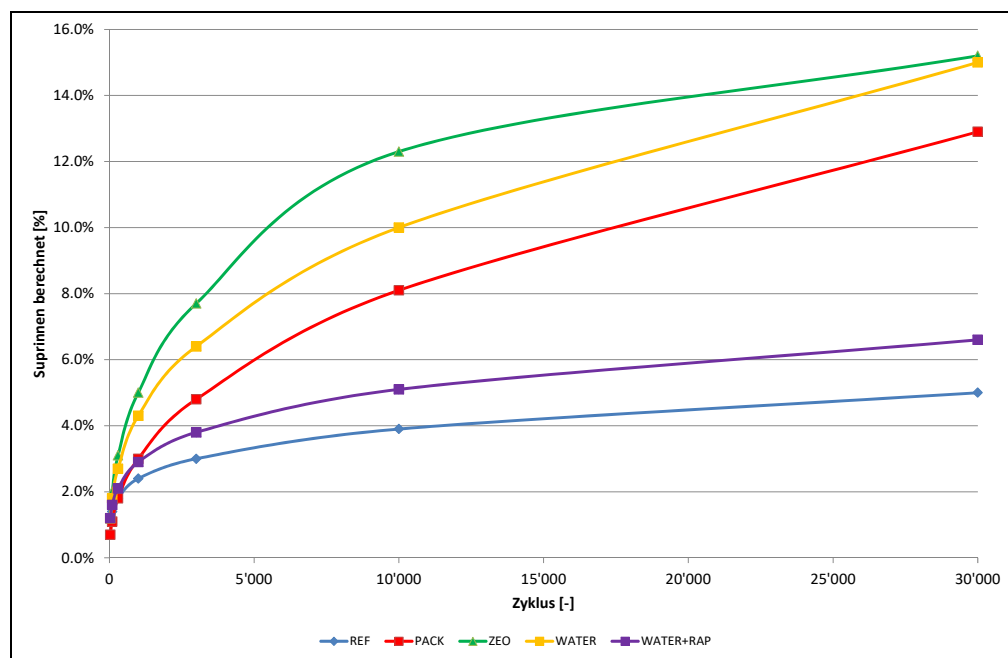


Abb. 40 Ergebnisse des Spurbildungstestes

5.2.2 Einaxialer Druck-Schwellversuch

Der einaxiale Druckschwell-Versuch wurde gemäss der deutschen Prüfvorschrift [14] durchgeführt, in welcher die Prüfbedingungen der EN 12697-25 [15] wie folgt präzisiert wurden:

Temperatur: 50 °C
 Oberspannung 0.35 N/mm²
 Unterspannung 0.025 N/mm²
 haversine förmige Belastung mit 0.2 Sek. Belastung und 1.5 Sek. Pause

Die dynamischen Prüfungen wurden an Marshall-Prüfkörpern durchgeführt. Da die Eigenschaften des Bitumens einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten unter zyklischer Belastung haben, wurden in der Abb. 41 auch die Werte für die Penetration rot eingefügt.

Als Ergebnis des einaxialen Druckschwellversuches wird die Dehnungsrate im Wendepunkt (auch als Steigung der Verformungskurve im Wendepunkt bekannt) angegeben. Je kleiner die Steigung desto grösser der Verformungswiderstand.

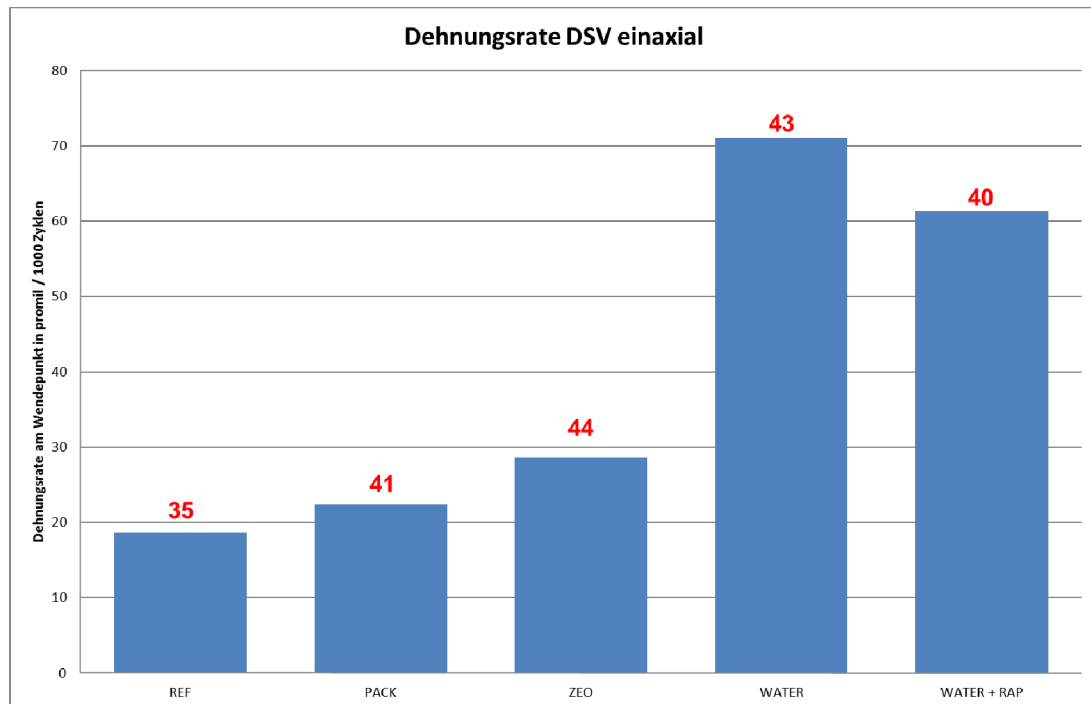


Abb. 41 Ergebnisse des einaxialen Druckschwellversuches bei 50°C mit rot eingetragenen Penetrationswerten

Aus der Abb. 41 geht deutlich hervor, dass

- die beiden Mischungen mit Schaumbitumen den kleinsten Verformungswiderstand aufweisen.
- das Heissmischgut den grössten Verformungswiderstand, aber auch den niedrigsten Penetrationswert (das härteste Bitumen) hat.
- die Mischgutsorten mit dem chemischen Zusatz (PACK) und dem Zeolithe (ZEO) einen Verformungswiderstand aufweisen, welcher nahe bei demjenigen des Heissmischgutes liegt.
- gestützt auf die langjährigen Erfahrungen des IMP mit dem einaxialen Druckschwellversuch kann der Verformungswiderstand der Mischgutsorten REF, PACK und ZEO als befriedigend betrachtet werden. Der Verformungswiderstand der Mischgutsorten aus Schaumbitumen hingegen wird als ungenügend eingestuft.

5.2.3 Triaxialer Druck-Schwellversuch

Die triaxiale, dynamische Prüfung wurde mit den Prüfparametern durchgeführt, welche in einem Forschungsprojekt evaluiert und festgelegt wurden [16]:

Temperatur:	50	°C
Oberspannung	0.60	N/mm ²
Unterspannung	0.015	N/mm ²
Seitendruck:	1.5	Bar
Sinusförmige Belastung mit 3 Hz.		

Die Bemerkungen zu den Penetrationswerten im Kapitel 5.2.2 gelten auch für die triaxialen Versuche. Die dynamischen Prüfungen wurden an Marshall-Prüfkörpern durchgeführt.

Als Ergebnis der drei-achsigen, dynamischen Prüfung wird die Dehnungsrate bei 3000 Zyklen angegeben. Im Unterschied zum einaxialen Druckschwell-Versuch tritt bei der drei-achsigen Prüfung in der Regel kein Wendepunkt auf. Es wird daher die Steigung (Dehnungsrate) der Verformungskurve bei einer definierten Anzahl Belastungszyklen angegeben. Je kleiner die Steigung desto grösser der Verformungswiderstand.

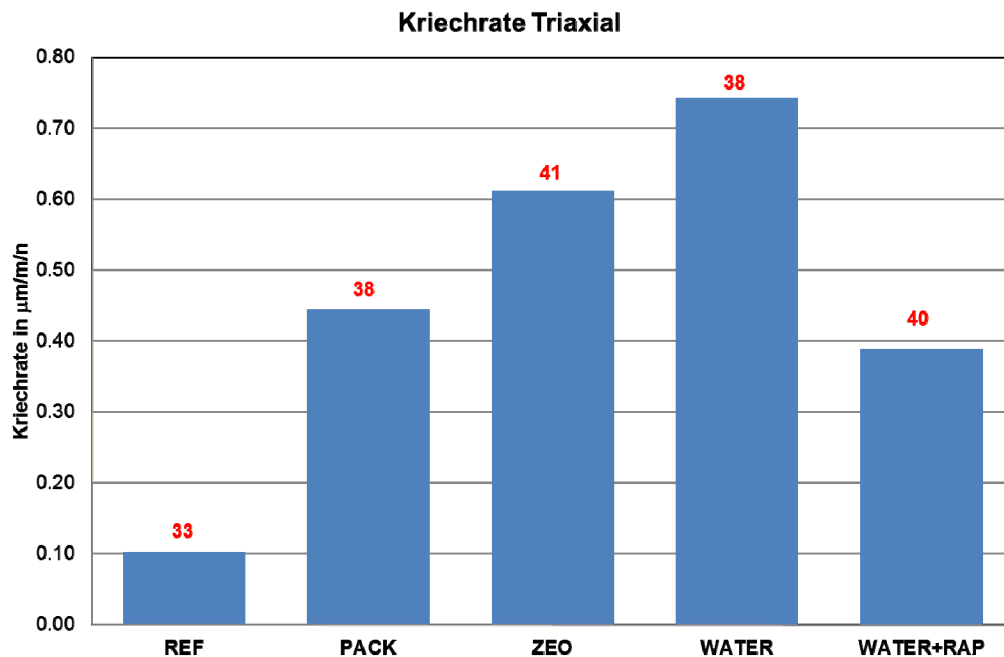


Abb. 42 Ergebnisse des triaxialen Druckschwellversuches bei 50°C mit rot eingetragenen Penetrationswerten

Aus der Abb. 42 geht hervor, dass

- das Heissmischgut den grössten Verformungswiderstand aufweist
- das Schaumbitumen-Mischgut WATER den niedrigsten Verformungswiderstand aufweist.
- das Mischgut ZEO – trotz praktisch gleichem Penetrationswert – einen günstigeren Verformungswiderstand als das Schaumbitumen-Mischgut aufweist.
- das Zudosieren von Asphaltgranulat (WATER + RAP) sich im triaxialen Versuch deutlicher bemerkbar macht als beim einaxialen Versuch

Zurzeit liegen noch zu wenig Untersuchungen vor, um eine Bewertung des Verformungswiderstandes auf der Basis des Triax-Versuches durchzuführen.

