

Biobitumen

Bitumen-Ersatzprodukt auf nachwachsender Rohstoffbasis und darauf basierender Asphalt

J. Bleier

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

33/2013

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Biobitumen

Bitumen-Ersatzprodukt auf nachwachsender Rohstoffbasis und darauf basierender Asphalt

DI Dr. Johann Bleier
Österreichische Vialit-Gesellschaft m.b.H.

TU-Wien, Institut für Angewandte Synthesechemie

C.A.R.M.E.N. eV

Braunau/Inn, September 2012

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung	4
1.1 Abstract.....	6
2 Einleitung	8
2.1 Allgemeine Einführung.....	8
2.2 Ausgangssituation/Motivation des Projektes.....	9
2.3 Zielsetzung des Projektes.....	11
2.4 Beschreibung des Standes der Technik.....	12
2.5 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema.....	15
2.6 Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichtes.....	17
3. Hintergrundinformationen zum Projekt	18
3.1 Verwendete Methoden und Daten.....	18
3.2 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten, Quellen.....	19
3.3 Beschreibung des Standes der Technik.....	20
3.4 Beschreibung der Neuerungen sowie ihre Vorteile gegenüber Ist-Zustand...	21
4. Ergebnisse des Projektes	22
4.1 Ergebnisse der Vorstudie zur Rohstoffauswahl.....	22
4.1.1 Die Chemie der Rohstoffbasis für Bitumenersatzstoffe.....	29
4.2 Ergebnisse der chemischen Synthese-Serien.....	34
4.2.1 Ligninderivate.....	34
4.2.2 Enzymatische Studien an Lignin (Laccasen).....	50
4.2.3 Nebenprodukte der Fischer-Tropsch-Konversionsverfahren.....	50
4.2.4 Biopolyester.....	51
4.3 Ergebnisse der asphalttechnischen Erprobung der Syntheseprodukte.....	51
4.4 Ergebnisse mit teilweise Einsatz von Bitumenersatzstoffen in Asphalt.....	52
5. Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie	56
5.1 Einpassung in die Programmlinie.....	56
5.2 Umsetzungspotentiale und Demonstrationsvorhaben.....	56
6. Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	57
6.1 Erkenntnisse für das Projektteam.....	57
6.2 Weiterarbeit mit den Projektergebnissen.....	60
7. Ausblick und Empfehlungen	61
8. Literatur und Abbildungsverzeichnis	63
8.1 Literaturverzeichnis.....	63
8.2 Abbildungsverzeichnis.....	65
9. Anhang	66

1 Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation:

Erdöl ist eine fossile Rohstoff- und Energiequelle, die innerhalb der nächsten 50 Jahre verbraucht sein wird. Der Rohöl-Destillationsrückstand Bitumen ist weltweit das bedeutendste Bindemittel für den Straßenbau. Betonstraßen sind kein gleichwertiger Ersatz für Asphaltstraßen, da die Zementherstellung einen hohen Energieaufwand und Kohlendioxidausstoß verursacht und Beton insbesondere bei dem am weitesten verbreiteten niederrangigen Straßennetz ein eher ungünstiger Baustoff ist.

Alleine Österreich verbraucht jährlich ca. 400.000 Tonnen Bitumen, weltweit liegt der Bedarf um 200 Millionen Tonnen. Derzeit gibt es keine alternativen Bindemittel für die Asphaltherstellung, die Bitumen in Hinblick auf nennenswerte Verfügbarkeit zu einem annehmbaren Preis ersetzen könnten.

Inhalte und Zielsetzungen

Das markante Steigen des Bitumenpreises auf etwa das Vierfache in den letzten 7 Jahren und die in der Bausaison mehrfach auftretenden Versorgungsengpässe zeigen, dass es sinnvoll und notwendig ist, eine nachhaltige Bindemittelversorgung aufzubauen. Es ist eine Reihe von Naturstoffen mit bindemittelartigen Eigenschaften bekannt, die in reiner Form oder in Abmischung mit anderen Naturstoffen als Bitumenersatzstoffe geeignet sind. Deren Verfügbarkeit ist aber nach dem derzeitigen Stand der Technik völlig unzureichend.

Ziel dieses Projektes war es, ein leistungsfähiges Bitumen-Ersatzprodukt auf nachwachsender Rohstoffbasis zu entwickeln. Es sollten aber dadurch keine Nahrungs- und Futtermittelanbauflächen substituiert werden, sondern es war die vorwiegende Nutzung von Pflanzenrestmassen beabsichtigt.

Am Beispiel Österreichs kann errechnet werden, dass nur etwa 1 % des jährlichen Biomassezuwachses die notwendigen Bindemittelmengen liefern könnte.

Methodische Vorgehensweise

Zunächst wurde durch eine breit angelegte Literaturstudie das vorhandene Potential an nachwachsenden Rohstoffen in Hinblick auf brauchbare Stoffanteile abgeschätzt. Danach wurde in einem empirischen Bewertungsverfahren die grundsätzliche Eignung ausgewählter Inhaltsstoffe überprüft. In der Hauptprojektphase wurden Syntheseverfahren entwickelt, um die aus den relevanten Naturstoffen isolierten Substanzen in modifizierte Stoffe mit akzeptablen Bindemittelleigenschaften überzuführen. Die Synthesen konnten der Art nach sowohl Biokonversionsmethoden als auch klassische chemische Reaktionen sein, mussten aber in jedem Fall in wirtschaftlicher und technologischer Hinsicht das Potential für eine Massenproduktion haben. Sowohl Ausgangs-Rohstoffe aus heimischer oder ausländischer traditioneller oder zukunftsoptimierter Land- und Forstwirtschaft, aber auch Nebenprodukte

von künftig an Bedeutung zunehmenden Verfahren zur Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen kommen in Frage.

Erzielte Ergebnisse

In einer umfangreichen Screening-Studie wurde aus dem gesamten verfügbaren Angebot nachwachsender Rohstoffe eine Auswahl auf mögliche Eignung für einen Bitumenersatzstoff getroffen. Um der grundlegenden Forderung Rechnung zu tragen, hauptsächlich nur Reststoffe einzusetzen, wurden alle derzeit schon intensiv im Bereich Nahrungs- und Futtermittel genutzten Stoffe ausgeschlossen. Unter dem Aspekt der ausreichenden Verfügbarkeit in Anbetracht der großen Bedarfsmengen wurden der Holzbestandteil Lignin sowie auf Ölpflanzen basierende Naturstoffe als aussichtsreiche Synthesestoffe ausgewählt.

In ersten Syntheserien wurden verschiedene verfügbare Ligninvarianten auf Eignung geprüft. Je nach Provenienz und Gewinnungsform erwiesen sich diese Varianten als unterschiedlich geeignet. Von den hergestellten Syntheseprodukten wurden Stoffmerkmale wie Klebrigkeit, Haftverhalten und rheologische Eigenschaften untersucht. Methodisch wurde mit Laborsynthesereaktionen gearbeitet, massentaugliche Produktionsverfahren waren nicht Gegenstand dieses Projektes. Studien zum biotechnologischen Ligninabbau wurden ebenfalls betrieben und ergänzend dazu auch Rückstände aus der BtL-Technologie, einem Verfahren zur Energieträgergewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen, in grundlegende Untersuchungen miteinbezogen.

In weiteren praxisnahen Studien konnte gezeigt werden, dass es derzeit schon möglich ist, auf der Basis eines Gemisches aus fossilem Bitumen und nachwachsenden Rohstoffen hochleistungsfähige zukunftsweisende Asphalt-Typen zu erzeugen.

1.1 Abstract

Point of departure / motivation:

Crude petroleum is a fossil mineral resource and fuel source that will be used up within the next 50 years. Bitumen, the residue left over from petroleum distillation is throughout the world the most significant bonding agent used for roadway construction. Concrete roadways are not a fully equivalent substitute for asphalt roads since the manufacture of cement is costly in terms of energy and entails carbon dioxide emission and concrete is a rather poor building material, particularly in the most widespread and less prioritised roadway network.

Austria alone annually consumes about 400,000 tons of bitumen and the worldwide demand lies around 200 million tons. Currently there are no alternative bonding agents for production of asphalt which could replace bitumen in view of its significant availability at an acceptable price.

Contents and objectives

The marked rise in the price of bitumen to about four times its original price in the last seven years and the supply bottlenecks that frequently occur in the building season show that it would be reasonable and necessary to establish a permanent supply of a bonding agent. A number of natural substances are known that have bonding agent-like properties which are suitable bitumen substitutes in their pure form or when mixed with other natural substances. But their availability is, with the current state of the art, completely inadequate.

The objective of this project was to develop a more efficient bitumen substitute product based on regenerative raw materials. But no foodstuff or animal feed cultivation acreage should be sacrificed to do so. Rather, it is primarily the use of plant remnant materials that are intended.

Using the example of Austria, it can be calculated that only about 1% of the annual biomass increase could supply the necessary quantities of bonding agent.

Methodological approach

First of all, with a broadly based study of available literature the existing potential of regenerative raw materials was estimated in respect of the usable portion of such substances. Thereafter, in an empirical evaluation procedure, the basic suitability of selected constituents was reviewed. In the main project phase, synthetic processes were developed in order to transfer the substances isolated from the relevant natural materials to modified substances with acceptable bonding agent properties. The syntheses could be of the bio-conversion method type as well as of the classical chemical reaction kind, but would in any case need to have the potential for mass production in economic and technical respects.

Both source raw material from domestic or foreign traditional or future-optimised agriculture and forestry as well as by-products of energy recovery processes that will increase in importance in the future using regenerative raw materials are feasible.

Results achieved

In a comprehensive screening study, from the entire available supply of regenerative raw materials a selection was made for potential suitability as a bitumen substitute. In order to do justice to the basic requirement of using only remnants, all materials currently used intensely for foodstuff and animal feed purposes were excluded. Under the aspect of adequate availability in view of the huge volumes required, the wood component lignin as well as oil plant-based natural materials were selected as promising synthesis stocks.

In the initial synthesis series, different available variants of lignin were tested for their suitability. Depending on their origin and the form of their recovery, those variants proved to differ in their suitability. Of the manufactured synthesis products, material properties like stickiness and adhesiveness as well as rheological properties were examined. The methodology used was laboratory synthesis reactions; processes suitable for mass production were not the subject of this project. Studies on bio-technical lignin decomposition were likewise conducted and, additionally, remnants from synthetic fuel technology, a procedure for recovering energy sources from regenerative raw materials, were included in the basic investigations.

In additional practically oriented studies it could be shown that it is currently already possible to produce high-quality pioneer types of asphalt on the basis of a mixture of fossil bitumen and regenerative raw materials.

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einführung

Dieses Forschungsprojekt, das im Rahmen der 5. Ausschreibung der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ als „**Projekt zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe**“ gefördert und im Zeitraum 2009 bis 2012 durchgeführt wurde, betrifft aus technologischer Sicht den Bereich **Straßenbau und Straßenerhaltung**. Konkret ist es dem Bereich Asphaltstraßenbau zuzuordnen und betrifft das Bindemittel im Asphalt, das Bitumen.

Bitumen ist der Rückstand aus der Erdöldestillation und fällt nach mehrstufigen Destillationsschritten, zuletzt bei etwa 410 °C und einem Vakuum von 3 kPa, als Sumpfprodukt an [1]. Der chemische und kolloidale Aufbau von Bitumen ist komplex, es ist ein Stoffgemisch aus tausenden bis hunderttausenden unterschiedlichen Verbindungen, hauptsächlich aliphatischen/aromatischen Kohlenwasserstoffen sowie Heteroverbindungen. Die Molekulargewichtsspanne liegt im Bereich von 1000 bis 100.000. Die rheologische Konsistenz ist thermoplastisch (unter 10 °C hart bis spröde, bei 10 °C bis 60 °C zähflüssig, über 100 °C zunehmend dünnflüssig) und die Viskosität überstreicht im Temperaturbereich von Verarbeitung bis Beanspruchung unter Verkehr etwa 10 Zehnerpotenzen (von ca. 100 mPas bis 1000 MPas).

Bitumen ist ausgeprägt oleophil und hydrophob, löst sich also weitgehend in allen pflanzlichen Ölen und Fetten sowie ähnlichen organischen Lösemitteln. Es ist praktisch unlöslich in Wasser, hat eine gute Haftfähigkeit auf Gestein und eignet sich daher hervorragend als dessen Klebstoff. Daher ist es nicht zuletzt aufgrund eines relativ niedrigen Preises (siehe später) das ideale Asphaltbindemittel.

Asphalt ist per Definition ein Gemisch aus Gesteinsmaterial und Bitumen und ist der weltweit mengenmäßig am häufigsten eingesetzte Straßenbaustoff [2] [3]. Variationen der Bitumensorten und des Bitumengehaltes, der Gesteinsorten, Gesteinskorngößen und deren Korngrößenverteilung ermöglichen eine große Variationsbreite der Asphaltarten und



Abbildung 1: Beispiele von Asphaltbohrkernen aus Straßen unterschiedlicher Belastungskategorien

vielseitige Anwendungen. Neben Straßenbau spielt Asphalt auch im Wasserbau eine gewisse Rolle.

Österreich verbraucht derzeit jährlich etwa 400.000 bis 500.000 Tonnen Bitumen, daraus werden rund 10 Millionen Tonnen Asphalt hergestellt. Der volkswirtschaftlich sehr bedeutungsvolle Straßenbau und die Straßenerhaltung sind daher vollständig auf das Importprodukt Erdöl angewiesen und dadurch eng mit der Energiepolitik auf fossiler Rohstoffbasis verknüpft. Etwa 5 % des Erdöls fallen in einer Raffinerie als Bitumen an.

Asphalt wird vorwiegend im Heißverfahren verarbeitet, was bedeutet, dass die Zuschlagstoffe Gestein (ca. 95 %) und Bitumen (ca. 5 %) auf etwa 180 °C erhitzt werden müssen, die Lagerung, der Transport sowie auch der Einbau und die Verdichtung heiß durchzuführen sind. Insgesamt erfordern Mineraltrocknung und Aufheizen erhebliche Energiemengen von rund 10 kg Heizöl je Tonne Asphalt.

Das knappe Werden der weltweiten Rohölvorräte ist absehbar, das Umsteigen auf regenerative Energiequellen wird auch die verfügbaren Bitumenmengen reduzieren. Bitumen wird schon jetzt ein Mangelprodukt (sowohl quantitativ als auch qualitativ), da durch ausgefeilte Raffinerietechnologien (Visbreaker) aus Bitumen zunehmend Kraftstoffe erzeugt werden, die den Raffinerien eine höhere Wertschöpfung ermöglichen. In einigen Raffinerien europäischer Länder werden die Visbreaker-Rückstände, das sind koksartige stark verhärtete Bitumenrestmassen, in frisches Bitumen rückverschnitten. Die daraus resultierende Qualität ist mangelhaft und Asphalte, die mit einem derartigen „Visbreaker-Bitumen“ hergestellt werden, sind für Risse anfällig und kurzlebig, da das Bindemittel sehr rasch altert (siehe dazu auch Abschnitt 2.4).

2.2 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

In diesem Forschungsvorhaben soll ein Bitumensubstitutionsprodukt auf der Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt werden. Dem Antragsteller ist es schon im Jahre 1992 gelungen, in Straßenerhaltungsbindemitteln einen kleinen Teil des Bitumens durch nachwachsende Rohstoffe (im weiteren Text mit Nawaros abgekürzt) zu ersetzen. Die Innovation „Rapsasphalt“ wurde mit dem Hauptpreis „Fabrik der Zukunft“ 2002 gewürdigt [4]. In konsequenter Weiterentwicklung wurde mit der Innovation „Reaktivasphalt“ ein kalt einbaufähiges Reparatur-Asphaltmischgut geschaffen, dessen zukunftsweisendes Bindemittel zu etwa einem Drittel aus Nawaros besteht. Diese Technologie soll im gegenständlichen Vorhaben weiterentwickelt werden, sodass Asphalt auch im großtechnischen Maßstab in Hinkunft weitgehend kalt, zumindest aber mit deutlich reduziertem Energieeinsatz, verarbeitet werden kann. Der Anteil an Nawaros im Bindemittel soll weiter gesteigert werden, sodass im Idealfall 100 % des Bindemittels aus regenerativen Stoffquellen, vorzugsweise aus Nebenprodukten von agro-stämmigen Wertschöpfungsketten möglichst heimischen Ursprungs (Wald- und Feldwirtschaft), stammen könnten. Der Bedarf liegt geschätzt bei etwa 1 % des jährlichen Zuwachses an Österreichs Biomasse. Eine Bedarfsmenge, die an sich niedrig erscheint, die aber in Anbetracht der Tatsache, dass eine derartige Technologie derzeit nicht vorhanden ist und daher entwickelt werden müsste, eine

erhebliche Herausforderung darstellt. Da der Aufbau neuer Technologien mindestens 10 Jahre braucht und hohe Investitionskosten verursacht, muss rechtzeitig mit den Vorarbeiten dafür begonnen werden. Um die Bewährung in der Praxis abschätzen zu können, muss im kleinen Versuchsmaßstab begonnen werden. Der Beobachtungszeitraum für bauliche Maßnahmen im Straßenbau muss stets 2 bis 5 Jahre betragen. Insgesamt ist daher mit Entwicklungszeitspannen für Bitumenersatzstoffe für den Straßenbau von durchaus 10 bis 20 Jahren zu rechnen.

Ein wesentliches Anliegen dieses Projektes ist es, vorerst technisch und wirtschaftlich geeignete Rohstoffquellen zu sondieren und deren biotechnologische oder technische Konvertierbarkeit zur Veredelung zu prüfen. Es soll also ein erster ernsthafter Schritt getan werden, zukünftige Bedürfnisse im technischen Straßenbau abzudecken, wenn die Erdölvorräte erschöpft sind. Gemäß Literatur [5], und viele andere Quellen bestätigen diesen Zeithorizont, liegt das Verhältnis der Reserven und der Produktion (R/P-Ratio) beim Erdöl bei 54,2. Das bedeutet, dass die wirtschaftlich erschließbaren globalen Ölvorkommen bei der derzeitigen Jahresproduktion von 30,5 Milliarden Barrel (das entspricht 4,2 Milliarden Tonnen Erdöl, daraus lässt sich eine weltweite jährliche Bitumenmenge von 200 Millionen Tonnen ableiten) für rund 54,2 Jahre ausreichen. Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren die Preise von Bitumen (siehe Abbildung 2) weiter steigen werden, was alternative Rohstoffe konkurrenzfähiger macht und die Zielsetzung dieses Projektes begünstigen wird.

Bitumenpreisentwicklung von 2004 bis 2012

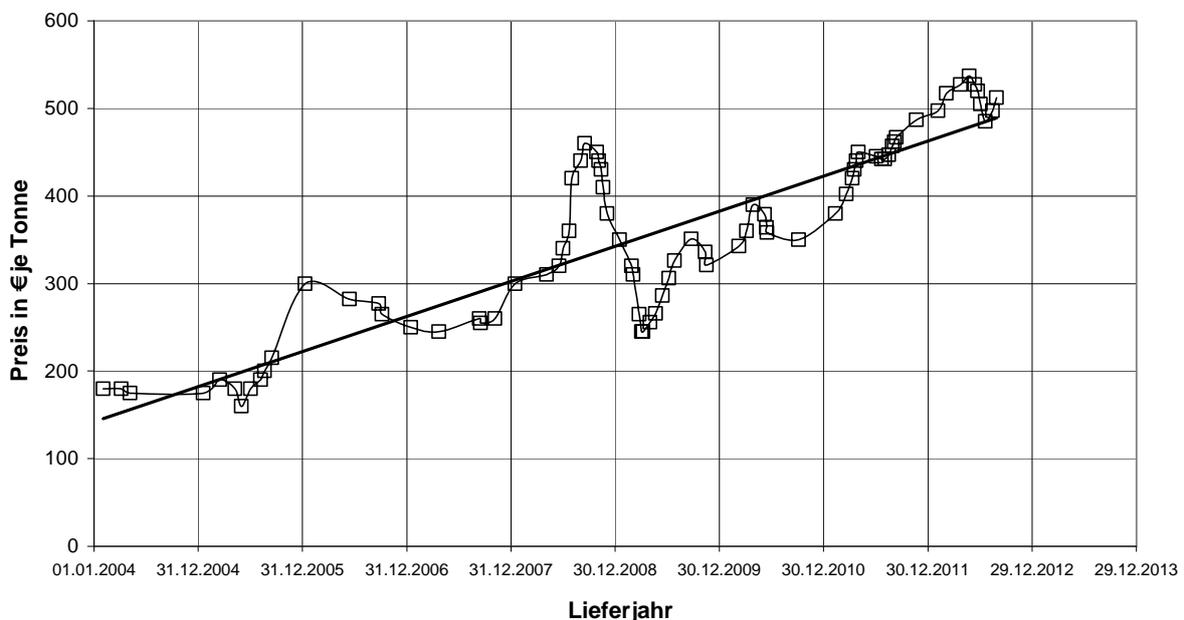


Abbildung 2: Preisentwicklung von Bitumen in den Jahren 2004 bis 2012 in Österreich

In der zweiten Hälfte dieses Zeithorizontes wird das Erdöl mit hoher Wahrscheinlichkeit völlig anders, hauptsächlich petrochemisch und nicht mehr energetisch genutzt werden, was zu

einem erheblich früheren Stopp der Bitumenproduktion führen könnte, also vielleicht schon innerhalb der nächsten 20 Jahre.

2.3 Zielsetzungen des Projektes

Das Vorhaben bezweckt die fossile Ressource Bitumen soweit wie möglich, angestrebt werden 100 %, schrittweise durch eine nachwachsende Rohstoffbasis zu ersetzen. Als Rohstoffquelle sollen in Hinkunft nachwachsende Stoffe aus heimischer oder auch ausländischer Landwirtschaft dienen, wobei nicht die klassischen Wertstoffe sondern hauptsächlich die beim Verarbeitungsprozess anfallenden Nebenstoffströme nutzbar gemacht werden sollen. Als Beispiel sei die Holzverarbeitung angeführt: Zellstoff oder Papier sollten nicht als Substitutionsprodukt dienen, sondern die beim Prozess anfallenden Nebenprodukte wie Sulfitablauge, Sulfatablauge und das daraus isolierbare Lignin.

Es sollte in keinem Fall zu einem Konkurrenzieren von Stoffen für den unmittelbaren Nutzen für die menschliche Ernährung kommen. Es sollte vielmehr erreicht werden, dass die wirtschaftliche Produktion von Lebensmitteln optimiert werden kann, weil Nebenproduktlinien gezielt und damit wirtschaftlicher genutzt werden können.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollten folgende Stoffgruppen und/oder die bei deren technischer oder biotechnologischer Aufbereitung anfallenden Nebenproduktströme auf Eignung geprüft werden: Öle und Fette, Holz und Zellstoff, Eiweißstoffe und Futtermittel, Stärke und Zucker (Melasse), Kautschuk, Harze und Wachse, Biomasse/Biogas und BtL (Biomass to Liquid)/Fischer-Tropsch-Prozess und deren Rückstandsprodukte wie Teere und Peche, Leder- und Textilverarbeitungsprozesse, Tierverwertung (Land- und Wassertiere), Reststoffe aus der Pharmaproduktion oder aus anderen „enzymintensiven“ Branchen. Ebenso wäre die als zukünftige Schlüsseltechnologie prognostizierte Mikroalgen-Biomasse, die den etwa 10-fachen „solaren Ertrag“ im Vergleich zu Landpflanzen ermöglichen soll, als Stoffgruppe attraktiv. Aus praktischer Sicht ist eine vollständige Bearbeitung aller dieser umfangreichen Stoffgruppen in diesem Projekt nicht möglich. In den Vorerhebungen müssen einige wenige ausgewählt werden, um sie dann auf Machbarkeit im Sinne dieser Zielsetzung näher zu untersuchen.