5.2.4 Zusammenfassung Verformungswiderstand

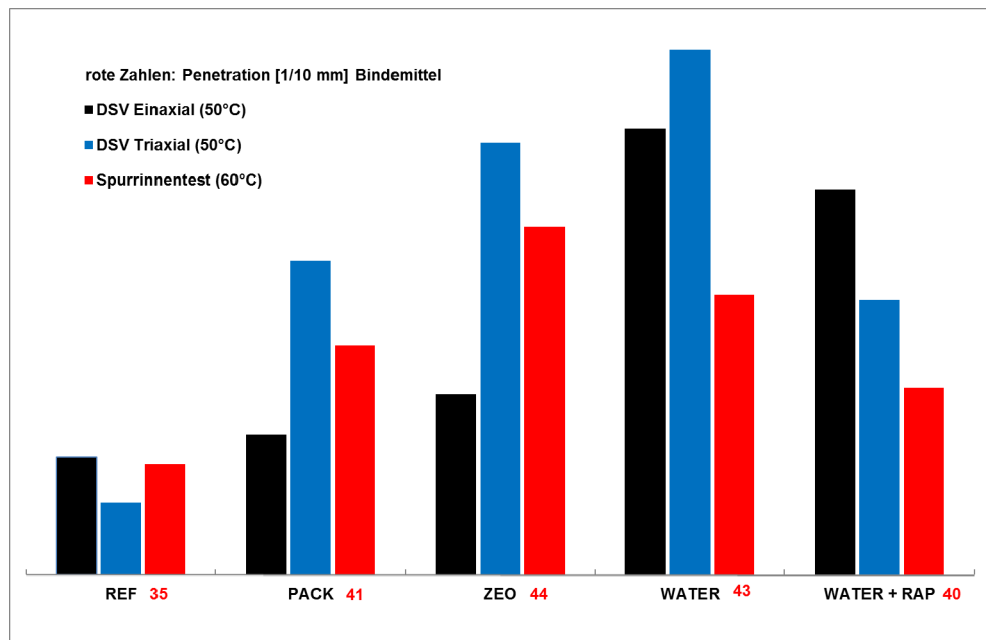


Abb. 43 Relativer Vergleich der drei Prüfungen zur Beurteilung des Verformungswiderstandes (Zahlen in rot: Penetration des rückgewonnenen Bindemittels)

Die drei zur Beurteilung des Verformungswiderstandes durchgeführten Prüfungen sind in der Abb. 43 **Relativer Vergleich der drei Prüfungen zur Beurteilung des Verformungswiderstandes (Zahlen in rot: Penetration des rückgewonnenen Bindemittels)**

zusammengefasst. Bei der Spurrinnenprüfung wurde der Wert nach 10'000 Zyklen berücksichtigt. Zur anschaulichen Darstellung wurden die gemessenen Werte in eine relative, dimensionslose Grösse umgerechnet. Obwohl die einzelnen Prüfungen teilweise unterschiedliche Bewertungen erlauben, lassen sich klare Folgerungen ableiten:

- Das Heissmischgut weist bei allen drei Prüfungen den grössten Verformungswiderstand auf, teilweise bedingt durch das etwas härtere Bindemittel
- Das Schaumbitumen-Mischgut WATER hat – trotz vergleichbarer Bindemittleigenschaften – global gesehen den niedrigsten Verformungswiderstand.
- Generell kann auch festgehalten werden, dass Druck-Schwellversuche (ein- und triaxial) eine grössere Spreizung der Ergebnisse als der Spurrinnentest erzeugen

5.3 Steifigkeit



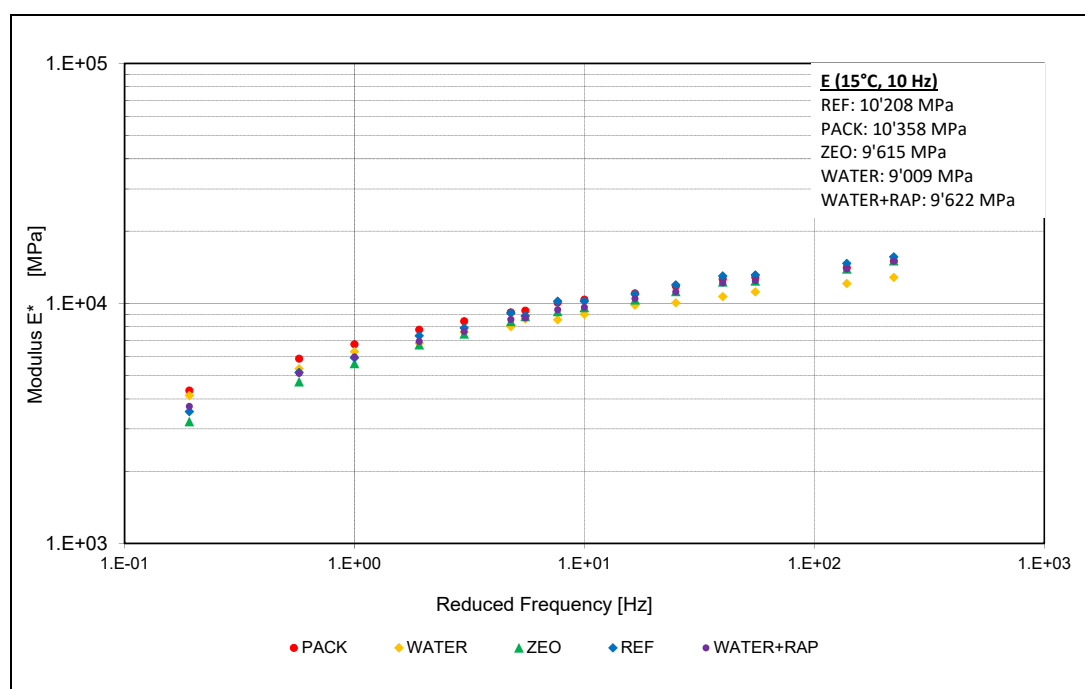
Abb. 44 Ausbruchsstück aus den Testfeldern zur Durchführung der Bestimmung des E-Moduls und der Steifigkeit

Es wurden Prüfungen zur Bestimmung der komplexen Module E^* durchgeführt. Eine Zusammenfassung der relevanten Ergebnisse bei 15°C/10 Hz und 10°C/25Hz ist in der Tab. 12 aufgeführt. Die Abb. 45 zeigt die Masterkurven.

- Das Referenz-Heissmischgut REF und das Warmmischgut PACK weisen vergleichbare Werte für den komplexen Modul auf, welche etwas grösser als diejenigen der drei übrigen Warm-Asphalte sind. Diese Feststellung steht im Einklang mit den Ergebnissen des Einzelprojektes EP3 sowie der Arbeiten in [3], bei welchen festgestellt wurde, dass die mechanischen Eigenschaften der PACK-modifizierten grundsätzlich denjenigen der Heissasphalte entsprechen.
- Die Warm-Asphalte mit Zeolithe ZEO und mit geschäumtem Bitumen (WATER und WATER+RAP) haben vergleichbare E-Module, wobei diese generell etwas kleiner als sind als beim Heissmischgut REF. Es ist allerdings zu bemerken, dass die Unterschiede relativ klein sind.
- Das Mischgut mit geschäumten Bitumen WATER hat den niedrigsten Modul aller untersuchten Mischgutsorten (ca. 13 % niedriger als REF).
- Die Schweizer Normen enthalten keine Anforderungen an die Steifigkeit des Mischgutes AC B. Im Vergleich zu den französischen Erfahrungen können die untersuchten AC B dem Typ GB2 (grave bitume 2) zugeordnet werden, bei welchem für die analytische Dimensionierung generell ein Wert von $E=9'300$ MPa angenommen wird (15°C / 10 Hz). So betrachtet erscheinen alle untersuchten Mischgutsorten als befriedigend und zweckmässig, ausser dem Mischgut WATER, bei welchem der E-Modul mit ca. 9'000 MPa unterhalb des französischen Richtwertes liegt.
- Die festgestellten Unterschiede in der Steifigkeit der untersuchten AC B sind im Zusammenhang mit dem unterschiedlichen Grad der Alterung des Bindemittels zu sehen, daher wurde in der Tab. 12. die Penetrationen der rückgewonnen Bindemittel eingefügt. Obwohl PACK und WATER+RAP analoge Penetrationswerte aufweisen, hat das Mischgut PACK einen deutlich grösseren E-Modul. Auch beim Vergleich ZEO und WATER (analoge Penetrationswerte) hat das Mischgut ZEO einen höheren E-Modul.
- Die Werte für den Phasenwinkel ϕ (zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Dehnung) zeigen keine nennenswerten Unterschiede zwischen den untersuchten Proben. Einzig die Sorten REF und ZEO weisen leicht höhere Werte auf, was auf einen höheren viskosen Anteil an der Gesamtverformung hinweist.

Tab. 12 Zusammenfassung der Prüfungen der Steifigkeit (E-Modul 2PB-TR)

	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+RAP
Hohlraumgehalt ; Mittelwert [Vol.-%]	3.8	5.9	3.7	5.5	5.4
Penetration des rückgewonnenen Bindemittels [1/10 mm]	35	41	44	43	40
15°C, 10 Hz					
E* [MPa]	10'208	10'358	9'615	9'009	9'622
ϕ [°]	18.5	14.6	18.1	13.5	16.7
10 °C, 25 Hz					
E* [MPa]	14'673	14'092	13'934	12'089	13'896
ϕ [°]	11.3	9.2	11.1	8.3	10.7

**Abb. 45** Masterkurven der untersuchten Proben aus den Testfeldern ($T_{REF}=15\text{ °C}$)

5.4 Ermüdungswiderstand

Es wurden Versuche zur Bestimmung des Ermüdungswiderstandes an Prüfkörpern durchgeführt, welche aus Platten aus dem Objekt herausgeschnitten wurden. Die 2-Punkt-Biege-Prüfung an den trapezförmigen Prüfkörpern (2PB-TR) wurde gemäss SN 670 424 [23] bei den Standard-Bedingungen (10° C/25 Hz) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tab. 13 und der Abb. 46 und Abb. 47 aufgezeigt, in welchen der Wert ϵ_6 (Verformung nach einer Million Zyklen) und die Steigung b der Wöhlerkurve aufgeführt werden

- Die Warmasphalte PACK, ZEO und WATER sind bezüglich der Ermüdungseigenschaften vergleichbar.
- Beim Ermüdungswiderstand schneidet das Referenzmischgut REF am schlechtesten ab.
- Das Mischgut in welchem Asphaltgranulat verwendet wurde (WATER+RAP) zeigt das günstigste Verhalten im Ermüdungsversuch. Auch im Vergleich mit dem Mischgut WATER zeigt sich ein deutlicher Unterschied zu Gunsten des Mischgutes WATER+RAP.
- Die beiden geschäumten Mischgutsorten WATER und WATER+RAP haben die niedrigste Steigung der Wöhlerkurve. Theoretisch bedeutet dies, dass die gerechnete Nutzungsdauer weniger von der Grösse der Deformation abhängig ist.
- Grundsätzlich können die festgestellten Ermüdungseigenschaften der untersuchten AC B als befriedigend betrachtet werden. Die Schweizer Normen enthalten keine Anforderungen an den Ermüdungswiderstand von AC B-Binderschichten, ausser bei der Mischgutsorte EME. Für den Typ C1 gilt die Anforderung $\epsilon_6 \geq 100 \mu\text{m/m}$ und für den Typ C2 $\epsilon_6 \geq 130 \mu\text{m/m}$. Bezugnehmend auf die französischen Normen, kann ein Wert für den AC B von $\epsilon_6 = 80 \mu\text{m/m}$ als angemessene Anforderung betrachtet werden. Alle untersuchten Proben liegen oberhalb dieses Wertes.

Tab. 13 Zusammenfassung der Prüfungen des Ermüdungswiderstandes (2PB-TR ; 10°C/25 Hz)

ϵ_6 : Verformung nach einer Million Zyklen

B : Steigung der Wöhlerkurve

	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+RAP
Hohlraumgehalt Mittelwert [Vol.-%]	3.8	5.9	3.7	5.5	5.4
ϵ_6 [10^{-6}]	93	99	99	98	118
Steigung b [-]	-0.201	-0.211	-0.212	-0.168	-0.172

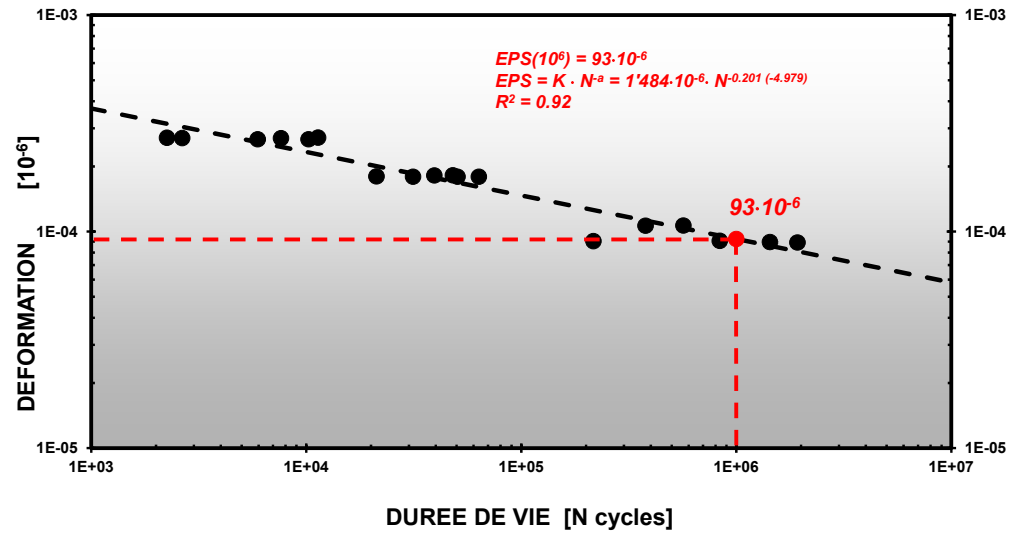


Abb. 46 Ermüdungsprüfung 2PB-TR Mischgut REF (10°C, 25 Hz)