Eine weitere Zielsetzung des Vorhabens ist, die Asphalttechnologie so zu verändern, dass sie mit einem niedrigeren Energieeinsatz auskommt. Es soll eine weitgehend kalte bis warme Mischgutherstellungstechnik entwickelt werden, die dem Einbaupersonal bessere Arbeitsbedingungen ermöglicht und die nicht den Nachteil der relativ späten Befahrbarkeit von frisch eingebauten Asphaltsschichten aufweist. Diese Zielsetzung kann durch eine Erweiterung der „Reaktivasphalt-Technologie“, die vom Antragsteller in den letzten Jahren des 20. Jahrhunderts weltweit erstmalig zur Marktreife entwickelt wurde, realistisch bewerkstelligt werden. Diese Erweiterung bedeutet, das bisherige Reaktivasphaltverfahren von der handwerklichen Ausführung auf eine Technologie mit Baumaschinen zu übertragen. Da das Reaktivasphaltprinzip im Kaltverfahren durchführbar ist, kann damit ein großer Energieeinsparungseffekt realisiert werden. Zusätzlich soll der Versuch unternommen

werden, das Verfahren mit naturfeuchten Gesteinszuschlagstoffen durchzuführen, was einen weiteren erheblichen Energie-Einsparungseffekt ergäbe.

Im Zuge der Fördermittelvergabe wurde dieser zuletzt angeführte Projektteil von der Förderung ausgeschlossen, darauf ist aber in der praxisorientierten Darstellung der Projektergebnisse grundsätzlich nicht verzichtbar (Kap. 4.4). Die Einsetzbarkeit der im geförderten Projektteil zu entwickelnden Stoffe steht nämlich grundsätzlich damit in Verbindung.

2.4 Beschreibung des Standes der Technik

Österreich verbraucht, wie oben schon erwähnt, etwa 400.000 Tonnen Bitumen jährlich. Schwankungen im Ausmaß von etwa 100.000 Tonnen von Jahr zu Jahr kommen vor, die künftigen Mengen werden rückläufig sein. Daraus werden derzeit etwa 8 bis 10 Millionen Tonnen Asphalt hergestellt, der vorwiegend im Straßenbau Verwendung findet. Der volkswirtschaftlich sehr bedeutungsvolle Straßenbau und die Straßenerhaltung sind daher vollständig auf das Importprodukt Erdöl angewiesen (siehe auch Kap.2.1). Die Entwicklung der Bitumenpreise (siehe Abbildung 2) in den letzten Jahren lässt erwarten, dass Bitumen weiterhin teurer werden wird, also nicht vom Weltmarkt-Rohölpreis entkoppelt ist. Es zeigt sich leider auch die Tendenz, dass mit der Preissteigerung nicht gleichzeitig eine Qualitätsverbesserung verbunden ist; das Gegenteil ist der Fall: Bitumen wird aus zwei Gründen (abhängig vom Qualitätsbewusstsein und der Marketingstrategie einer Raffinerie) eher schlechter: Durch Nutzung moderner Raffinerietechnologien gelingt es, aus dem Destillationsrückstand Bitumen wieder Kraftstoffe wie Benzin und Diesel (Ziel eines höheren Marktpreises) zu erzeugen, indem man die höhermolekularen Bitumenbestandteile im Visbreaker zu niedermolekularen Substanzen „aufbricht“. Dabei fällt der sogenannte Visbreaker-Rückstand an, ein weitgehend verkoktes, wenig klebendes Agglomerat, das in „nichtgecracktes“ (*engl. to crack = spalten*) Bitumen „entsorgt“ wird. Dabei wird die Qualität des an sich guten Basisbitumens erheblich verschlechtert. Asphaltsschichten, die mit derartigen minderwertigen Bitumenqualitäten hergestellt werden altern rasch, verhärten dabei stark und haben eine erheblich kürzere Lebensdauer [6] [7]. Vor allem Italien ist bekannt dafür, solche Minderqualitäten auf den Markt zu bringen und es gab vor etlichen Jahren eine massive Bewegung in der Europäischen Normung (EN), ausgehend von Finnland, die Bitumenqualität durch strengere EN-Vorgaben wieder besser abzusichern. Ein zweiter Grund für die Qualitätsreduktion bei Bitumen ist, dass die bitumenfähigen Rohöle immer rarer werden. Beispielsweise kann das besonders hochwertige Venezuela-Rohöl nur mehr von wenigen Raffinerien Europas eingesetzt werden, der Preis ist stark gestiegen.

Die derzeitige Antwort der Raffinerien auf das Sinken der Bitumenqualität ist der Vorschlag, durch die Zugabe von Kunststoffen, vorzugsweise von Elastomeren des Typs Styrol-Butadien-Kautschuk, die Qualität wieder anzuheben. Das sind petrochemisch erzeugte Produkte, die wiederum von den fossilen Ressourcen abhängig sind. Das Knappwerden der weltweiten Rohölvorräte ist absehbar, das zwangsweise bald erforderliche Umsteigen auf regenerative Energiequellen wird auch die verfügbaren Bitumenmengen reduzieren.

Asphalt wird vorwiegend im Heißverfahren verarbeitet, wie im Kap. 2.1 beschrieben wurde. Die Asphalttechnologie basiert daher derzeit aus Sicht der Energie- und Bindemittelbereitstellung ausschließlich auf fossilen Ressourcen.

Asphalt hat zudem (weltweit) einige erhebliche Nachteile.

- Die schwarze Farbe, verursacht durch das schwarze Bindemittel verleiht frisch verlegten Asphalt Schichten eine sehr schlechte Nachtsichtbarkeit, vor allem unter nassen Fahrbahnbedingungen, was ein erhebliches Sicherheitsrisiko für die Autofahrer darstellt. Schwarze Schichten erhitzen sich im Sommer durch die Sonneneinstrahlung erheblich stärker als hellfarbige Schichten, sodass die Verformbarkeit gefördert und die Verkehrssicherheit (durch Spurrinnenbildung) beeinträchtigt wird.
- Werden Asphalt Schichten im Sommer hergestellt, kommt es mitunter vor, dass infolge der sehr langsamen Abkühlgeschwindigkeit eine lange Verkehrssperre erforderlich wird (1 Tag und mehr). Denn Asphalt Schichten dürfen erst dann befahren werden, wenn die Schichten praktisch 1 Mal vollständig abgekühlt sind, ansonsten kommt es beim Befahren einer noch „herstellungswarmen“ Asphalt Schicht zur irreversiblen Verdrückung im Fahrspurbereich.
- Die hohe Mischguttemperatur führt zu Ausdünstungen von bitumeneigenen Ölen (Malten-Phase) und damit zur Emissionen von Dämpfen. Diese Dämpfe sind unangenehm für Anrainer und Baupersonal, es wird auch fortlaufend diskutiert, ob diese Dämpfe nicht sogar gesundheitsschädlich sein könnten.
- Die Arbeitsbedingungen auf Asphaltbaustellen sind für das Baupersonal hart. Die Strahlungswärme, die vom Mischgut und der verlegten Schichte ausgeht, belastet einerseits das Wohlbefinden und stellt andererseits ein erhebliches Verbrennungsrisiko dar. Eine Temperaturabsenkung unter 130 °C ist aus verdichtungstechnischen Gründen nicht zulässig. Es wurden deshalb in den letzten Jahren die Einbautemperatur absenkende Zusätze [8] für die Asphalttechnologie entwickelt, eine entscheidende Änderung ergibt sich aber daraus nicht. Wünschenswert wäre eine weitgehend kalte Einbautechnologie.

Neben Erdölbitumen wurde in der ersten Phase des Straßenbaus mit gebundenen Schotterschichten anstelle von Bitumen ein anderes Bindemittel verwendet, das Steinkohlenteerpech. Steinkohlenteere fallen bei der Kokserzeugung an, der in erster Linie für die Eisen- und Stahlindustrie als Energieträger und Reduktionsmittel für das Eisenerz gebraucht wird. In den Jahren von 1900 bis etwa 1980 wurden diese „carbostämmigen“ Bindemittel in vielen europäischen Ländern in stetig abnehmendem Ausmaß eingesetzt, deshalb ist auch der Begriff „Teerstraßen“ noch immer in Verwendung. Seit etwa 1990 ist der Teer als Straßenbaubindemittel jedoch in Europa nicht mehr zugelassen, da der Gehalt an Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs) im Teer erheblich ist und diese unter dem begründbaren Verdacht stehen, kanzerogen zu sein.

Aber auch Naturstoffe wurden und werden gemäß Stand der Technik als Bindemittel für Asphalt eingesetzt. In erster Linie sind das Rückstandspeche aus der Zellstoffproduktion

oder aus der technischen Fettverarbeitung (Tallpech, Stearinpech) sowie aus der Braunkohleverarbeitung (Erdpech, Montanwachse). Diese Stoffgruppen spielten in Kriegs- und Zwischenkriegszeit eine Rolle, als Erdöl für manche europäische Staaten schwer verfügbar war bzw. die Erdölverarbeitungstechnologie noch auf einem niedrigeren Stand war.

Heute gewinnen diese Stoffe wieder eine zunehmende Bedeutung und große internationale Konzerne bieten Bindemittel auf natürlicher Rohstoffbasis für Sonderzwecke im Asphaltbau an. Dabei geht es vor allem um hellfarbige transparente Bindemittel, welche die Herstellung eingefärbter oder naturgesteinsfarbiger Asphaltsschichten für gestalterische Zwecke (Gartenbau, Landschaftsbau, Siedlungsräume, Kunstobjekte etc.) ermöglichen. Aufgrund von Preis und Verfügbarkeit können derartige Produkte jedoch keinesfalls das Massenbindemittel Bitumen für den klassischen Asphaltstraßenbau ersetzen [9] [10] [11]. Die Preise liegen etwa 10-fach höher als die derzeitigen Bitumenpreise und die verfügbare natürliche Rohstoffmenge beträgt unter ein Hundertstel der Bitumenbedarfsmenge. Eine nennenswerte Substitution von Bitumen fossilen Ursprungs durch derartige Alternativen ist also keinesfalls realistisch.

Unter dem Aspekt der absehbar endlichen Reichweite des Erdöls und damit der abnehmenden Verfügbarkeit von Bitumen für den Asphaltstraßenbau spielen schon heute die vorbeugende Straßenerhaltung und Recycling von Ausbauasphalt eine zukunftsweisende Rolle [12]. Geht man schon heute verantwortungsvoll mit dem Bestand an Asphaltstraßen um, ist der Bedarf an vorzeitigen Reparaturmaßnahmen niedriger und die verfügbaren Ressourcen an Asphaltbindemitteln reichen länger als bei sorglosem Umgang. Daher sollten vorwiegend dünnsschichtige Asphaltsschichten zur vorbeugenden Erhaltung und Instandhaltung eingesetzt werden, um die Lebensdauer der darunter liegenden, dicken tragfähigen Asphaltpakete möglichst lange zu erhalten. Am Beispiel Österreichs kann man die Dimension des Materialbedarfes für das bundesweite hoch- bis niederrangige Straßennetz wie folgt abschätzen. Die Netzlänge beträgt etwa 200.000 km, davon entfallen etwa drei Viertel auf das niederrangige Netz der Gemeindestraßen und Güterwege. Geht man der Einfachheit halber von einer mittleren Straßenbreite von 5 Metern aus, so hat das österreichische Straßennetz eine Fläche von rund einer Milliarde Quadratmetern. Kalkuliert man mit einer mittleren Schichtdicke des gebundenen Schichtenaufbaus von nur 10 cm, was bei einer Asphalt-Dichte von 2.400 [kg/m³] einem Flächengewicht von 0,24 Tonnen je m² entspricht, sind in Österreich rund 240 Millionen Tonnen „Asphaltstraßenmasse“ vorhanden. Diese Schätzung ist eher sehr vorsichtig, da vor allem das höherrangige Netz aus erheblich dickeren Schichten von bis zu 30 cm besteht und auch breiter gebaut ist. Man kann daher durchaus mit 500 Millionen Tonnen Asphaltbestand in Österreich rechnen, der etwa 30 Millionen Tonnen Bitumen beinhaltet und in einer Bauzeit von rund 50 bis 60 Jahren entstanden ist. Diese Zahl ist realistisch und korreliert auch gut mit dem langjährigen Asphaltbedarf von rund 8 Millionen Tonnen pro Jahr ($8 \cdot 10^6 \cdot 50 = 4 \cdot 10^8 = 400$ Millionen Tonnen).

Müsste man 30 Millionen Tonnen Bitumen durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen und geht man von einer agrarwirksamen Fläche Österreichs von 60.000 km² aus (was in

Anbetracht der Bundesfläche von 84.000 km² annähernd der Realität entsprechen dürfte), so gilt: Je Hektar Agrarkultur kann man mit einem Jahreszuwachs von 10 Tonnen an Biomasse realistisch kalkulieren (siehe dazu auch Kap. 4.1). 60.000 km² entsprechen 6 Millionen Hektar und somit einer jährlichen Biomasse von 60 Millionen Tonnen. Das Biomasseäquivalent für den Bitumengehalt des österreichischen Asphaltbestandes kann die Natur also gewissermaßen innerhalb eines halben Jahres liefern. Um es in 50 Jahren zu liefern genügt es also, etwa 1 Prozent (berücksichtigt man den Wassergehalt, der in Pflanzen häufig hoch ist, steigt der Bedarf wahrscheinlich auf 2 bis 3 Prozent) von der jährlich nachwachsenden Biomasse „abzuzweigen“. Eine realistische Hoffnung, dass dies gelingen könnte, besteht also in der Tat. **Unter diesem Aspekt kann das Forschungsziel dieses Projektes als grundsätzlich machbar angesehen werden.**

Voraussetzung allerdings ist, dass die Biomasse nicht gleichzeitig auch für die Bereitstellung der Energie des derzeit von der Industriegesellschaft konsumierten Erdöls „herhalten“ muss. Denn aus einer Tonne Erdöl werden nur etwa 50 kg Bitumen gewonnen. Der Energieinhalt einer Tonne Erdöl beträgt aber 10 Millionen kcal oder 42.000 MJ. 1 Tonne trockene Biomasse, beispielsweise Holzpellets, haben einen Energieinhalt von rund 20 MJ. Energetisch gesehen müsste also 1 Tonne Erdöl durch rund 2 Tonnen Biomasse kompensiert werden. Das entspräche dann der 40-fachen Menge an Biomasse als es für die Bitumenkompensation erforderlich ist. Die Bedarfsmenge würde also von 1 – 3 % auf 40 - 120 % des Biomassezuwachses ansteigen. Das kann die Biomasse nicht erfüllen. Dazu ist sie für die Bereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie für den Erhalt der Biosphäre viel zu bedeutend.

Die Herausforderung für ein nachhaltiges Handeln der Menschen nach dem Erdölzeitalter wird also heißen: Den Energiehunger der zivilisierten Welt einerseits drastisch zu reduzieren und andererseits alle Möglichkeiten zur nachhaltigen Energiegewinnung auszuschöpfen, die nicht oder nur sehr maßvoll auf die Biomasse zurückgreift, etwa die direkte Nutzung der Solarenergie (solarthermisch und photovoltaisch), Windenergie, geothermale Energie und alle Formen der Wasserkraft (Fluss- und Meereskraftwerke).

2.5 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

Wäre im Hause des Antragstellers nicht eine etwa 2 Jahrzehnte lange Erfahrung mit dem Einsatz von Nawaros in bituminösen Bindemitteln vorhanden gewesen, wäre ein derart komplexes Forschungsthema mit dem deklarierten Ziel nicht in Angriff genommen worden. So aber konnte auf langjährige positive Erfahrungen mit Rapsasphalt zurückgegriffen werden, die ein grundsätzliches Potential einer Kombination von Naturstoffen mit Bitumen aufzeigten. Diese Erfahrungen sind als Vorarbeiten zum Thema aufzufassen. In [13] werden diese Erfahrungen zusammengefasst und die folgende Abbildung 3 veranschaulicht die Quintessenz des Potentials Nawaro-haltiger Bindemittel für Asphalt. Schutzschichten in Form einer Oberflächenbehandlung mit Rapsasphalt bewähren sich, ausgehend vor 20 Jahren von Österreich in mehreren europäischen Ländern wie Schweiz, Deutschland, Niederlande und Dänemark für die Straßenerhaltung. Sie bieten ein preisgünstiges Konzept

mit Kosten von etwa nur 10 Cent je m² und Nutzungsjahr bei einer Lebensdauer der Erhaltungsmaßnahme von bis zu 25 Jahren und darüber.

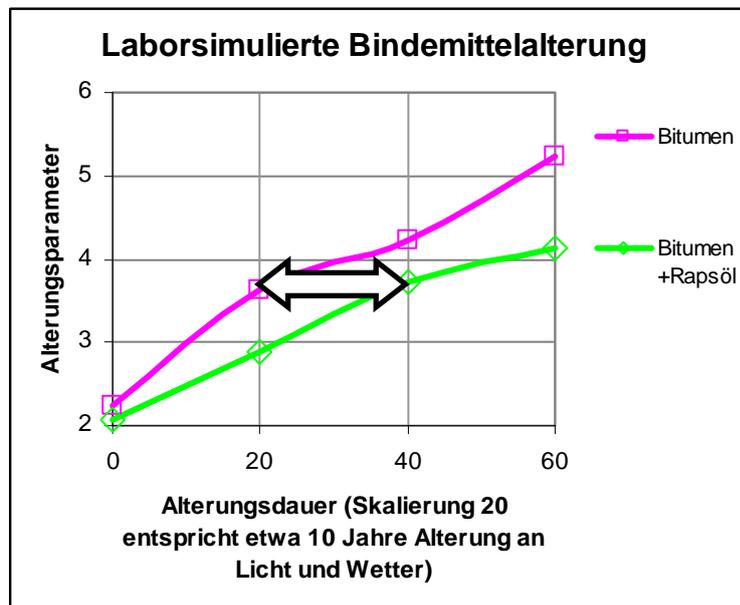


Abbildung 3: Verzögerung der Bitumenalterung durch Rapsölzusätze

Als eine weitere Vorarbeit zum Thema kann die Reaktivasphalt-Technologie angesehen werden. Mit ihr ist es möglich, in Kaltbauweise eine binnen etwa einer Stunde ausgehärtete und voll belastbare Asphaltschicht herzustellen [14]. Diese Technologie wurde vom Antragsteller vor etwa 15 Jahren entwickelt und hat europaweit den Reparaturbaustoff „Kaltmischgut“ revolutioniert. Sie wird mittlerweile auch auf anderen Kontinenten zunehmend eingesetzt, ist bisher jedoch ausschließlich ein Bauprodukt für die händische Verarbeitung für Reparaturzwecke. Reaktivasphaltbindemittel basieren zu etwa einem Drittel auf nachwachsenden Rohstoffen und zu zwei Drittel auf Bitumen.

Als unmittelbare Vorarbeit zum gegenständlichen Forschungsprojekt wurde vor der Beantragung zur Förderung im Labor des Antragstellers eine kleine Versuchsserie zum vollständigen Ersatz des Bitumens im Reaktivasphaltbindemittel durchgeführt. Damit sollte geklärt werden, ob der Bitumenersatz aus asphalttechnischer Sicht grundsätzlich möglich ist. Es konnte gezeigt werden [15], dass auf einer gut marktverfügbaren Nawarobasis auf einem Preisniveau von etwa 1 € je kg mit einem relativ einfachen Syntheseverfahren ein niedermolekulares Polymer hergestellt werden kann, das sich als vollständiger Bitumenersatz in einem Reaktivasphaltbindemittel eignete. Auf der Basis dieses Bindemittels wurden kleine Asphaltprobekörper kalt hergestellt (Abbildung 4), die auch einer Wasserlagerung standhielten und damit einen hoffnungsvollen Einstieg in dieses Projekt in Aussicht stellten.

Aufgrund dieser Vorarbeiten war es möglich, im Antragstadium Projektpartner zu finden und sie von der Ernsthaftigkeit und grundsätzlichen Machbarkeit zu überzeugen. Es konnte

dadurch auch das Interesse der Direktion Straßenbau und Verkehr vom Land OÖ sowie einer namhaften Prüfstelle geweckt werden und deren grundsätzliche Zustimmung zur Unterstützung des Vorhabens im Bedarfsfall eingeholt werden.



Abbildung 4: Asphaltprobekörper mit einem Nawaro-basierenden Polymer als Bindemittel

Ein weiterer Umstand veranlasste die Geschäftsführung des Antragstellers auf einem Gebiet forschungsaktiv zu werden, das für ein Unternehmen aus der KMU-Gruppe eigentlich zu komplex und insgesamt zu aufwändig erschien: Ein Consulting-Berater aus Norditalien, mit dem eine Kooperation zur Markteinführung von Rapsasphalt in der Provinz Mantua bestand, wies auf eine australische Firma hin, die angeblich Asphalt aus Zuckerrohrmelasse erfolgreich herstellen würde [11]. Zwar erwies sich diese angebliche australische Technologie zu einem späteren Zeitpunkt als nicht greifbar und das australische Unternehmen reagierte auch nicht auf Anfragen, es war aber ein nicht unwesentlicher Anstoß, sich mit der Thematik intensiver zu befassen.

2.6 Kurzbeschreibung des Aufbaues (Kapitel) des Endberichtes

Dieser Endbericht richtet sich in der Kapiteleinteilung weitgehend nach den Vorgaben der fördernden Organisation FdZ/FFG zur Berichtserstellung. Nach der Kurzfassung (Kap.1) wird in der Einleitung (Kap. 2) in das Gebiet der Straßenbautechnik mit Asphalt eingeführt und die Basis für das Verständnis des Forschungszieles für nicht unmittelbar auf diesem Gebiet der Technik Erfahrene zugrunde gelegt. Es wird die Motivation des Antragstellers dargelegt, warum er sich auf diesem Gebiet engagieren will und sich eine erfolgreiche Bearbeitung, basierend auf dem Stand der Technik und aufgrund geleisteter Vorarbeiten, vorstellen kann. Dazu wird auch auf Trends und Zahlenmaterial hingewiesen, welche zur Bearbeitung der Forschungsthematik motivieren und aufzeigen, dass eine Endlichkeit des bisherigen Standes der Technik schon heute absehbar ist. In Kap. 3 wird als Hintergrundinformation die eingeschlagene Vorgangsweise, nämlich eine Kombination aus schon vorliegendem Wissen,

laborchemischen Versuchsserien zur Synthese neuer Stoffe, die auf einer selektierten Palette von Naturstoffen mit hinreichend großer Verfügbarkeit basieren, erläutert und die Zusammenstellung des Kooperationskonsortiums begründet. In Kap. 4 wird über die Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung der Vermeidung neuheitsschädlicher Detailinformationen, die ggf. künftige Patentanmeldung zunichte machen würden, allgemein verständlich und umfassend berichtet. Dadurch sollen andere Forschungsgruppen angeregt werden, weitere Bausteine künftig zu liefern, um den Straßenbau der Zukunft auch im zu Ende gehenden Erdölzeitalter aufrecht zu erhalten. Die Ergebnisse werden in Beziehung zu den Forderungen der Programmlinie gesetzt (Kap. 5) und schließlich wird ein Ausblick auf einen möglichst sinnvollen Umgang mit den bisherigen Projektergebnissen gewährt und es wird auf noch fehlende Bausteine hingewiesen (Kap. 6 und 7). Die Literaturlisten und das Abbildungsverzeichnis runden diesen Bericht ab (Kap. 8) und im Anhang (Kap. 9) wird ein interessanter Kommentar zum Vergabewesen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit angeführt.