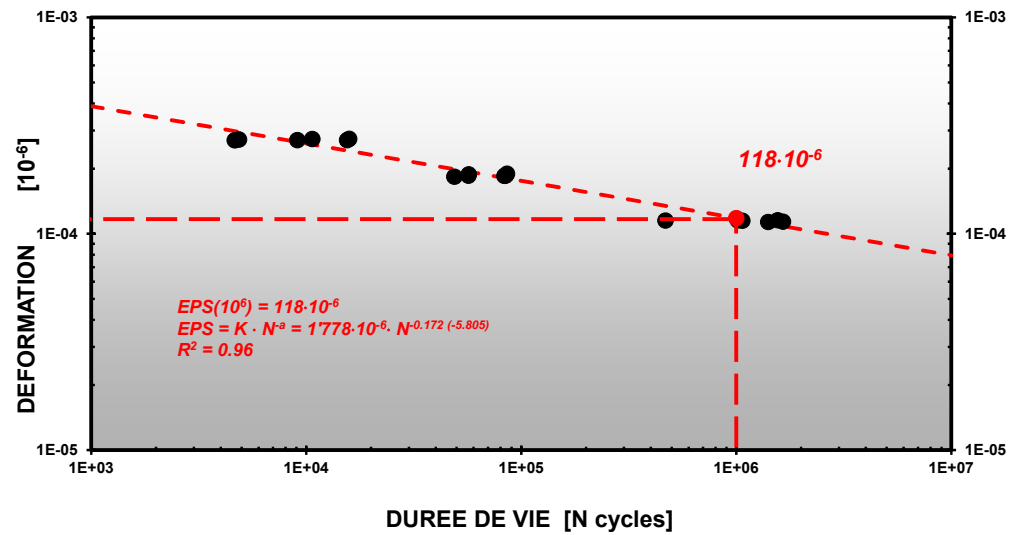


Abb. 47 Ermüdungsprüfung 2PB-TR Mischgut WATER+RAP (10°C, 25 Hz)

5.5 Kälteeigenschaften

5.5.1 Direkter Zugversuch bei + 5°C

Das Kälteverhalten der Mischgutsorten wurde in einem direkten Zugversuch gemäss EN 12697-46 [18] bei 5°C untersucht. Es handelt sich dabei um den UTST-Versuch (Uniaxial Tension Stress Test) bei welchem ein Prüfkörper bei einer konstanten Temperatur mit konstanter Geschwindigkeit so lange gedehnt wird, bis er reisst. Die Ergebnisse des UTST sind die maximale Spannung (Zugfestigkeit) und die entsprechende Zugdehnung.

Es wurden 4 prismatische Prüfkörper 50x50x160 mm aus Platten herausgesägt, welche im Labor mit einem Walzsegmentverdichter [19] hergestellt wurden. Die verdichteten Platten hatten die Masse 100x180x500 mm. Von den 4 Prismen wurde diejenigen drei untersucht, bei welchen die Raumdichten am nächsten beieinander lagen.

Die Prüftemperatur von 5°C ist selbstverständlich keine „kalte Temperatur“, aber diese Temperatur herrscht im Schweizerischen Mittelland sehr oft, und teilweise auch sehr lange. Sie ist für das „Winterverhalten“ typischer als Temperaturen weit unter dem Nullpunkt.

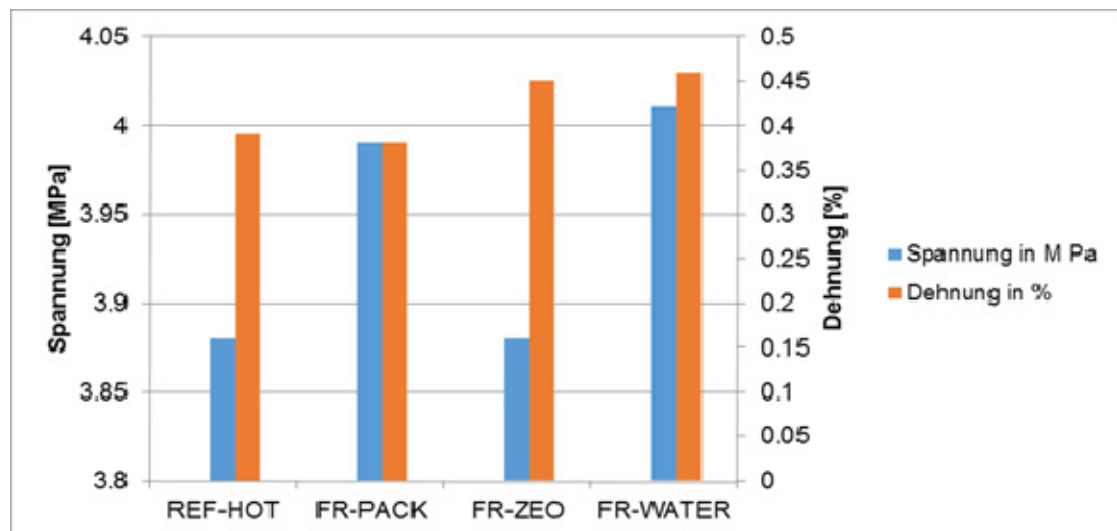


Abb. 48 Bruchspannung und – Dehnung im einaxialen, direkten Zugversuch bei 5 °C

Tab. 14 Bruchspannung und – Dehnung im einaxialen, direkten Zugversuch bei 5 °C; Mittelwerte dreier Prüfkörper unter Angabe der Standardabweichung

Mittelwert	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER
Spannung bei Höchstlast [MPa]	3.88 ± 0.15	3.99 ± 0.10	3.88 ± 0.21	4.01 ± 0.13
Dehnung bei Höchstlast [%]	0.39 ± 0.04	0.38 ± 0.05	0.45 ± 0.03	0.46 ± 0.08

Bei der Bruchspannung sind keine Unterschiede, weder zwischen Heiss- und Warmmischgut, noch zwischen den einzelnen Warmasphalten erkennbar.

Bei der Bruchdehnung liegen REF und PACK auf gleichem, tieferen Niveau, während ZEO und WATER auf einem um ca. 20 % höheren Niveau liegen. Es scheint, dass die mit Wasser modifizierten Mischgutsorten – bei gleicher Bruchkraft – höhere

Bruchdehnungen aufweisen, dh ein kleineres Elastizitätsmodul aufweisen. Dies stimmt sehr gut mit den Ergebnissen der Steifigkeit überein, denn auch da wurde dieser Zusammenhang festgestellt (siehe Tab. 12).

5.5.2 Indirekter Zugversuch bei – 10°C

Gemäss der Norm SN 670 423/EN 12697-23 [20] ist der indirekte Zugversuch (Spaltzugversuch) bei Temperaturen zwischen 5 und 25 °C durchzuführen. Er eignet sich jedoch auch sehr gut um das Kälteverhalten anzusprechen, da diese Prüfung vor allem bei spröden Baustoffen anzuwenden ist. Das verwendete Prüfverfahren weicht geringfügig von der EN-Norm [20] ab; die Prüfung wurde auf der Basis des beim LAVOC optimierten Verfahrens durchgeführt [4]. Dabei wird die Vorschubgeschwindigkeit für niedrige Prüftemperaturen auf 18 mm/Min reduziert. Auch erfolgt die Lasteinleitung nicht durch entsprechende Leisten, sondern durch eine Platte, da somit die Streuung der Ergebnisse verkleinert werden kann.

- Es ist generell festzustellen, dass die Prüfkörper aus dem Heissmischgut REF kleinere Marshall-Hohlraumgehalte aufweisen als diejenigen aus den verschiedenen NT-Asphalten. Bei den NT-Asphalten haben die NT-Sorten PACK und ZEO kleinere Hohlraumgehalte als die geschäumten Sorten (WATER und WATER+RAP). Bei den geschäumten Sorten beträgt der Unterschied bis zu 3 Vol.-% was die Ergebnisse der Prüfungen beeinflussen kann
- Die beiden NT-Sorten PACK und ZEO weisen ähnliche Kälteeigenschaften wie das Referenz-Mischgut REF aus.
- Bei den geschäumten NT-Sorten liegen die Bruchspannungen deutlich tiefer als beim Referenzmischgut. Da auch die Hohlraumgehalte unterschiedlich sind, muss der Einfluss des Hohlraumgehaltes berücksichtigt werden, denn dieser vermindert die «wirksame Fläche». Die Bruchspannung wird berechnet, indem die Bruchkraft durch die nominelle Fläche dividiert wird. Enthält die (nominelle) Bruchfläche Hohlräume, welche keine Spannung übertragen können- müsste beim Vergleich der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Baustoffe der wirksame Querschnitt (= nominelle Fläche abzüglich Fläche der Hohlräume) zur Berechnung der Bruchspannung berücksichtigt werden. Da jedoch die Hohlraumgehalte im vorliegenden Falle um maximal 3 Vol.-% variieren, die Unterschiede der Bruchspannung jedoch mindestens 13 % betragen, kann gefolgert werden, dass die unterschiedlichen Hohlraumgehalte keinen Einfluss haben.
-

Tab. 15 Ergebnisse des indirekten Zugversuches bei -10 °C

	REF	PACK	ZEO	WATER	WATER+RAP
Hohlraumgehalt HM					
Mittelwert [%]	3.1	4.7	4.1	5.3	6.0
Min [%]	2.7	4.0	3.5	5.1	5.8
Max [%]	3.5	5.2	4.5	5.6	6.2
Bruchspannung					
Mittelwert [N/mm ²]	4.7	4.5	4.9	4.1	3.7
Min [N/mm ²]	4.5	4.2	4.3	3.5	3.5
Max [N/mm ²]	5.0	4.9	5.7	4.4	3.8

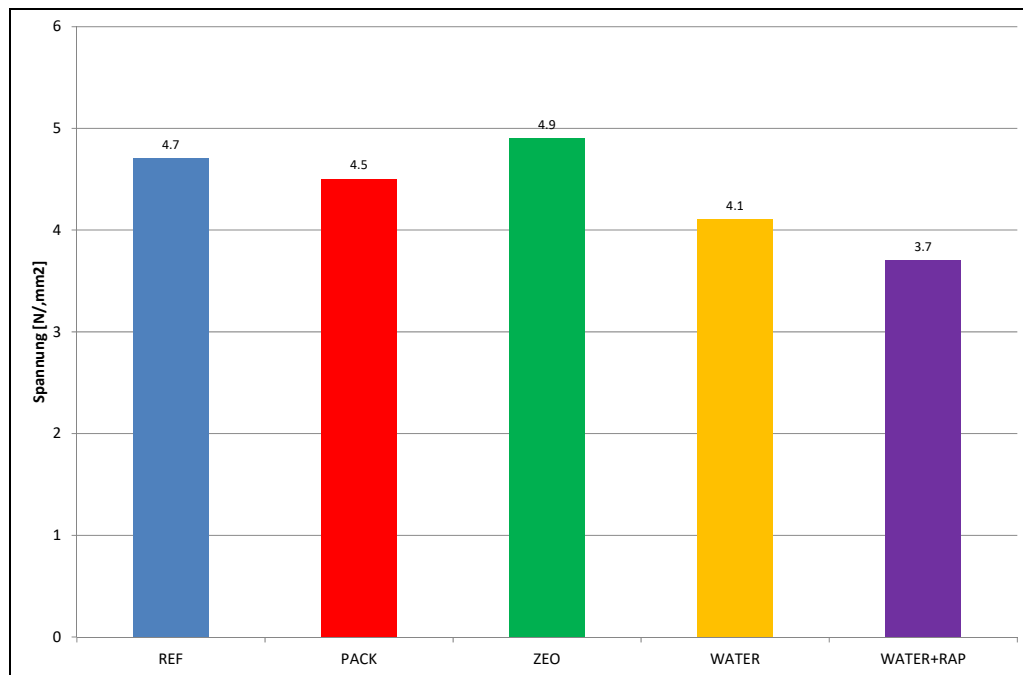


Abb. 49 Bruchspannungen im indirekten Zugversuch (-10 °C)

5.6 Schichtenverbund

Im Zusammenhang mit den Bohrkernuntersuchungen der Teststecken (Kapitel 3.3.4) wurde festgestellt, dass der Schichtenverbund mehrheitlich ungenügend war. Da auch die Ergebnisse beim Heissmischgut REF ungenügend waren, konnte die Frage nicht geklärt werden, ob durch die niedrigeren Einbautemperaturen generell ein Problem des Schichtenverbundes bei den Warmasphalt-Schichten besteht. Um in diesem Punkt weiter zu kommen, wurden eingehende Untersuchungen durchgeführt. Aus der Praxis ist bekannt, dass sich die Werte der Prüfung des Schichtenverbundes im Laufe der Zeit verbessern können. Aus diesem Grunde wurden weitere Bohrkerns entnommen und untersucht. Da sich die Teststrecke auf einer öffentlichen Strasse befindet, war es leider nicht möglich zu jedem der gewählten Zeitintervalle 4 Bohrkerns pro Testfeld zu entnehmen; denn es hätten 125 zusätzliche Bohrkerns entnommen werden müssen! Die Ergebnisse der relativ wenigen untersuchten Bohrkerns sind in der Tab. 16 aufgeführt.

Leider hat die reduzierte Anzahl Bohrkerns sowie die Auswahl der zu untersuchenden Testfelder zu Ergebnissen geführt, welche wenig Informationen liefern. Für die Testfelder REF und PACK ist eine Zunahme in den Frühjahr/Sommer-Monaten festzustellen. Beim WATER + RAP verbleiben die Werte auf gutem Niveau, während für ZEO und WATER eine scheinbare Abnahme beobachtet wird. Diese Feststellungen müssen aufgrund der kleinen Anzahl Bohrkerns als zu wenig gesichert betrachtet werden.

Tab. 16 Ergebnisse des Schubverbundes an Bohrkernen, welche in zeitlichen Abständen nach dem Einbau entnommen wurden

	Schichtenverbund in zeitlichen Abständen zum Einbau [kN]				
	1 Tag	2 Tage	4 Tage	5 Monate	9 Monate
REF			8.3	7.1	11.6
PACK				6.8	10.4
ZEO	5.1	5.1	8.1	4.3	
WATER	8.8	11.6	12.4	6.9*	5
WATER+ RAP				13.3	12.7
Anzahl Werte	2	2	2	4	1
Monat der Bohrkern-Entnahme	Oktober	Oktober	Oktober	März	Juli

Um trotzdem eine Information zur Entwicklung des Schichtenverbundes zu erhalten, wurde die im Weiteren erläuterte Laboruntersuchung durchgeführt:

Grundsätzliches Vorgehen:

Im Labor-Walzsegmentverdichter wurde eine erste Schicht aus Heissmischgut AC B 16 S als Tragschicht eingebaut. Nach Abkühlung der ersten Schicht und Applikation eines Haftklebers wurde eine zweite Schicht aus Warmasphalt bei der für Warmasphalte üblichen Temperatur von 115°C eingebaut und verdichtet. Im Abstand von 3 Tagen, 3 Wochen und 3 Monaten wurden Bohrkern entnommen und daran der Schichtenverbund (Leutner) gemessen.

Zur Vermeidung eines möglichen Einflusses der Luftlagerung an den Rändern der Probekörpern wurden die Platten 130x180x500 mm an den Seiten mit einem bituminösen Anstrich abgedichtet und in einem dunklen Raum bei 22 °C gelagert.

Es wurden folgende Materialien verwendet:

- Haftkleber
 - kationische Bitumenemulsion 50 %
 - polymermodifizierte kationische Bitumenemulsion 60 %
- Warmasphalte
 - Heissmischgut REF
 - chemisches Additiv PACK
 - Zeolithe ZEO
 - AB 16 B S mit analoger Zusammensetzung wie REF, jedoch mit einem wachsmodifizierten PmB

Tab. 17 Ergebnisse der Schubversuche nach unterschiedlichen Lagerungszeiten; Mittelwerte aus 3 Messungen (E: Bitumenemulsion; PmE: polymermodifizierte Bitumenemulsion)

	Schichtenverbund in Funktion der Lagerungsdauer [kN]							
	REF		ZEO		PACK		WACHS	
	E	PmE	E	PmE	E	PmE	E	PmE
3	25.7	25.4	13.4	14.9	15.7	12.0	16.6	20.3
21	28.0	36.3	21.7	20.8	12.8	20.1	11.9	23.1
90	25.6	28.2	25.6	28.2	14.5	20.9	12.8	19.5

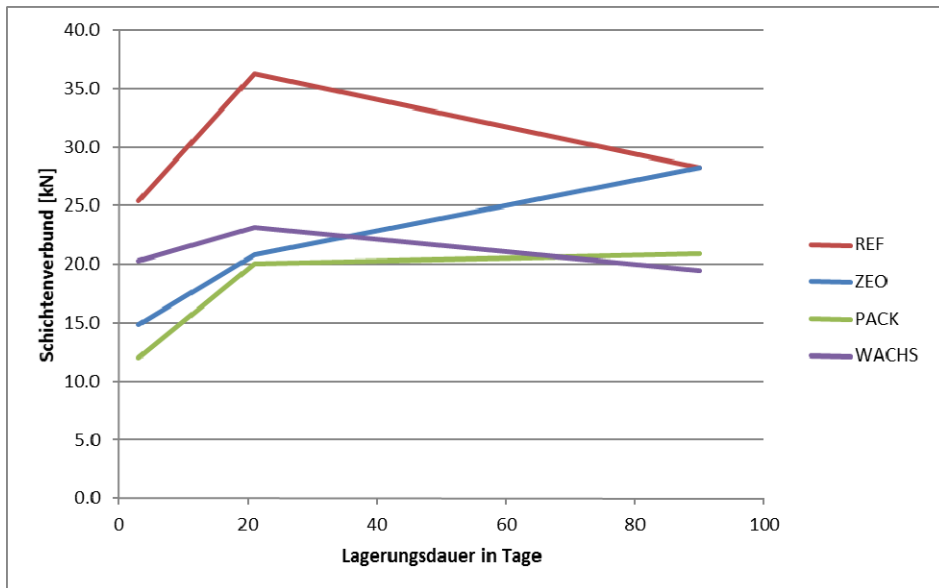


Abbildung 50 Grafische Darstellung der Entwicklung des Schichtenverbundes in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer bei Verwendung eines Haftklebers aus polymermodifizierter Bitumenemulsion

Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass

- alle drei untersuchten NT-Asphalte die in der Schweiz geltende Anforderung an den Schichtenverbund für Binderschichten von > 12 kN erfüllen
- die Prüfkörper aus Heissmischgut generell grössere Werte für den Schichtenverbund aufweisen
- analog zu den Erfahrungen in der Praxis die Werte während der Lagerungsdauer zugenommen haben

6 Empfehlungen

6.1 Normen

Die SN-Norm 640 430 Asphalt, Grundnorm [6] unterscheidet je nach Aufbereitungstemperatur zwischen

Kaltes Mischgut
Halbwarmes Mischgut
Warmes Mischgut
Heisses Mischgut

Im Unterschied dazu unterscheiden die EN-Normen zwischen Mischgut auf der Basis von Heissbitumen und Mischgut auf der Basis von Bitumenemulsionen.

6.1.1 Prüfnormen (EN 12697-xx)

Für die Prüfung von Asphaltmischgut ist die EN-Normen-Reihe EN 12697-XX massgebend. Die gesamte Serie der Normen wird angepasst werden, um auch die kalten und die warmen Asphalte zu integrieren. Daher wird auch der Titel der Normen geändert:

- Bisher: "Asphalt-Prüfverfahren für Heissasphalt"
- Neu: "Asphalt-Prüfverfahren".

In der Regel werden die erforderlichen Änderungen und Anpassungen als Ergänzungen der bestehenden Prüfnormen im Rahmen der üblichen 5 Jahres-Überarbeitungen eingefügt werden.

Für Kalt-Asphalte auf Emulsionsbasis sind neue Prüfnormen in Bearbeitung, diese betreffen jedoch die NT-Asphalte nicht.

6.1.2 Normen für Asphaltmischgut

Die bisherigen EN-Normen für Heissmischgut (EN 13108-XX) gelten auch für NT-Asphalt. In den generellen Bemerkungen wird zur Wahl des Bindemittels bezüglich der NT-Asphalte folgender Hinweis gegeben:

„Falls Additive zur Temperaturabsenkung verwendet werden, welche die mechanischen Eigenschaften des Asphaltes bei den Gebrauchstemperaturen beeinflusst, ist dieser Einfluss zu untersuchen und zu dokumentieren“ (aus dem Englischen übersetzt, da zurzeit noch keine deutsche Version besteht).

Die europäischen Produktnormen für Asphaltmischgut EN13108-xx werden mit einer weiteren Norm (EN 13108-30 „Asphaltbeton mit Bitumenemulsion,“) ergänzt werden. Der Zweck dieser neuen Norm wird es sein, Anforderungen für bitumenemulsionsgebundenes Kalt-Mischgut auf der Basis von leistungsorientierten Prüfungen festzulegen. Da heute in erster Linie empirische Prüfmethode Anwendung finden, dürfte es sich bei der neuen Norm um ein längerfristiges Projekt handeln. Diese neue Norm betrifft das Warm-Mischgut nicht.

Hinweis:

Bei der Herstellung von NT-Mischgut mit Schaumbitumen liegt der Wassergehalt – eine störungsfreie Asphaltproduktion vorausgesetzt - unterhalb von 0.2 Masse-%. Aus Erfahrungen in Frankreich ist bekannt, dass Schäden auftreten können, falls der Wassergehalt infolge einer Fehlmanipulation zu gross wird. Bereits Mengen von 0.6 ...0.8 Masse-% Wasser können die Eigenschaften des Asphaltes entscheidend beeinflussen.

6.1.3 Ausführungsnormen (nationale Elemente)

Aus den Erfahrungen und Kenntnissen des vorliegenden Forschungsprojektes ergibt sich aus heutiger Sicht kein Handlungsbedarf die bestehenden SN-Norm 640 430 für Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten [7] anzupassen.

Allenfalls könnten einige Bemerkungen auf Besonderheiten hinweisen. Die im Kapitel 6.3 zusammengefassten „Hinweise für die Praxis“ dienen dabei als Grundlage.

6.2 Anforderungen

Es besteht kein Grund für die Niedertemperatur-Asphalte andere Anforderungen festzulegen, als für Heissmischgut. Wie im Bericht aufgezeigt, bestehen zwar hinsichtlich der mechanischen Kennwerte Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren einerseits, sowie im Vergleich zum Heissmischgut andererseits, doch sollten alle in der Praxis verwendeten Verfahren grundsätzlich die in der Norm festgelegten Anforderungen erfüllen. So wie bei der Verwendung von Asphaltgranulat (Recycling) keine unterschiedlichen Anforderungen festgelegt wurden, sollte dies auch für die Niedertemperatur-Asphalte gelten.

6.3 „Hinweise für die Praxis“

Aus den Erfahrungen der Teststrecke und deren Untersuchungen, sowie aus verschiedenen Quellen [1,2,8,21] wurden Hinweise für die Praxis tabellarisch festgehalten. Die *Tab. 18* enthält nicht nur für jede der NT-Sorten entsprechende Hinweise, sondern ist auch in den einzelnen Prozess-Schritten, welche bis zum fertig eingebauten und untersuchten Belag erforderlich sind, chronologisch gegliedert.