3 Hintergrundinformation zum Projektinhalt

3.1 Verwendete Methoden und Daten

Je nach Teilgebiet des Forschungsvorhabens wurden die Methoden und zur Verfügung stehenden Basisdaten an das jeweilige Gebiet angepasst.

Im Wirkungsbereich des Antragstellers wurden in dieser Forschungsarbeit Methoden verwendet, die in der Asphalt- und Bindemittelforschung üblich und bewährt sind. Es sind dies vorwiegend empirische Methoden wie Mischversuche mit Bindemittel- und Gesteinsproben, die dann wiederum einer empirischen Bewertung auf Funktionalität unterzogen werden. Prüftechnisch wurden rheologische Messungen an Bindemitteln mittels moderner DSR (Dynamic Shear Rheometer)-Messtechnik durchgeführt, die die Bewertung viskoelastischer Eigenschaften der Bindemittel über einen größeren Temperaturbereich zulassen. Durch vorangestellte Alterungsverfahren kann anhand von DSR-Messungen auch die Verschlechterung während der Gebrauchsdauer simuliert und auf die Dauerhaftigkeit geschlossen werden. Mit Wasserlagerungsversuchen wird die Affinität des Bindemittels zum Gestein bewertet. Die Prüfung der Druckfestigkeit von Asphaltprobekörpern in Prüfpressen lässt eine Festigkeitsbewertung zu. Dynamische Prüfungen an Asphaltprismen lassen Rückschlüsse auf das Ermüdungsverhalten des Baustoffes zu und zählen zum modernsten Stand der Technik eines GVO-Prüfmodells (Gebrauchsverhaltens-orientierte-Prüfung). Die Daten werden aus dem umfangreichen Normen- und RVS-Werk entnommen und lassen einen guten Vergleich mit dem Stand der Technik zu.

Im Wirkungsbereich des Projektpartners 1 wurden in erster Linie Labormethoden angewandt, wie sie im Bereich der organisch-chemischen Synthese üblich und bewährt sind. Sowohl typische Glaskolben-Synthesen bei Normaldruck als auch Autoklaven-Reaktionen wurden durchgeführt. Als Trennmethoden wurden Extraktionen, HPLC-Methoden, Gelpermeations-

chromatografie, Ionentauscherchromatographie und andere verwendet. Für analytische Zwecke wurden sowohl klassische Titrationsen, Dünnschichtchromatographie, IR-Spektroskopie, UV-VIS-Spektroskopie, ^1H -NMR-Spektroskopie, ^{31}P -NMR-Spektroskopie methodisch verwendet. Auch DSR-Messungen wurden zur Konsistenzfeststellung an den Syntheseprodukten durchgeführt. Präparative Synthesemethoden für die Herstellung von Nawaro-Derivaten im Technikumsmaßstab standen dem Institut entgegen dem ursprünglichen Plan leider nicht zur Verfügung, was zur Problematik der Verfügbarkeit nur stets kleiner Prüfprobenmengen führte, die für eine asphalttechnische Eignungsprüfung nur sehr eingeschränkt geeignet waren. Die verwendeten Daten umfassen das typische Datenmaterial wie sie für die analytische Bewertung im organisch-chemischen Laboratorium unverzichtbar sind, wie Spektrendatenbanken etc. Für die Literaturrecherchen standen entsprechende Literaturdatenbank-Programme zur Verfügung sowie der direkte Zugang zu Instituts- und Zentralbibliothek der TU.

Der Projektpartner 2 hatte die Aufgabe, das weltweite Angebot an nachwachsenden Rohstoffen zu sondieren und für das Projektziel aufzubereiten. Als ein dem Landwirtschaftsministerium zugeordnetes Forschungs- und Entwicklungsnetzwerk standen spezialisierte Fachbücher und Literaturdatenbanken zur Verfügung, sodass die Recherchearbeit auf wirtschaftliche und effiziente Weise abgewickelt werden konnte. Teilergebnisse davon werden in diesem Bericht im Kap. 4.1 dargestellt.

3.2 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten mit Quellenangabe

Die Vorgangsweise zur Abwicklung des Projektes war eine Kombination der Arbeitsergebnisse von 3 Partnern. Eine ausgelagerte Rohstoff-Recherche mit angehängtem Screening, durchgeführt von einem einschlägig erfahrenen Projektpartner aus dem Bereich eines landwirtschaftlichen Netzwerkes (siehe oben) sollte erheben, ob es überhaupt Rohstoffe gibt, die in ihrer Verfügbarkeit ausreichen, ein Bitumenersatzprodukt grundsätzlich zu ermöglichen. Wie sich zeigte, ist die Auswahl gar nicht so groß wie ursprünglich erwartet.

Für die Durchführung von chemischen Synthesen war von vornherein klar, dass das Laboratorium des Antragstellers für die Durchführung von chemischen Synthesen, noch dazu an bekanntermaßen als sehr schwierig zu bearbeitenden Naturstoffen, nicht ausgerüstet ist und auch nicht über die Material- und Personalressourcen für eine mehrjährige Forschungstätigkeit verfügt. Dieser Teil musste als Kern-Programmteil auf eine externe Forschungsstelle ausgelagert werden. Das Finden eines geeigneten Partners innerhalb Österreichs erwies sich als relativ schwierig. Es gibt wenige Forschungsinstitutionen, die sich mit Naturstoffen befassen. Einige Institute hatten keine Personalressourcen frei und mussten daher ablehnen. Letztendlich blieben 2 Universitätsinstitute übrig, die sich interessiert zeigten. Die Wahl fiel schließlich auf das Institut für Angewandte Synthesechemie der TU-Wien, das über ein gut ausgestattetes Syntheselabor und über umfangreiche analytische Möglichkeiten verfügt. Räumlich war es im ehemaligen FICHTE-Institut, dem „Forschungsinstitut für Chemie und Technologie von

Erdölprodukten“ untergebracht, was man als gutes Zeichen für die auf Bitumen bezogene Forschungsthematik interpretieren könnte. Im Forschungszeitraum übersiedelte das Institut dann in neue Laborräume im Institutsneubau, was den Projektfortschritt ein wenig verzögerte. Vom Charakter der beauftragten Forschung handelte es sich um eine typische Auftragsforschung, da das Thema nicht im typischen Forschungsgebiet des Institutes angesiedelt war. Universitätsinstitute dürfen keine Auftragsforschung mit dem Charakter einer „Lohnsynthese“ betreiben [16], es muss eine wissenschaftliche Thematik zugrunde liegen. Daher wurde die Arbeit im Rahmen ausbildungsbezogener wissenschaftlicher Arbeiten, vorrangig einer Dissertationsarbeit und einer oder mehrerer Diplomarbeiten abgewickelt. Ein Umstand, der gewissen Rahmenbedingungen genügen musste, die den Projektfortschritt naturgemäß etwas verzögerten. Die Dissertation konnte bis zum Ende des Projektzeitraums erfolgreich abgeschlossen werden [17]. Um weitere Maßnahmen in Hinblick auf Schutzrechte, wie Gebrauchsmuster- oder Patentanmeldungen nicht zu verhindern, ist die Dissertation auf Wunsch des Antragstellers für einen gewissen Zeitraum für den öffentlichen Zugang gesperrt. In 2 Diplomarbeiten wurden ebenfalls thematisch Teilaspekte des Forschungsthemas bearbeitet. Eine Diplomarbeit wurde aus privaten Gründen vorzeitig abgebrochen [18] eine weitere befindet sich noch in Arbeit [19].

Die asphalttechnischen Prüfungen der Syntheseprodukte erfolgten im Labor des Antragstellers. Durch diese Prüfungen wurde die grundsätzliche Eignung als Bitumensubstitutionsprodukt bewertet. Wie wichtig diese begleitenden Prüfungen, die außerhalb des geförderten Projektes abgewickelt werden mussten, waren, zeigte sich zum Beispiel durch eine Erkenntnis etwa in der Mitte des Projektzeitraumes, dass die bis dahin hergestellten Syntheseprodukte zwar recht günstige rheologische Eigenschaften aufwiesen, die notwendigen chemischen Eigenschaften, wie Hydrophobie und Öllöslichkeit sowie Haft- und Klebeverhalten am Gestein aber unzureichend waren. Es musste unverzüglich das Synthesekonzept geändert werden, um nicht am deklarierten Ziel „vorbeizuforschen“. Parallel zum ausgelagerten Syntheseprojekt wurde in der Entwicklungsabteilung des Antragstellers die kontinuierliche Weiterentwicklung des Reaktivasphaltprinzips betrieben und es wurden sehr interessante praxisrelevante Ergebnisse erzielt [20]. Diese könnten zu einem späteren Zeitpunkt auf Stoffe aus den Synthesen, wenn sie einmal in geeigneten größeren Mengen vorliegen, übertragen werden.

3.3 Beschreibung des Standes der Technik

Der Stand der Technik zu Bitumen und Asphalt in seiner derzeitigen Umsetzungsform wurde im Kapitel 2.4 unter Bezugnahme auf die Literatur umfassend dargestellt. Der Stand der Technik im direkten Bezug zu diesem Forschungsprojekt hingegen ist einerseits noch nicht stark ausgeprägt, andererseits aber schwer zugänglich. Der Grund dafür sind, wie in allen anderen Bereichen der Technik und Wissenschaft, die gegenwärtige Wirtschaftssituation und Geheimhaltungsinteressen. Massentechnologie ist stets erheblich preisgünstiger als zukünftige Technologie, deshalb hat sie kaum eine Chance wettbewerbsfähig zu sein, solange die gegenwärtige Massentechnologie noch verfügbar ist. Für das gegenständliche Projekt bedeutet dies: Solange Erdöl und damit auch der fossile Rohstoff Bitumen in

ausreichender Menge und zu einem weitgehend gewohnten Marktpreis verfügbar ist, wird ein Bitumenersatzprodukt auf nachwachsender Rohstoffbasis grundsätzlich teurer sein. In Zeiten angespannter stets zu knapp bemessener finanzieller Mittel für den Straßenbau und die Straßenerhaltung gilt bei öffentlichen Ausschreibungen formal zwar häufig das Bestbieterprinzip, de facto erfolgt die Vergabe aber zumeist nach dem Billigstbieterprinzip. Zwar gibt es auf EU-Ebene schon Konzeptpapiere für eine nachhaltige Beschaffung [21], in der gelebten Baupraxis wird aber stets jene Unternehmung, die für ein ausgeschriebenes Objekt den billigsten Preis abgibt, den Auftrag erhalten.

Der Stand der Technik „blüht daher im Verborgenen“, sprichwörtlich in den Tresoren der großen Konzerne. Mit etwas Glück lassen sich frei zugängliche wissenschaftliche Arbeiten von Forschern finden, die zu einem Thema experimentelle Erfahrungen gesammelt haben und diese öffentlich zugänglich machen. Auch die Patentliteratur ist eine frei zugängliche Quelle, aber daraus verwertbares Wissen heraus zu extrahieren ist fast so zeitaufwändig wie eigenständig durchgeführte experimentelle Studien. Auf den Punkt gebracht heißt das, es gibt zum gegenständlichen Forschungsthema „Bitumenersatzprodukte auf nachwachsender Rohstoffbasis mit hinlänglicher Verfügbarkeit“ praktisch keinen wirklich hilfreichen Stand der Technik!

3.4 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Zustand

Es konnte gezeigt werden, dass es auf Nawaro-Basis möglich ist, Bitumenersatzstoffe herzustellen, die den Anforderungen im Asphaltstraßenbau genügen. Zum Zeitpunkt des Projektzeitraumes liegen zwar keine ausreichend großen Mengen der neuen Syntheseprodukte vor um an eine umfassende praktische Erprobung dieser Stoffe denken zu können. Es konnte aber in einem Ergänzungsprojekt durch teilweises Ersetzen des Bitumens in kalteinbaufähigen Asphaltrezepturen im Ausmaß von über 50 % nachgewiesen werden, dass der Einsatz im technischen Maßstab erfolgreich und überzeugend möglich ist. Es wurde eine Versuchsfläche auf einer Ortsstraße mit typischem regionalen Verkehrsaufkommen von mehreren hundert Meter Länge über die gesamte Straßenbreite angelegt, deren Unterlage von einem starken Netzrissbild geprägt war. Selbst nach einer Winterperiode schlagen die Risse nicht durch den Versuchsdeckschichtbelag durch und lassen schon jetzt auf eine zufrieden stellende Lebensdauer schließen. Bisher konnten derartige Deckschichten nur in der Heißasphalt-Technologie hergestellt werden. Gegenüber dem Ist-Zustand ein klarer Vorteil, wenn in Hinkunft solche Schichten bald mit einer Kaltbauweise erzeugt werden können, die sich in ihrer Vielseitigkeit deutlich von den bisher bekannten Kaltbauweisen „Dünnschichtdecken“ und „Oberflächenbehandlungen“ abhebt. Es kann davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit auch Tragschichten oder neuartige hochleistungsfähige Deckschichten für höchste Verkehrsbeanspruchung technisch möglich sind. Die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit wird aber erst dann gegeben sein, wenn sich die Bitumenpreise bei zunehmender Verknappung dieses fossilen Rohstoffes weiter erhöhen und die Herstellung der Syntheseprodukte durch Entwicklung und Optimierung der Produktionsprozesse preisgünstig genug und mengenmäßig adäquat

verfügbar sind. Das wird noch einige Zeit dauern und das Engagement großtechnischer Unternehmen erfordern.

4 Ergebnisse des Projektes

4.1 Ergebnisse der Vorstudie zur Rohstoffauswahl

Diese Vorstudie wurde unmittelbar bei Projektstart durch den Projektpartner 2 in den Monaten Jänner bis März 2009 durchgeführt. Mit dieser Studie wurde das einschlägig erfahrene Institut C.A.R.M.E.N. eV (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs (neu Energie)-Netzwerk) in Straubing/Bayern beauftragt, das dem Antragsteller durch die Kooperation bei der Markteinführung des Rapsasphaltes (siehe Kap. 2.2) bekannt war. Sie wurde von Frau Dr. Bettina Schmidt und Frau Dipl.-Wirtschaftsing. (FH) Sabine Haselbeck [22] in Form einer umfangreichen 42-seitigen EXCEL-Tabelle erstellt, die im folgenden Text in komprimierter Form wiedergegeben wird.

Folgende Vorgaben wurden für die Rohstofftabelle zugrunde gelegt. Es sollten im Wesentlichen nur Pflanzen berücksichtigt werden, deren weltweite Produktion (Hauptprodukt) > 300.000 Jahrestonnen beträgt. Das sind vor allem Öl-, Stärke-, Zucker- und Faserpflanzen. Ausnahmen (< 300.000 t) finden sich unter "Sonstige Rohstoffpflanzen, Reststoffe". Diese wurden meist wegen des starken aktuellen Interesses an ihnen gewählt. Nicht berücksichtigt wurden in der Regel: Obst- und Gemüsepflanzen (es sei denn, es werden auch andere Teile der Pflanze genutzt), Heil- und Gewürzpflanzen, reine Futterpflanzen, tierische Reststoffe/Abfälle, z. B. Schlachtabfälle aufgrund hygienischer Gründe (Ausnahme: Schalen von Krustentieren).

Die Erträge, entnommen aus Literatur [6] oder [2] (Weltdurchschnitt: Mittelwert aus den Erträgen 2003-2007) können einen Anhaltspunkt der Größenordnung geben, schwanken naturgemäß aber erheblich von Jahr zu Jahr. Die Literaturangabe bezieht sich hier ausnahmsweise nicht auf den Literaturanhang Kap. 8, sondern auf die folgende Auflistung und wird daher in *kursiver Schrift* angegeben, um die Geschlossenheit des Gesamtberichtes nicht unübersichtlich zu machen und die Literaturbezüge innerhalb der Rohstoffauswahl-Studie nicht zu zerstören.

Literaturliste zur C.A.R.M.E.N.-Studie:

- [1] Zobelein, H. (Hrsg.): *Dictionary of Renewable Resources*. 2. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2001
- [2] FAO: *FAOSTAT ProdSTAT Crops*: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>
- [3] Bickel-Sandkötter, S.: *Nutzpflanzen und ihre Inhaltsstoffe*. Quelle und Meyer, Wiebelsheim, 2001
- [4] Schütt, P.: *Weltwirtschaftspflanzen*. Paul Parey, Berlin, 1972
- [5] Falbe, J.; Regitz, M. (Hrsg.): *Römpp Chemie Lexikon*. Thieme, Stuttgart, 1989-1992
- [6] Heyland, K.-U.: *Spezieller Pflanzenbau*. 7. Auflage, Ulmer, Stuttgart, 1996
- [7] www.miscanthus.de
- [8] Teixeira, M. A.: *Babassu - a new approach for an ancient Brazilian biomass*. *Biomass & Bioenergy*, 32 (9), 2008, S. 857-864.
- [9] www.chemie-online.de

- [10] Becker, K.: *Jatropha curcas als Energiepflanze*. In: *BBE-Fachkongress Kraftstoffe der Zukunft 2008*, 01.-02.12.2008, Berlin.
- [11] Üllenberg, A.: *Jatropha in Madagaskar - Sachstandsbericht*. GTZ, 2008.
- [12] Chisti, Y.: *Microalgae for sustainable production of fuels and chemicals*. In: *biorefinica 2009*, 27.-28.01.2009, Osnabrück.
- [13] FAO (Hrsg.): *Yearbook forest products 2002-2006*. <http://www.fao.org/docrep/010/i0090m/i0090m00.htm>
- [14] www.zuckerforschung.at
- [15] FAO (Hrsg.): *Minor oil crops*. <http://www.fao.org/docrep/x5043e/x5043e04.htm>

Die Studie beinhaltet folgende Aspekte zu jedem angeführten Nawaro (Rohstoffpflanze), und wird im folgenden Text am Beispiel „Gerste“ veranschaulicht:

- Hauptsächlich genutzte Pflanzenteile und deren Rohstoffe: Körner
- Inhaltsstoffe dieser Pflanzenteile/Rohstoffe (Eigenschaften) ^{[1] [3] [4] [5] [10] [11] [15]} : Körner getrocknet: 13 % Wasser, 61-73 % Kohlenhydrate, 10 % Protein, bis 2,3 % Fett, 2,3 % Mineralstoffe
- Nebenprodukte und Reststoffe ^{[1] [3] [4]}: Stroh, Spelzen (Grützeherstellung), Treber und andere Reststoffe (Bierherstellung)
- Inhaltsstoffe der Nebenprodukte/Reststoffe (Eigenschaften) ^{[1] [3] [4] [5] [10]}: Stroh: 30-45 % Cellulose, Rest: Lignin, Pektine, Pentosen, Hexosen
- Verarbeitung ^{[1] [3] [4] [5] [15]}: Graupen, Gries, Grütze: Trockenmahlen/Schmirceln, Bier: Körner in Wasser vorquellen, auskeimen → trocknen (Darren) → Malz → einmaischen mit lauwarmem Wasser → Abtrennen vom Treber → Zusatz von Hopfen, aufkochen, abkühlen, Zusatz von Hefe → Gärung → Filtration
- Anwendungen (Pflanzenteile, Rohstoffe, Nebenprodukte, Reststoffe) ^{[1] [3] [4] [5] [10] [11] [15]} : Körner: Futtermittel, Malz (10 %), Nahrungsmittel, Stroh: Dünger, Tiereinstreu, Brennstoff, Papier, BtL-Technologie, Spelzen: Dünger, Biogas, Füllstoff
- Hauptproduktionsländer ^{[2] [13] [15]} : Russland, Spanien, Kanada, Deutschland, Frankreich, Türkei, Ukraine, Australien (gemäßigtes Klima)
- Produktionsmengen weltweit / EU (Jahr), Erträge, Ausbeuten ^{[1] [2] [4] [6] [7] [9] [11-15]}: Körner (2007): 136 Mio t / 58,5 Mio t, Körner: 30-75 dt/ha (Sommergerste), 45-90 dt/ha (Wintergerste), Stroh: 30-60 dt/ha (Sommergerste), 50-90 dt/ha (Wintergerste)
(Anmerkung: dt = dezi - Tonne = 100 kg)
- Bemerkungen: keine
- Bezugsquellen: auf Anfrage

Unter Angabe dieses komplexen Datensatzes werden in der Studie insgesamt 58 weltweit nachwachsende Rohstoffgruppen angeführt. Somit ist eine sehr gute Orientierung möglich, auf welchen Nawaros man ein Bitumenersatzprodukt wirtschaftlich und technologisch aufbauen könnte. Diese Tabelle beinhaltet auch einige Stoffgruppen, die in technologischen Verarbeitungsprozessen anfallen, wie z.B. Bioraffinerien, Ethanolherstellung, und sind mit ** gekennzeichnet, weil deren Mengen derzeit noch schwer bewertet werden können, daher mit Null angegeben werden, aber ein erhebliches Zukunftspotential besitzen.

Die folgende tabellarische Übersicht bietet einen Einblick in den Inhalt dieser Rohstoffauswahl-Studie, ist aber nur ein kleiner Auszug aus dem Gesamtwerk.