Tab. 18 Hinweise für die Praxis

Nieder-Temperatur-Asphalt-Verfahren				
	Wachs*	Chemische Zusätze	Zeolith	Schaumbitumen
Rezeptierung				
Richtdosierung	gebrauchsfertig angeliefertes Bindemittel	0.4 Masse-% bezogen auf das Bindemittel	2.5 kg pro Tonne Mischgut	
Wahl des Bindemittels	die tieferen Temperaturen führen zu einer kleineren Bitumenverhärtung; um analoge mechanische Eigenschaften des Mischgutes zu erreichen sind härtere Bindemittel zu wählen			
Besondere Hinweise			Füller-Dosierung um 2 kg pro Tonne reduzieren	Verfahrensspezifische Hinweise des Lieferanten berücksichtigen
Erstprüfung				
Extraktion / Siebanalyse	keine besonderen Bemerkungen			
Bindemittelrückgewinnung	Trichlorethan als Lösemittel verwenden	keine besonderen Hinweise		
Marshall-Verdichtungs-Temperatur	Angaben des Lieferanten berücksichtigen oder mittels Versuchsreihe bestimmen; siehe dazu FGSV-Merkblatt für Temperaturabsenkung [8]			
Spurrinntest / dynamische Prüfungen	Laborverdichtungs-Temperatur analog Marshall-Verdichtungs-Temperatur; ansonsten keine besonderen Hinweise			
Sollwerte	keine besonderen Hinweise		Wassergehalt im Mischgut angeben	
Aufbereitung				
Aufbereitungstemperatur	Angaben des Lieferanten berücksichtigen			
Abgastemperatur	die Abgastemperatur beim Eintritt in die Filter muss über dem Taupunkt liegen			
Mischzeit	eventuelle Verlängerung der Mischzeit; Angaben des Lieferanten berücksichtigen			
Verweildauer im Silo		die Wirkung der chemischen und mineralischen Zusätze sowie der Schaumbitumen können zeitlich begrenzt sein; Angaben des Lieferanten berücksichtigen		
Einbau				
Unterlage	Der Einbau erfolgt bei tieferen Mischgut-Temperaturen; daher ist der Vorbereitung der Unterlage erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Ansonsten kann der Schichtenverbund nicht gewährleistet werden.			
	Unterlage muss absolut trocken sein; keine Restfeuchte.			
Verdichtung	Minimale und maximale Verdichtungstemperatur festlegen.			
	Der Anzahl und der Art der einzusetzten Walzen ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen, da die Zeitspanne für die Verdichtung gegenüber Heissmischgut kürzer ist.			
	sehr rasche Zunahme der Viskosität unterhalb ca. 110 °C	kontinuierliche Zunahme der Viskosität analog Heissmischgut		
Einbau-Kontrollen				
Isotopen-Sonde	Verdichtungskontrollen mit Isotopen-Sonden können ohne besondere Massnahmen durchgeführt werden			
Entnahme Bohrkern	können nach vollständigem Erkalten der Schicht entnommen werden; keine besonderen Hinweise			
Untersuchung Bohrkern	keine besonderen Hinweise			
Qualitäts-Kontrollen				
Laborprüfungen	siehe Hinweise unter "Erstprüfungen"			
Wassergehalt	keine besonderen Hinweise		im Zweifelsfalle bestimmen und mit dem Sollwert vergleichen	

* in der Regel wird ein im gebrauchsfertigen Zustand modifiziertes Bindemittel verwendet

7 Folgerungen

Aus der durchgeführten Forschungsarbeit konnten wertvolle Erkenntnisse im Umgang mit den verschiedenen Techniken zur Herstellung, Einbau und Verdichtung von Niedertemperatur-Asphalt (NT-Asphalt) gewonnen werden. Da bei der konzeptionellen Planung der Teststrecken die Variante der wachsmodifizierten NT-Asphalte ausgeschlossen wurde, liegt das Schwergewicht der Untersuchungen bei den NT-Asphalten, welche mit chemischen Additiven, Zeolithe und geschäumtem Bitumen aufbereitet wurden. Es wurde kein Testfeld mit wachsmodifiziertem NT-Asphalt ausgeführt, da mit dieser Technologie bereits viele Objekte realisiert wurden und diese Technik als bekannt vorausgesetzt wurde.

Für die Durchführung der Eingangskontrollen der zur Temperatur-Absenkung verwendeten Baustoffe und Zusätze konnten praxisgerechte Prüfmethoden identifiziert werden.

Aufbereitung und Einbau der Niedertemperatur-Asphalte erfolgen – unter Berücksichtigung der produktespezifischen Angaben der Lieferanten – mit den herkömmlichen Maschinen und Gerätschaften.

Infolge der niedrigeren Einbautemperaturen ist dem Schichtenverbund ist eine erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

Die Durchführung der Qualitätskontrollen am Mischgut und an Bohrkernen kann mit den herkömmlichen Prüfmethoden erfolgen.

Die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Technologien zur Herstellung von Warmasphalt unterscheiden sich wie folgt:

- Alle untersuchten NT-Asphalte sind empfindlicher gegenüber der Einwirkung von Wasser als das vergleichbare Heissmischgut. Die Werte erfüllen allerdings die Anforderungen der Schweizer Norm, mit Ausnahme des geschäumten Mischgutes WATER.
- Das Heissmischgut weist den grössten Verformungswiderstand auf, teilweise bedingt durch das etwas härtere Bindemittel. Im Vergleich der Warmasphalte hat das Schaumbitumen-Mischgut WATER – trotz vergleichbarer Bindemittleigenschaften – global gesehen den niedrigsten Verformungswiderstand.
- Generell kann auch festgehalten werden, dass Druck-Schwellversuche (ein- und triaxial) eine grössere Spreizung der Ergebnisse herbeiführen, als der Spurrinntest.
- Die Warmasphalte PACK, ZEO und WATER sind bezüglich der Ermüdungseigenschaften vergleichbar. Beim Ermüdungswiderstand schneidet das Referenzmischgut REF am schlechtesten ab.
- Die beiden Warmasphalte PACK und ZEO weisen ähnliche Kälteeigenschaften wie das Referenz-Mischgut REF auf. Bei den geschäumten Warmasphalten liegen die Bruchspannungen deutlich tiefer als beim Referenzmischgut.

Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass die mechanischen Eigenschaften der eingebauten Warmasphalte geprüft wurden und somit kein wachsmodifiziertes Mischgut untersucht wurde.

Es wurden Empfehlungen für die Praxis formuliert, bei denen die zu beachtenden Besonderheiten der verschiedenen Technologien für jeden Prozess-Schritt aufgeführt sind.

Anhänge

I	Anhang.....	85
I.1	Mischgutuntersuchungen	85
I.2	Bohrkern	95

I Anhang

I.1 Mischgutuntersuchungen

i.m.p

IMP-Nummer 12-04769-001
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 1 von 2

Eingang 09.10.2012
Entnahme

Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil FR-REF
Probe Nr. 5-6-48-52-37-28-31-21-2

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.
Iösl. Bindemittelanteil	SN670401a / SN670902-1b	Masse-%	5.02			
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	kg/m3	2500			
Verdichtungstemperatur	SN 670 406a/408/430/434a	°C	155			
Raumdichte	SN 670 406a/408/430/434a	kg/m3	2412			
Hohlraumgehalt	SN 670 406a/408/430/434a	Vol.-%	3.5			
Bindem.ausfüllungsgrad	SN 670 406a/408/430/434a	%	77.0			
Stabilität Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	kN	14.3			
Fliesen Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	mm	3.3			
Tangentialer Fließwert	SN 670 406a/408/430/434a	mm	2.0			
Marshall-Quotient	SN 670 406a/408/430/434a	kN/mm	4.3			
Bindemittleigenschaften:						
Penetration (25°C)	SN 670 511	1/10mm	43			
EP RuK	SN 670 512	°C	58.6			
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-	0.4			



Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

IMP Bautest AG

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



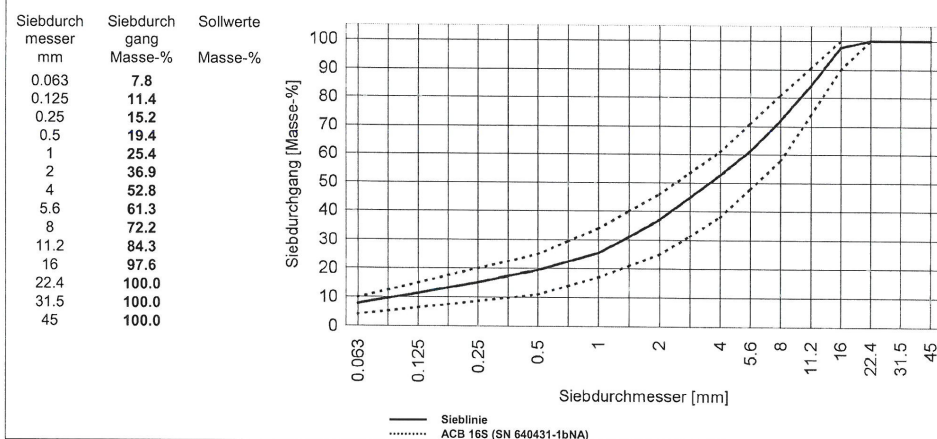
IMP-Nummer 12-04769-001
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 2 von 2

Korngrößenverteilung (SN EN 933-1)



STS 016 Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



IMP-Nummer 12-04769-002
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 1 von 2

Eingang 09.10.2012
Entnahme

Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil FR-PACK Cecabase
Probe Nr. 14-19-38-24-36-46-29-37-44

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.
lös. Bindemittelanteil	SN 670401a / SN 670902-1b	Masse-%	5.02			
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	kg/m ³	2499			
Verdichtungstemperatur	SN 670 406a/408/430/434a	°C	120			
Raumdichte	SN 670 406a/408/430/434a	kg/m ³	2404			
Hohlraumgehalt	SN 670 406a/408/430/434a	Vol.-%	3.8			
Bindem.ausfüllungsgrad	SN 670 406a/408/430/434a	%	75.4			
Stabilität Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	kN	10.8			
Fliessen Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	mm	3.3			
Tangentialer Fließwert	SN 670 406a/408/430/434a	mm	2.4			
Marshall-Quotient	SN 670 406a/408/430/434a	kN/mm	3.3			
Bindemittleigenschaften:						
Penetration (25°C)	SN 670 511	1/10mm	45			
EP RuK	SN 670 512	°C	52.8			
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-	-0.7			



STS 016

Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



IMP-Nummer 12-04769-002
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung **ACB 16 S**

Seite 1 von 3

Eingang 09.10.2012
Entnahme

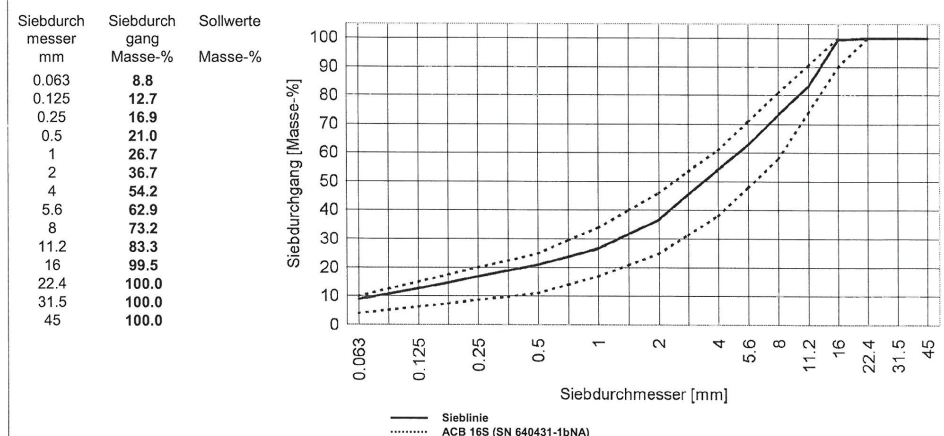
Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil FR-PACK Cecabase
Probe Nr. 14-19-38-24-36-46-29-37-44

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Originalprobe Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.
lösl. Bindemittelanteil	SN670401a / SN670902-1b	Masse-%	5.02			
lösl. Bindemittelanteil	SN 670 401a	Masse-%	4.89			
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	kg/m3	2499			
Bindemiteleigenschaften:						
Penetration (25°C)	SN 670 511	1/10mm	45			
EP RuK	SN 670 512	°C	52.8			
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-	-0.7			

Korngrößenverteilung (SN EN 933-1)



Oberbuchsiten, den 13. Dezember 2012

IMP Bautest AG

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



IMP-Nummer 12-04769-003
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 1 von 5

Eingang 09.10.2012
Entnahme

Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil FR-ZEO Advera, Probe Nr. 62-53-
111-32-95-59-
65-107-106-102-69-28-66-67-56-24-
68