Tabelle Nawaro für Diagramm
(Mit ** gekennzeichnete Nawaros sind in Menge derzeit nicht bewertbar)

engl. Bezeichnung	Nachwachsende Rohstoff-Sorte	Welt [Mio t]	Europa [Mio t]
(hard and soft wood)	Laub- und Nadelhölzer	3540	669
(sugar cane)	Zuckerrohr	1560	0,065
(maize)	Mais	785	51
(rice)	Reis	652	2,68
(wheat)	Weizen	607	121
(potatoe)	Kartoffeln	322	62
(sugar beet)	Zuckerrübe	248	113
(manioc)	Maniok, Cassava (Tapioka)	228	0
(soybean)	Sojabohnen	216	0,803
	Bedarf Bitumenersatzstoffe	200	16
(oil palm)	Ölpalme	192	0
(barley)	Gerste	136	58,5
(sweet potatoe)	Süßkartoffel	126	0,079
(banana)	Banane	81,3	0
(cotton)	Baumwolle	72,5	6,33
(vine)	Weinreben	66,3	26,7
(sorghum)	Sorghum-Hirsens (Mohren-, Zuckerh., Sudangras)	64,6	0,562
(coconut palm)	Kokospalme	54,7	3,16
(yam)	Yam(s)	52,9	0
(rapeseed)	Raps	49,5	18,3
(peanut, groundnut)	Erdnuss	35,9	0,01
(plantain)	Kochbanane	34,4	0
(common millet)	Rispenhirse, Echte Hirse	32,9	0,024
(sunflower)	Sonnenblumen	27	4,85
(oat)	Hafer	26	9,01
(olive tree)	Olivenbaum	17,5	3,11
(rye)	Roggen	15,7	8,3
(rubber tree)	Kautschukbaum	10	0
(chick pea)	Kichererbse	9,31	0,042
(coffee)	Kaffee	7,74	0
(broad beans, horse beans)	Ackerbohnen, Dicke B., Saub.	4,9	0,617
(cocoa tree)	Kakaobaum	4	0
(angola pea, pidgeon pea)	Angola-Erbse	3,43	0
(avocado tree)	Avocado-Baum	3,4	0,104
(sesame)	Sesam	3,38	0,001
(jute)	Jute, Kalkuttahanf	3,22	0
(cashew tree)	Cashewbaum, Kaschubaum	3,19	0
(buckwheat)	Buchweizen	2,47	0,236
(almond tree)	Mandelbaum	2,07	0,286
(linseed)	Öllein	1,88	0,112
(babassu palm)	Babassu-Palme	1,6	0
(castor, ricinus tree)	Ricinus-, Wunderbaum	1,21	0
(flax)	Flachs, Faserlein	0,974	0,146
(hazel)	Haselnuss	0,777	0,161
(shea butter trea)	Karitébaum, Sheanussbaum	0,685	0
(safflower)	Safflor, Färberdistel	0,536	0,0003
(tung oil tree)	Tungölbaum, Holzölbaum	0,456	0
(mustard)	Senf	0,417	0,032
(jatropha)	Jatropha-Strauch, Purgiernuss	0,374	0
(silk cotton tree)	Kapokbaum, Wollbaum	0,331	0
(sisal)	Sisalagave	0,33	0
(shells crab, shrimp, prawn..)	Krustentierschalen (Mehresfrüchte-Industrie)	0,005	0
(kenaf)	Kenaf, Ambari	0	0
(algae)	Algen **	0	0
(china grass, elephant grass)	Chinaschilf, Elefantengras, Miscanthus **	0	0,45
(residual biomass)	Restbiomasse, diverse (z. B. Restholz, Stroh, Bioabfälle etc.) **	0	0
(residues from biorefinery processes)	Reststoffe aus Bioraffinerieprozessen **	0	0
(residues from ethanol production)	Reststoffe aus der Ethanolherstellung **	0	0
(short rotation forest crops)	Schnellwachsende Baumarten (z. B. Pappeln, Weiden) **	0	0
(topinambur)	Topinambur, Erdbirne **	0	0

Abbildung 5: Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe



Abbildung 6: Diagramm-Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe, Skalierung 4 Milliarden Tonnen

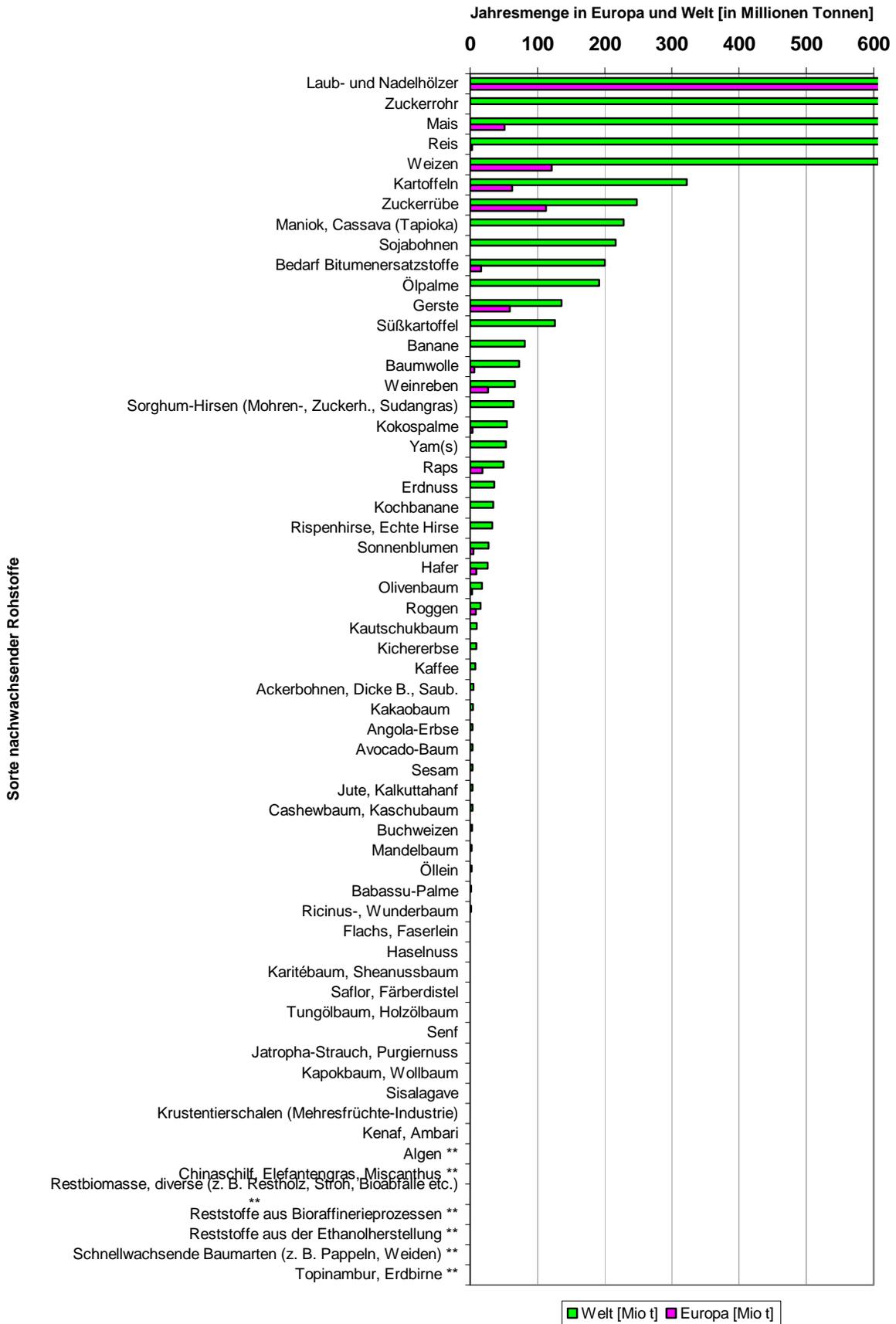


Abbildung 7: Diagramm-Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe, Skalierung 600 Millionen Tonnen

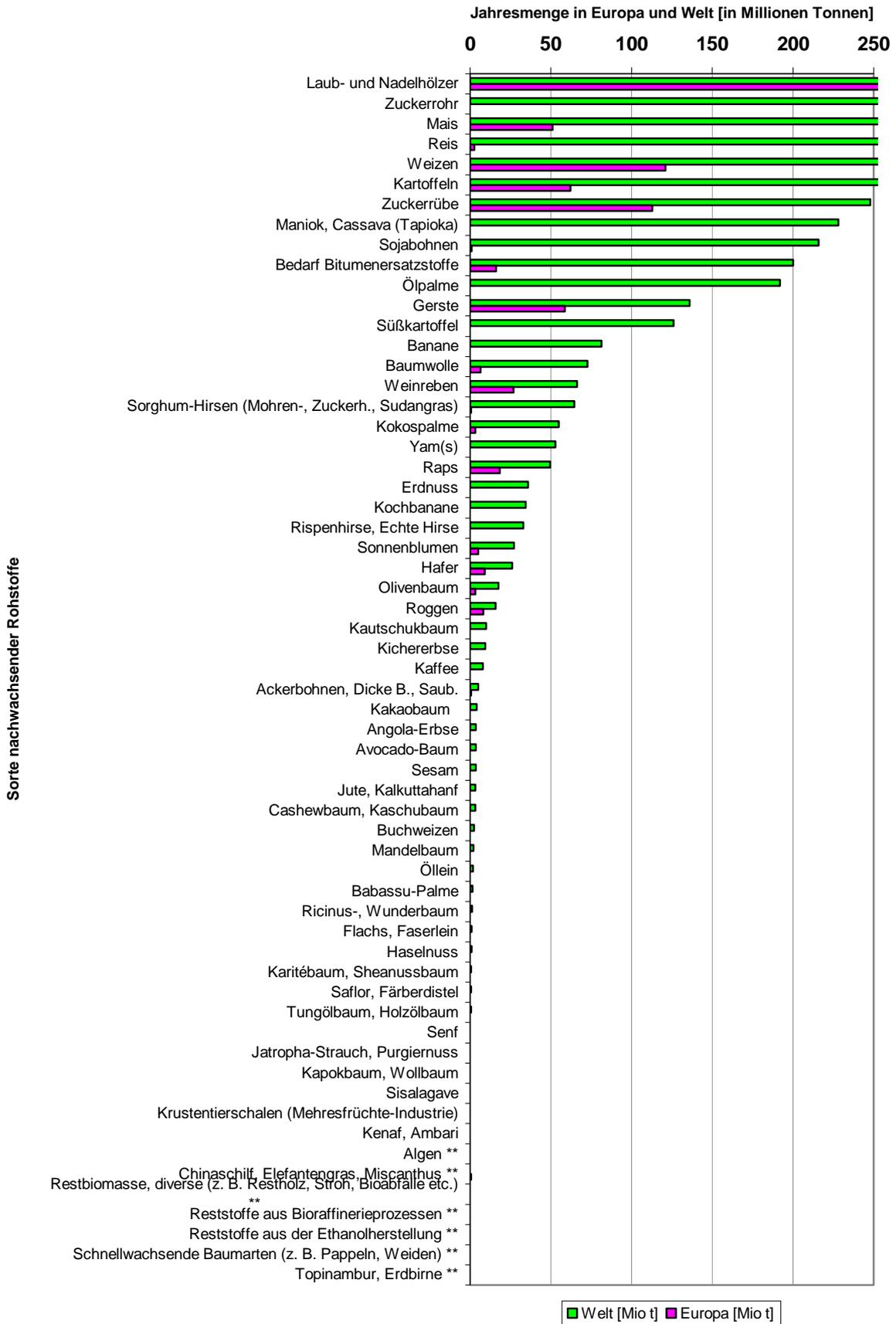


Abbildung 8: Diagramm-Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe, Skalierung 250 Millionen Tonnen

Um die Größenordnung des Materialbedarfs für ein Bitumenersatzprodukt mit den verfügbaren Nawaro-Mengen in der Tabelle und den Diagrammen (Abbildungen 5 bis 8) besser vergleichen zu können, enthält die Auflistung der Stoffe auch eine Zeile für „Bedarf Bitumenersatzstoffe“ und wird, wie in Kap. 2.2 beschrieben, mit 200 Millionen Tonnen (Weltbedarf jährlich) und 16 Millionen Tonnen (Europabedarf jährlich) angegeben [23]. Die Wiedergabe von 3 unterschiedlichen Diagramm-Skalierungen ist erforderlich, um auch die in kleineren Mengen vorkommenden Nawaros anschaulich einschätzen zu können. Zur besseren Übersicht werden die Rohstoffe in Tabelle und Diagrammen nach den Mengen abfallend sortiert.