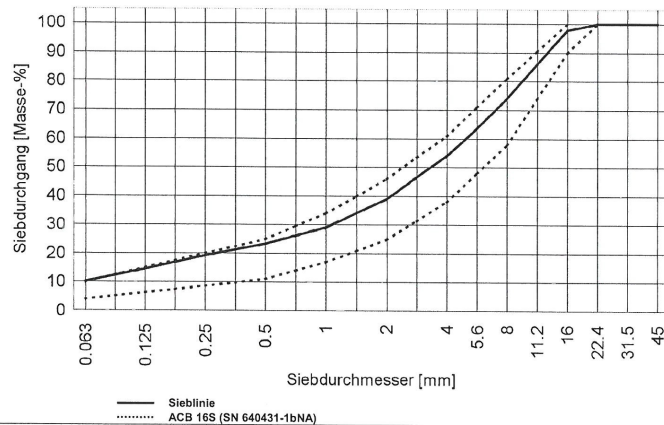
Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Originalprobe Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.
lös. Bindemittelanteil	SN670401a / SN670902-1b	Masse-%	5.07			
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	kg/m3	2494			
Bindemittleigenschaften:						
Penetration (25°C)	SN 670 511	1/10mm	53			
EP RuK	SN 670 512	°C	50.3			
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-	-1.0			

Korngrössenverteilung (SN EN 933-1)

Siebdurchmesser mm	Siebdurchgang Masse-%	Sollwerte Masse-%
0.063	10.1	
0.125	14.5	
0.25	19.2	
0.5	23.3	
1	29.1	
2	39.1	
4	54.0	
5.6	63.6	
8	74.0	
11.2	86.0	
16	97.7	
22.4	100.0	
31.5	100.0	
45	100.0	



STS 016

Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



IMP-Nummer 12-04769-003
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 3 von 5

Eingang 09.10.2012
Entnahme

Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil FR-ZEO Advera, Probe Nr. 62-53-
111-32-95-59-
65-107-106-102-69-28-66-67-56-24-
68

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Teilprobe 2							
Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.	
Verdichtungstemperatur	SN 670 406a/408/430/434a	°C	120				
Raumdicke	SN 670 406a/408/430/434a	kg/m3	2412				
Hohlraumgehalt	SN 670 406a/408/430/434a	Vol.-%	3.3				
Bindem.ausfüllungsgrad	SN 670 406a/408/430/434a	%	78.3				
Stabilität Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	kN	10.7				
Fliesen Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	mm	3.6				
Tangentialer Fließwert	SN 670 406a/408/430/434a	mm	2.5				
Marshall-Quotient	SN 670 406a/408/430/434a	kN/mm	2.9				



STS 016 Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



IMP-Nummer 12-04769-004
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 1 von 2

Eingang 09.10.2012
Entnahme

Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil FR-WATER, Probe Nr. 42-41-38-37-
61-65
102-97-36-35-16-19-27-29-22-23-66

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.
lösl. Bindemittelanteil	SN670401a / SN670902-1b	Masse-%	4.72			
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	kg/m3	2513			
Verdichtungstemperatur	SN 670 406a/408/430/434a	°C	105			
Raumdichte	SN 670 406a/408/430/434a	kg/m3	2400			
Hohlraumgehalt	SN 670 406a/408/430/434a	Vol.-%	4.5			
Bindem.ausfüllungsgrad	SN 670 406a/408/430/434a	%	70.9			
Stabilität Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	kN	9.8			
Fliessen Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	mm	3.4			
Tangentialer Fließwert	SN 670 406a/408/430/434a	mm	2.3			
Marshall-Quotient	SN 670 406a/408/430/434a	kN/mm	2.9			
Bindemiteileigenschaften:						
Penetration (25°C)	SN 670 511	1/10mm	50			
EP RuK	SN 670 512	°C	49.8			
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-	-1.2			



STS 016 Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



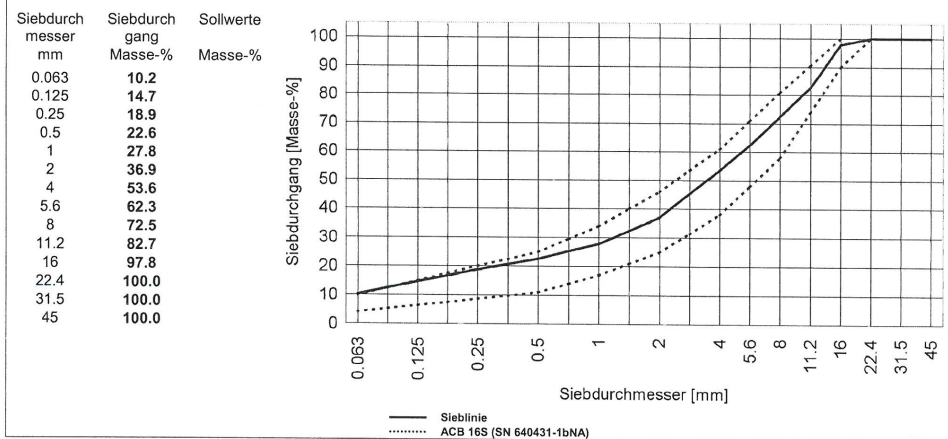
IMP-Nummer 12-04769-004
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 2 von 2

Korngrößenverteilung (SN EN 933-1)



STS 016 Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



IMP-Nummer 12-04769-005
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 1 von 2

Eingang 09.10.2012
Entnahme

Baustelle VSS 2010/546 PLANET
Qualitätskontrolle
Einzelprojekt EP6
Bauteil ~~WAM~~, Probe Nr. 18-10-46-47
WATER+RAP

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abt. Strasseninfrastruktur
Mühlestrasse 2, Ittigen
CH-3003 Bern

Unternehmung	-	Probenart	Mischgutprobe
Aufbereitungsanl.	Weibel AG Oberwangen	Probenahme	Auftraggeber
Anlagen-Code	-	Rezept	-
Lieferschein	-	Temperatur/Zeit	°C / . h
Bindemittel	B 50/70	Dosierung [M.-%]	-
Zusätze	keine Angaben	Dosierung [M.-%]	-

Parameter	Norm	Einheit	Ergebnis	Richtw.	Grenzw.	Sollw.
Iösl. Bindemittelanteil	SN 670401a / SN 670902-1b	Masse-%	4.70			
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	kg/m ³	2507			
Verdichtungstemperatur	SN 670 406a/408/430/434a	°C	105			
Raumdichte	SN 670 406a/408/430/434a	kg/m ³	2394			
Hohlraumgehalt	SN 670 406a/408/430/434a	Vol.-%	4.5			
Bindem.ausfüllungsgrad	SN 670 406a/408/430/434a	%	70.8			
Stabilität Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	kN	10.0			
Fliesen Marshall	SN 670 406a/408/430/434a	mm	3.7			
Tangentialer Fließwert	SN 670 406a/408/430/434a	mm	2.5			
Marshall-Quotient	SN 670 406a/408/430/434a	kN/mm	2.7			
Bindemittleigenschaften:						
Penetration (25°C)	SN 670 511	1/10mm	45			
EP RuK	SN 670 512	°C	54.4			
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-	-0.4			



STS 016 Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016



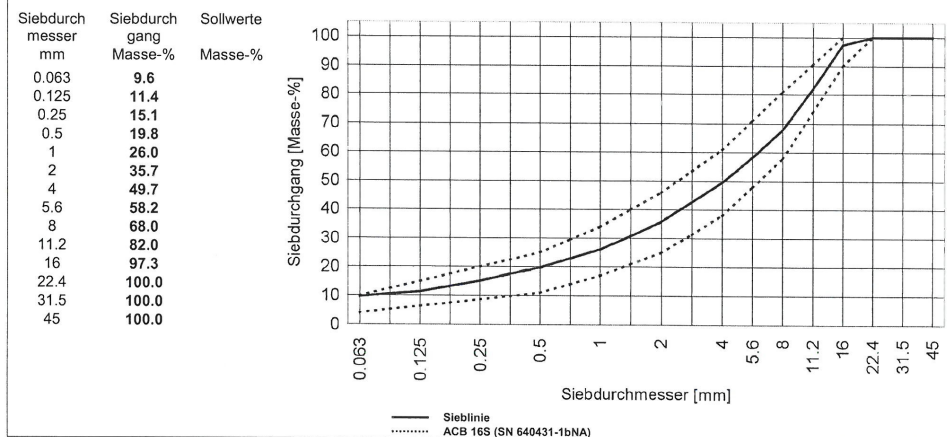
IMP-Nummer 12-04769-005
Projekt 211416

Mischgutuntersuchung

ACB 16 S

Seite 2 von 2

Korngrößenverteilung (SN EN 933-1)



STS 016 Oberbuchsitzen, den 13. Dezember 2012

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchte Probe.

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016

I.2 Bohrkern

Zusammenstellung der Bohrkernuntersuchungen

13.12.2012 1/1

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse
FR-REF

Tabelle 1

IMP-Nummer	Schicht- dicke mm	Raum- dichte BK kg/m3	Vm Vol.-%	Verd. grad %	Schicht- ver- bund kN	Roh- dichte MG kg/m3	Raum- dichte kg/m3	Bemerkungen
/						2500	2412	MC FR-REF
12-04769-001/ORIG								
/								
12-04675-001/SCH1	59	2352	5.9	97.5				BK 1
12-04675-002/SCH1	60	2354	5.9	97.6				BK 2
12-04675-003/SCH1	60	2359	5.6	97.8				BK 3
12-04675-004/SCH1	68	2346	6.2	97.2				BK 4
Mittelwert	62	2353	5.9*	97.5		2500	2412	
Maximalwert	68	2359	6.2	97.8		2500	2412	
Minimalwert	59	2346	5.6	97.2		2500	2412	
Sollwert								
Sollbereiche								
EW max.			7.5					
EW min.			2.0	97.0				
MW max.			6.0					
MW min.			2.5	98.0	12.0			

EW = Einzelwert, MW = Mittelwert, * = Werte ausserhalb des Sollbereichs

IMP-Nummer 211416BK1201

IMP Bauteil AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbauteil.ch
www.impbauteil.ch

Swiss Testing: STS 016

Zusammenstellung der Bohrkernuntersuchungen

13.12.2012 1/1

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse
FR-PACK Cecabase

Tabelle 2

IMP-Nummer	Schicht dicke mm	Raum- dicke BK kg/m3	Vm Vol.-%	Verd. grad %	Schicht ver- bund kN	Roh- dicke MG kg/m3	Raum- dicke kg/m3	Bemerkungen
/								
12-04769-002/ORIG						2499	2404	MG FR-PACK Cecabase
/								
12-04675-005/SCH1	70	2319	7.2*	96.5				BK 5
12-04675-006/SCH1	67	2402	3.9	99.9				BK 6
12-04675-007/SCH1	65	2408	3.6	100.2				BK 7
12-04675-008/SCH1	62	2353	5.8	97.9				BK 8
Mittelwert	66	2371	5.1	98.6		2499	2404	
Maximalwert	70	2408	7.2	100.2		2499	2404	
Minimalwert	62	2319	3.6	96.5		2499	2404	
Sollwert								
Sollbereiche								
EW max.			7.5					
EW min.			2.0	97.0				
MVV max.			6.0					
MVV min.			2.5	98.0	12.0			

EW = Einzelwert, MW = Mittelwert, * = Werte ausserhalb des Sollbereichs

IMP-Nummer 211416BK1202

IMP Bautech AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautech.ch
www.impbautech.ch

Swiss Testing: STS 016

Zusammenstellung der Bohrkernuntersuchungen

13.12.2012 1/1

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse
FR-ZEO Advera

Tabelle 3

IMP-Nummer	Schicht- dicke mm	Raum- dichte BK kg/m3	Vm Vol.-%	Verd. grad %	Schicht- ver- bund kN	Roh- dichte MG kg/m3	Raum- dichte kg/m3	Bemerkungen
/								
12-04769-003/ORIG						2494	2404	MG FR-ZEO Advera
/								
12-04675-009/SCH1	68	2424	2.8	100.8				BK 9
12-04675-010/SCH1	71	2399	3.8	99.8				BK 10
12-04675-011/SCH1	67	2388	4.3	99.3				BK 11
12-04675-012/SCH1	76	2338	6.3	97.3				BK 12
Mittelwert	71	2387	4.3	99.3		2494		
Maximalwert	76	2424	6.3	100.8		2494		
Minimalwert	67	2338	2.8	97.3		2494		
Sollwert								
Sollbereiche								
EW max.			7.5					
EW min.			2.0	97.0				
MW max.			6.0					
MW min.			2.5	98.0	12.0			

EW = Einzelwert, MW = Mittelwert, * = Werte ausserhalb des Sollbereichs

IMP-Nummer 211416BK1203

IMP Bautech AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautech.ch
www.impbautech.ch

Swiss Testing: STS 016

Zusammenstellung der Bohrkernuntersuchungen

13.12.2012 1/1

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse
FR-WATER

Tabelle 4

IMP-Nummer	Schicht- dicke	Raum- dicke BK	Vm	Verd. grad	Schicht ver- bund	Roh- dicke MG	Raum- dicke	Bemerkungen
	mm	kg/m3	Vol.-%	%	kN	kg/m3	kg/m3	
/								
12-04769-004/ORIG						2513	2400	MG FR-WATER
/								
12-04675-013/SCH1	70	2359	6.1	98.3				BK 13
12-04675-014/SCH1	74	2358	6.2	98.2				BK 14
12-04675-015/SCH1	70	2411	4.0	100.5				BK 15
12-04675-016/SCH1	66	2327	7.4	97.0				BK 16
Mittelwert	70	2364	5.9	98.5		2513	2400	
Maximalwert	74	2411	7.4	100.5		2513	2400	
Minimalwert	66	2327	4.0	97.0		2513	2400	
Sollwert								
Sollbereiche								
EW max.			7.5					
EW min.			2.0	97.0				
MW max.			6.0					
MW min.			2.5	98.0	12.0			

EW = Einzelwert, MW = Mittelwert, * = Werte ausserhalb des Sollbereichs

IMP-Nummer 211416BK1204

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016

Zusammenstellung der Bohrkernuntersuchungen

13.12.2012 1/1

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse

~~WAM~~ WATER + RAP

Tabelle 5

IMP-Nummer	Schicht- dicke mm	Raum- dicke BK kg/m3	Vm Vol.-%	Verd. grad %	Schicht- ver- bund kN	Roh- dicke MG kg/m3	Raum- dicke kg/m3	Bemerkungen
/						2507	2394	MG WAM
12-04769-005/ORIG								
/								
12-04675-017/SCH1	68	2398	4.3	100.2				BK 17
12-04675-018/SCH1	58	2400	4.3	100.2				BK 18
12-04675-019/SCH1	74	2409	3.9	100.6				BK 19
12-04675-020/SCH1	100	2373	5.4	99.1				BK 20
Mittelwert	75	2395	4.5	100.0		2507	2394	
Maximalwert	100	2409	5.4	100.6		2507	2394	
Minimalwert	58	2373	3.9	99.1		2507	2394	
Sollwert								
Sollbereiche								
EW max.			7.5					
EW min.			2.0	97.0				
MW max.			6.0					
MW min.			2.5	98.0	12.0			

EW = Einzelwert, MW = Mittelwert, * = Werte ausserhalb des Sollbereichs

IMP-Nummer 211416BK1205

IMP Bautest AG
Institut für MaterialprüfungHauptstrasse 591
CH-4625 OberbuchsitenTelefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016

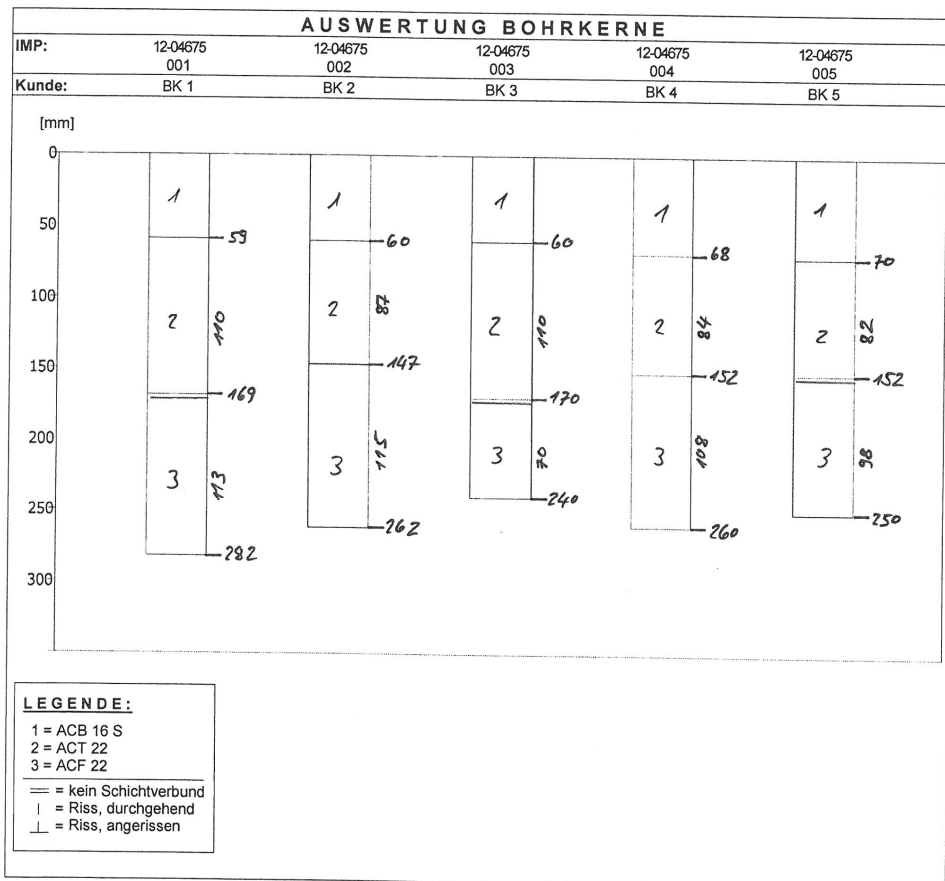
i.m.p

IMP-Nummer 211416GR1201

Auswertungen Bohrkern

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uetligenstrasse



STS 016 Oberbuchsitzen, den 10. Oktober 2012

IMP Bauteist AG

IMP Bauteist AG
Institut für MaterialprüfungHauptstrasse 591
CH-4625 OberbuchsitzenTelefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90info@impbauteist.ch
www.impbauteist.ch

Swiss Testing: STS 016

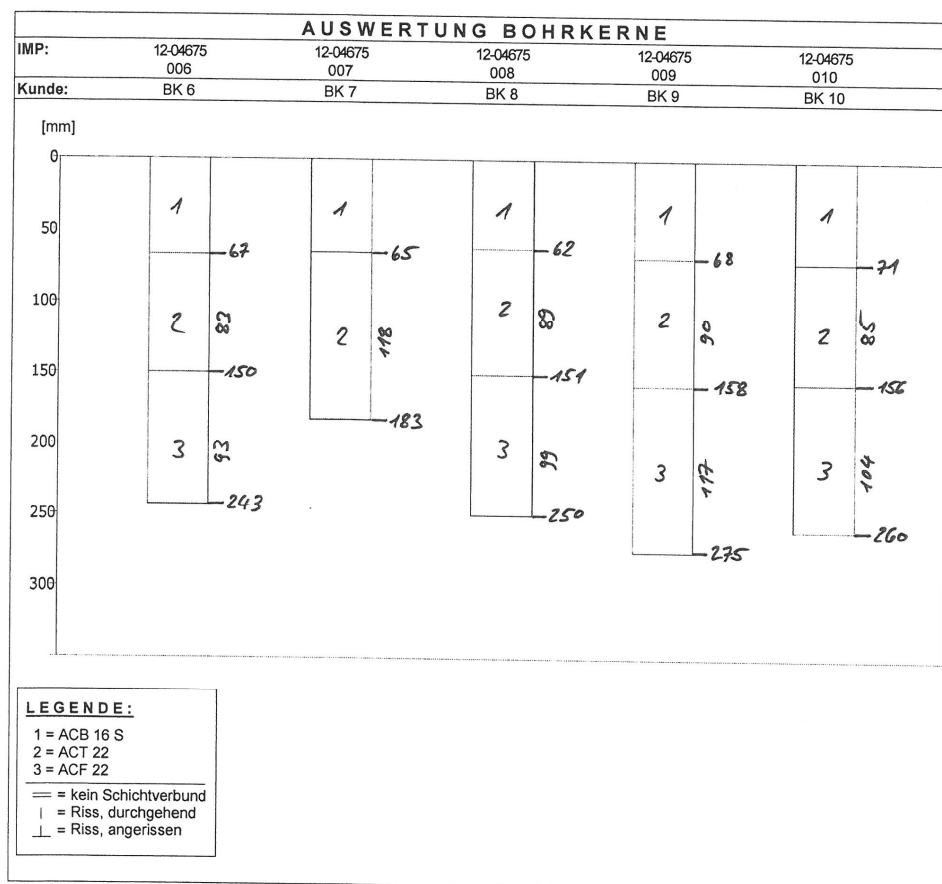
i.m.p

IMP-Nummer 211416GR1202

Auswertungen Bohrkern

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse



STS 016

Oberbuchsiten, den 10. Oktober 2012

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsiten

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016

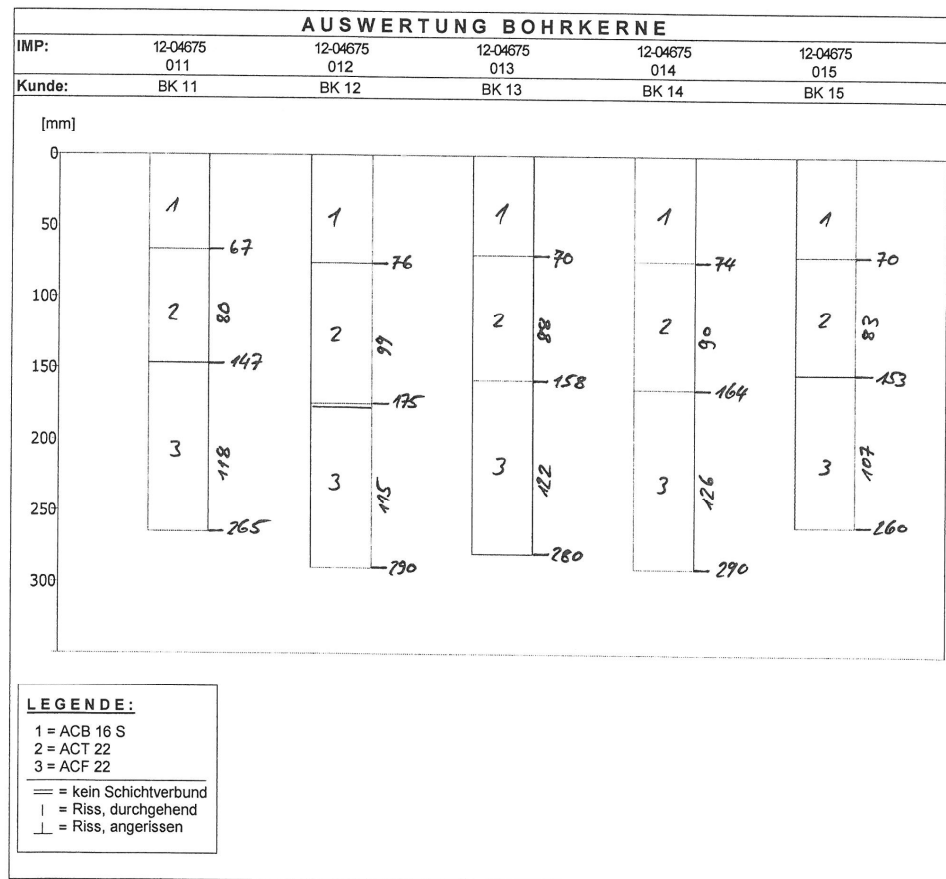
i.m.p

IMP-Nummer 211416GR1203

Auswertungen Bohrkern

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse



STS 016

Oberbuchsitzen, den 10. Oktober 2012

IMP Baute AG

IMP Baute AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbaute.ch
www.impbaute.ch

Swiss Testing: STS 016

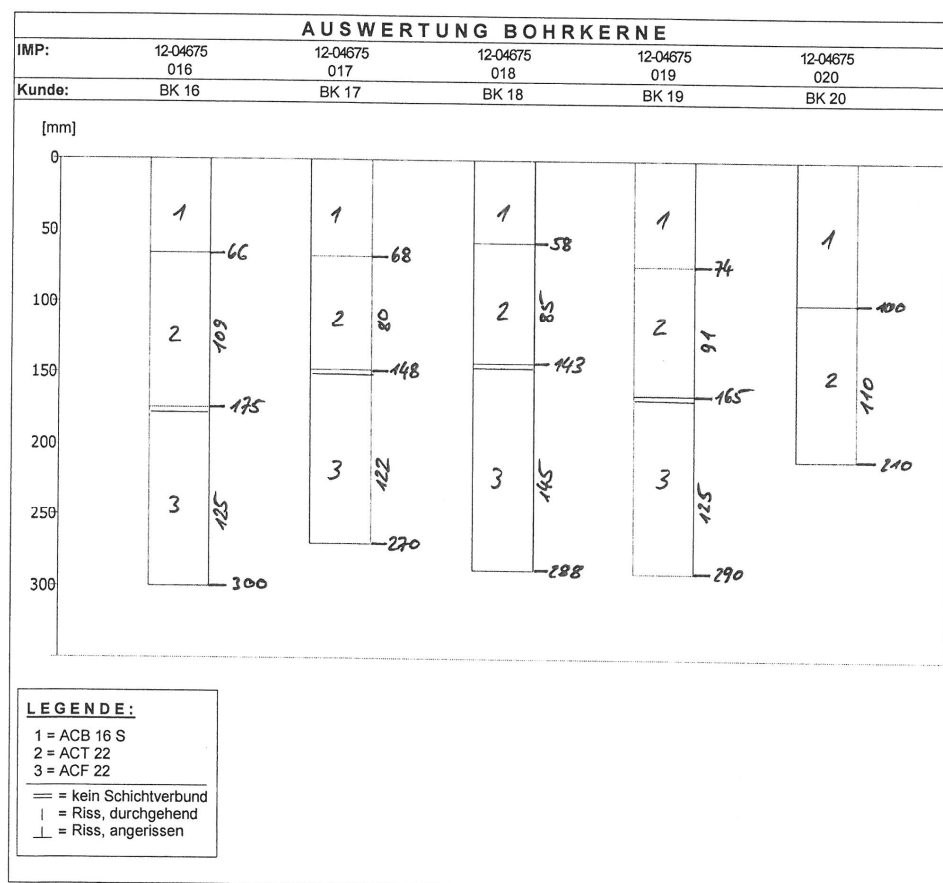
i.m.p

IMP-Nummer 211416GR1204

Auswertungen Bohrkern

211416 VSS 2010/546 PLANET Qualitätskontrolle

Wohlen bei Bern, Uettligenstrasse



STS 016 Oberbuchsitzen, den 10. Oktober 2012

IMP Bautest AG

IMP Bautest AG
Institut für Materialprüfung

Hauptstrasse 591
CH-4625 Oberbuchsitzen

Telefon 062 389 98 99
Fax 062 389 98 90

info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

Swiss Testing: STS 016

Glossar

Begriff	Bedeutung
NT	Niedertemperatur
NTA	Niedertemperaturasphalt
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
FWD	Falling Weight Deflectometer
DSR	Dynamisches Scherrheometer
IMP	Institut für Materialprüfung
EP	Einzelprojekt
WPK	werkseigene Produktionskontrolle
FGSV	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen
AC	Asphaltbeton
E	Bitumenemulsion
PmE	polymermodifizierte Bitumenemulsion

Literaturverzeichnis

-
- [1] N. Bueche, G. Dumont und C. Angst, «Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques; VSS 2008/502,» VSS, Zürich, 2009
 - [2] J. Nicholls, H. Baily, N. Ghazireh und D. DH, „Specification for Low Temperatur Asphalt Mixtures,“ TRL Report PPR666, Wokingham UK, 2013
 - [3] N. Bueche, "Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques", thèse EPFL N° 5169, 2011
 - [4] Assef-Vaziri, A. H., M. L. Pigois, et al.. Essai de compression diamétrale appliqué aux enrobés hydrocarbonés, EPFL – LAVOC, 1984
 - [5] J. Perret, "Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic". Thèse EPFL N+ 2786, 2003
 - [6] SN 640 420 : 2015 Asphalt - Grundnorm
 - [7] SN 640 430:2013 Walzasphalt - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten
 - [8] Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt; FGSV, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 2011
 - [9] SN 670 559/EN14770 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR)
 - [10] EN 12697-3 :2015 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 3 : Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer
 - [11] SN 670 403-NA/EN 12697-3 :2015 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 3 : Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer
 - [12] SN 670 513/EN12606-1; Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel; Bestimmung des Paraffingehaltes – Teil 1 Destillationsverfahren
 - [13] SN 670 430- 2015 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät
 - [14] TP A-St-B: „Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme“; Ausgabe 1999
 - [15] SN 670 425/EN 12697-25 2006 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch
 - [16] C. Angst, F. Beltzung, „Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen VSS 2005/504“ VSS, Zürich 2014
 - [17] SN 670 422 /EN 12697-22 - 2009 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 22: Spurbildungstest
 - [18] SN 670 446/EN 12697-46:2013 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen
 - [19] SN 670 433 /EN 12697-33: 2009 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät
 - [20] SN 670 423/EN 12697-23:2003 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern
 - [21] Cerema; Abaissement de température des mélanges bitumineux; Paris, Oktober 2015
 - [22] SN 640 431-21/EN 13108-21:2010 Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 21: Werkseitige Produktionskontrolle
 - [23] SN 670 424/EN 12697-24: 2009 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung
 - [24] SN 670 424/EN 12697-24: 2009 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 31.01.2016

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2010/546

Projekttitel: PLANET EP6 Anforderungen und Qualitätskontrolle

Enddatum: 31.01.2016

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Aus der durchgeführten Forschungsarbeit konnten wertvolle Erkenntnisse im Umgang mit den verschiedenen Techniken zur Herstellung, Einbau und Verdichtung von Niedertemperatur-Asphalt (NT-Asphalt) gewonnen werden. Da bei der konzeptionellen Planung der Teststrecken die Variante der wachsmodifizierten NT-Asphalte ausgeschlossen wurde, liegt das Schwergewicht der Untersuchungen bei den NT-Asphalten, welche mit chemischen Additiven, Zeolithe und geschäumtem Bitumen aufbereitet wurden. Es wurde kein Testfeld mit wachsmodifiziertem NT-Asphalt ausgeführt, da mit dieser Technologie bereits viele Objekte realisiert wurden und diese Technik als bekannt vorausgesetzt wurde. Für die Durchführung der Eingangskontrollen der zur Temperatur-Absenkung verwendeten Baustoffe und Zusätze konnten praxisgerechte Prüfmethoden identifiziert werden. Aufbereitung und Einbau der Niedertemperatur-Asphalte erfolgen – unter Berücksichtigung der produktespezifischen Angaben der Lieferanten – mit den herkömmlichen Maschinen und Gerätschaften. Infolge der niedrigeren Einbautemperaturen ist dem Schichtenverbund eine erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Die Durchführung der Qualitätskontrollen am Mischgut und an Bohrkernen kann mit den herkömmlichen Prüfmethoden erfolgen. Die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Technologien zur Herstellung von Warmasphalt unterscheiden sich wie folgt:

- Alle untersuchten NT-Asphalte sind empfindlicher gegenüber der Einwirkung von Wasser als das vergleichbare Heissmischgut. Die Werte erfüllen allerdings die Anforderungen der Schweizer Norm, mit Ausnahme des geschäumten Mischgutes WATER.
- Das Heissmischgut weist den grössten Verformungswiderstand auf, teilweise bedingt durch das etwas härtere Bindemittel. Im Vergleich der Warmasphalte hat das Schaumbitumen-Mischgut WATER – trotz vergleichbarer Bindemiteleigenschaften – global gesehen den niedrigsten Verformungswiderstand.
- Generell kann auch festgehalten werden, dass Druck-Schwellversuche (ein- und triaxial) eine grössere Spreizung der Ergebnisse herbeiführen, als der Spurrinntest.
- Die Warmasphalte PACK, ZEO und WATER sind bezüglich der Ermüdungseigenschaften vergleichbar. Beim Ermüdungswiderstand schneidet das Referenz-Heissmischgut REF am schlechtesten ab.
- Die beiden Warmasphalte PACK und ZEO weisen ähnliche Kälteeigenschaften wie das Referenz-Mischgut REF auf. Bei den geschäumten Warmasphalten liegen die Bruchspannungen deutlich tiefer als beim Referenzmischgut. Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass die mechanischen Eigenschaften der auf der Teststrecke eingebauten Warmasphalte geprüft wurden und somit kein wachsmodifiziertes Mischgut untersucht wurde.

Es wurden Empfehlungen für die Praxis formuliert, bei denen die zu beachtenden Besonderheiten der verschiedenen Technologien für jeden Prozess-Schritt aufgeführt sind.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die drei Ziele des Projektes wurden vollumfänglich erreicht:
Für die Qualitätskontrollen von Warmasphalten wurden geeignete Prüfmethoden benannt und für die verschiedenen Niedertemperatur (NT)-Technologien entsprechende Hinweise formuliert.

Bezüglich der Anforderungen an Warmasphalte konnte aufgezeigt werden, dass es nicht sinnvoll ist gesonderte Anforderungen festzulegen. Für Warmasphalte sollen die gleichen Anforderungen an deren Eigenschaften wie für Heissasphalte gelten.
Zur Erleichterung der Anwendung der NT-Technologien wurden Hinweise für die einzelnen Prozess-Schritte Rezeptierung / Erstprüfung / Aufbereitung / Einbau / Einbau-Kontrollen / Qualitätskontrollen formuliert und tabellarisch zusammengefasst.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Ergebnisse der Arbeit unterstützen die Praxis indem viele Fragen zum Umgang mit Warmasphalte angegangen wurden. Die Realisierung von Vergleichsstrecken hat es erlaubt, verschiedene NT-Technologien umzusetzen und zu vergleichen. Daraus konnten praxisbezogene Erfahrungen gewonnen werden.

Die Entwicklungen in den CEN-Normen sind zu beobachten und allfällige Anpassungen des Schweizerischen Normenwerkes auf der Basis der Erkenntnisse des Projektes durchführen. Die in den Teststrecken eingebauten Sensoren erlauben ein mehrjähriges Monitoring, weit über den Zeitraum des Projektes hinaus. Innerhalb der Beobachtungsperiode konnten keine wesentlichen Erkenntnisse gewonnen werden, da die Belastung der Strasse zu gering war. Es wird daher dringend empfohlen in einem Anschlussprojekt die installierte Infrastruktur für das Monitoring weiterhin zu nutzen.

Publikationen:

Ch. Angst; "Projekt PLANET - Stand und erste Ergebnisse"; SMI Fachtagung 07. Februar 2014
Ch. Angst; "Teststrecken mit temperaturreduzierten Mischgutsorten"; VSS Fachtagung 8. April 2014
Ch. Angst, N. Bueche; "Mechanical properties and quality-control of warm asphalt"; E&E Congress, Juni 2016 Prag

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Angst

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: IMP Bauteil AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die drei Ziele des Projektes wurden vollumfänglich erreicht:
Für die Qualitätskontrollen von Warmasphalten wurden geeignete Prüfmethode benannt und für die verschiedenen Niedertemperatur (NT)-Technologien entsprechende Hinweise formuliert. Bezüglich der Anforderungen an Warmasphalte konnte aufgezeigt werden, dass es nicht sinnvoll ist gesonderte Anforderungen festzulegen. Für Warmasphalte sollen die gleichen Anforderungen an deren Eigenschaften wie für Heissasphalte gelten.
Zur Erleichterung der Anwendung der NT-Technologien wurden Hinweise für die einzelnen Prozess-Schritte Rezepturierung / Erstprüfung / Aufbereitung / Einbau / Einbau-Kontrollen / Qualitätskontrollen formuliert und tabellarisch zusammengefasst.

Umsetzung:

Aufbereitung und Einbau der Niedertemperatur-Asphalte erfolgen – unter Berücksichtigung der produktespezifischen Angaben der Lieferanten – mit den herkömmlichen Maschinen und Gerätschaften.

Infolge der niedrigeren Einbautemperaturen ist dem Schichtenverbund eine erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

Die Durchführung der Qualitätskontrollen am Mischgut und an Bohrkernen kann mit den herkömmlichen Prüfmethode erfolgen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Da kein wachsmodifiziertes Mischgut untersucht wurde, wird empfohlen, in einem weiteren Forschungsschritt, auch dieses Verfahren zu untersuchen.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Prüfnormen (EN 12697-xx) und des Asphaltmischgut (EN 13108-xx) werden im üblichen 5-Jahres-Überarbeitungsrythmus angepasst. Für die nationale Ausführungsnorm SN 640 430 ist kein Handlungsbedarf.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Aeschlimann

Vorname: Heinz

Amt, Firma, Institut: Aeschlimann Asphalt-Engineering AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

VSS FK3: JHK

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3 / 3

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Dienstleistungen --> Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.