Es zeigt sich, dass nur 9 Nawaro-Quellen ein ausreichendes Potential bieten können: Davon sind Sojabohnen, Maniok, Zuckerrüben, Kartoffel, Weizen, Reis, Mais die weltweit bedeutendsten Nahrung- und Futtermittel, scheiden also bis auf die Möglichkeit, deren Reststoffpotential zu nutzen für Zwecke des Bitumenersatzstoffes aus. Zuckerrohr wird als zweithäufigste Nawaro-Quelle schon im großen Stil für die Bioethanolgewinnung genutzt (z.B. Brasilien) und zeigt die Gefahr großer Monokulturen für die Biosphäre dramatisch auf. Als Bitumenersatzstoff könnten sich davon sehr wohl die Pflanzenrestmassen eignen, siehe dazu auch die australischen Bemühungen [11].

Als wirklich in großen Mengen vorhanden und daher als die am sinnvollsten nutzbare Quelle muss jedoch Holz angesehen werden. Mit 3,54 Milliarden Tonnen jährlich nachwachsender Biomasse, zusätzlich ergänzbar um Stroh und sonstige Pflanzenrestmassen aus der Futter- und Nahrungsmittelproduktion, verfügt man über einen nennenswerten Vorrat an Stoffen für die Synthese von Bitumenersatzstoffen.

Weltweit ist die Gesamtbiomasse-Ernte gemäß Tabelle in Abbildung 5 rund 9,5 Milliarden Tonnen, in Europa rund 1,2 Milliarden Tonnen. Der Holzanteil ist in Europa mit 57 % deutlich größer als in der Welt mit 37 %.

Der Europaanteil an der gesamten Welternte liegt bei 12 %, bei Holz bei 19 %.

Bemerkenswert ähnlich ist die jährliche Holzernte dem jährlichen Erdölkonsum, der in [5] mit etwa 4 Milliarden Tonnen angegeben wird. Das würde bedeuten, dass derzeit etwas mehr Erdöl gefördert als nachwachsende Holz-Biomasse geerntet wird, nämlich um rund 16 % mehr (auf Erdöl als Basis bezogen).

Bei 49 Millionen km² landwirtschaftliche genutzter Fläche, zuzüglich 40 Millionen km² Waldfläche weltweit (Abbildung 9) [24] beträgt die Flächensumme, auf der Land-Biomasse wachsen kann, also 89 Millionen km². Setzt man die oben angeführten 9,5 Milliarden Tonnen für die Biomasse-Ernte ein, ist der flächenbezogene Ernteertrag etwa $9,5 \cdot 10^9 \text{ t} / 8,9 \cdot 10^9 \text{ ha} =$ rund 1,1 Tonnen pro Hektar. Dieser Wert erscheint in Anbetracht der Erfahrung, dass beispielsweise der jährliche Zuwachs an Wald in Österreich rund 4 t pro Hektar beträgt und davon etwa 3 t tatsächlich geerntet werden oder dass auf einem Rapsfeld etwa 4 t Rapsfrucht und rund 16 t Stängel, also fast 20 t Biomasse geerntet werden können, relativ niedrig. Da muss berücksichtigt werden, dass bei den Ernten gemäß Abbildung 5 nur die Hauptprodukte mengenmäßig erfasst werden, also hauptsächlich die Körner, nicht aber das Stroh, dessen Menge häufig ein Vielfaches beträgt. Allerdings ist auch zu beachten, dass die

Pflanzenrestmassen einen hohen Wassergehalt haben, der für eine stoffliche Nutzung kein Potential hat.

Flächenanteile	Quadratkilometer	Prozentanteil	Küsten-Kilometer
Erde gesamt	510.000.000	100	
Wasserfläche	360.570.000	70,7	
Landfläche	149.430.000	29,3	
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	48.827.330	9,6	
Waldfläche	40.204.320	7,9	
Asien (ohne Polarinseln)	44.400.000	31	57.000
Amerika (ohne Polargebiete)	38.300.000	27	64.500
Afrika	29.300.000	20	26.000
Antarktika	13.200.000	9	
Europa (ohne Island, Nowaja Semlja, atlantische Inseln)	9.900.000	7	31.460
Australien (mit Tasmanien)	7.700.000	5	34.000

Abbildung 9: Globale Flächenverhältnisse – Quelle: Wikipedia

Als Resümee kann aus dieser landwirtschaftlichen Studie abgeleitet werden, dass zwar genug nachwachsende Rohstoffe als Potential für einen globalen Bitumenersatzstoff vorhanden sind, dass man aber keinesfalls seltene hoch spezialisierte Pflanzen zur Auswahl hat, die ganz besonders günstige Ausgangseigenschaften für chemische Synthesen aufweisen. Selbst die große Gruppe der Ölsaaten würde nicht ausreichen, da sie durch die traditionellen Anwendungen schon „ausgelastet“ sind und ein erheblicher Mengenzuwachs unrealistisch ist. Es bleibt also nur 1 Stoffgruppe übrig: Jene der holzartigen Pflanzen, wie Holz und Stroh. Sie enthalten neben Cellulose als Hauptkomponente noch Hemicellulosen und Lignin in relativ großen Anteilen. Diesem Umstand Rechnung tragend, wurde beschlossen, die Synthese von Bitumenersatzstoffen auf dieser großen Naturstoffgruppe aufzubauen.

4.1.1 Die Chemie der Rohstoffbasis für Bitumenersatzstoffe

Holz

Holz besteht aus 30-50% Cellulose, 20-40% Hemicellulosen und 20-30% Lignin. Das Holz besitzt noch Nebenbestandteile wie Harze und Terpene, Phenole, Gerbstoffe, Wachse, Fette, Eiweiße, Mineralstoffe usw., die allgemein als Extraktstoffe bezeichnet werden. Die Hauptbestandteile erfüllen im Holz hauptsächlich strukturunterstützende Aufgaben. So

verleiht Cellulose dem Holz aufgrund ihrer linearen Struktur die Zugfestigkeit, das Lignin aufgrund der dreidimensionalen Struktur die Druckfestigkeit und die Hemicellulose aufgrund ihrer stark verzweigten Struktur den Widerstand bei plötzlicher Belastung. Die Hemicellulosen dienen weiterhin als Reservestoffe und steuern aufgrund der Quelleigenschaften die Durchlässigkeit der Holzmembran.

Der Anteil an Haupt- und Nebenbestandteilen ist stark von der Holzart abhängig (Abbildung 10).

Holzart	Cellulose [%]	Hemicellulose [%]	Lignin [%]	Extraktstoffe [%]
Birke	46	36	19	2
Buche	45	35	18	4
Eiche	46	24	23	7
Fichte	43	27	28	2

Abbildung 10: Tabelle zur Zusammensetzung einiger Holzarten

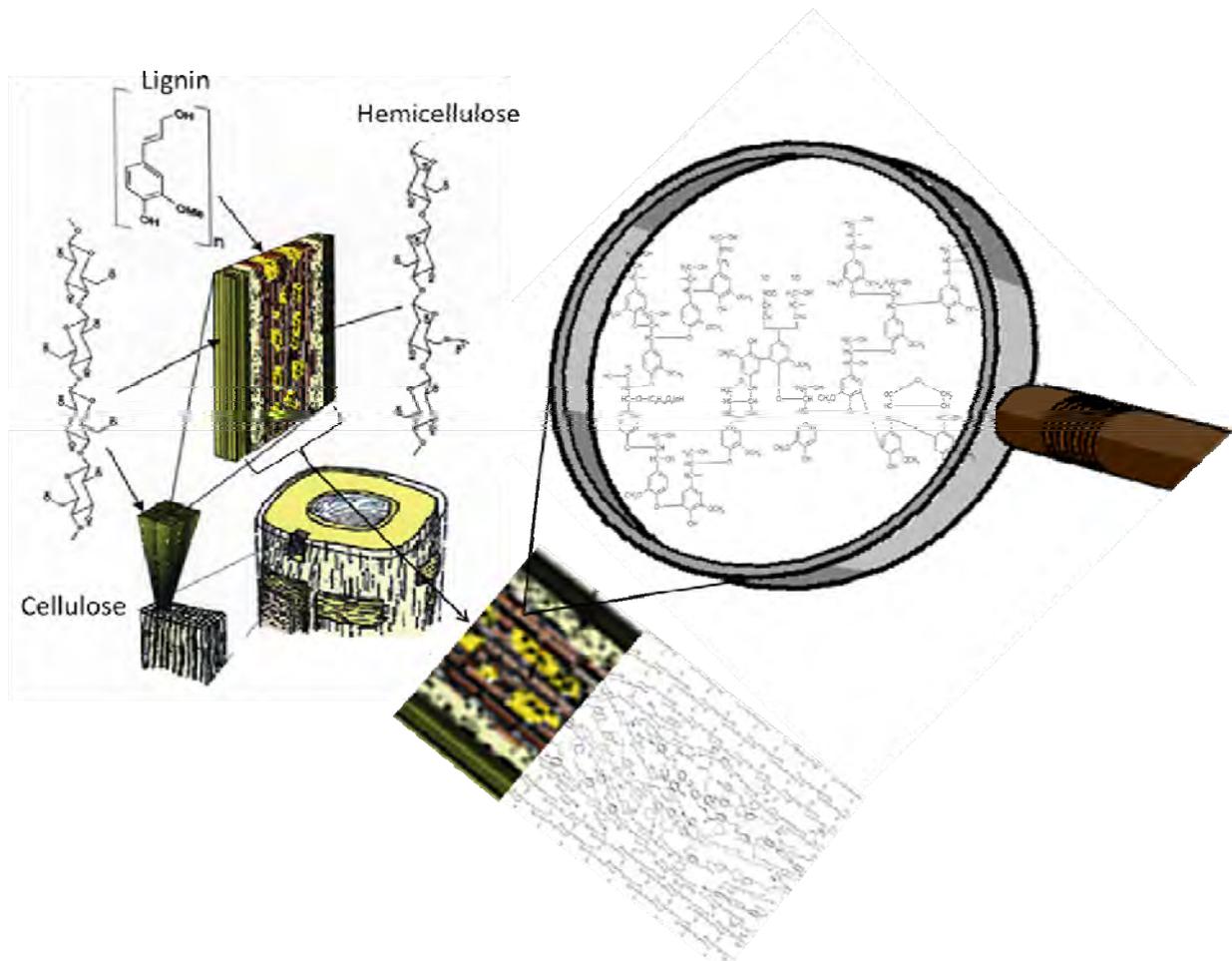


Abbildung 11: Struktureller Aufbau von holzartigen Pflanzen

Lignin

Obwohl der Begriff Lignin aus dem Lateinischen abgeleitet (*lignum*) Holz bedeutet, ist dessen Vorkommen nicht nur auf Holzpflanzen beschränkt. Es existiert ebenfalls in Gräsern, Moosen, Biomasse sowie sämtlichen Einjahrespflanzen (Stroh). Lignin ist ein hochmolekularer, aromatischer Stoff, der in verholzenden Pflanzen die Räume zwischen den Zellmembranen ausfüllt. Er verleiht der Zellwand Druckfestigkeit und ist meist in Wänden von verholzten Pflanzenzellen mit Stütz- und Festigungsfunktion vorhanden. Lignin dient somit in der Mittellamelle als Kittmaterial für den Zellverbund und schützt die Zellen gegen Eindringen von Wasser, gegenüber UV-Licht, mikrobiologischem Angriff sowie mechanischer Beschädigung [25] [26].

Nach Cellulose ist Lignin der mengenmäßig häufigste polymere organische Naturstoff und wird in der Natur durch enzymatisch katalysierte Dehydrierung synthetisiert. Es ist chemisch betrachtet als höhermolekularer Abkömmling des Phenylpropans aufzufassen. Prinzipiell unterscheidet man zwischen stark verzweigtem und linearem Lignin. Die genaue Ligninstruktur ist nicht bekannt, da eine Isolierung aus dem Holzverbund ohne Veränderung der Struktur nicht möglich ist. Das komplexe Makromolekül wird aus drei verschiedenen Ligningrundbausteinen (Abbildung 12) gebildet: p-Cumarylalkohol, Coniferylalkohol und Sinapylalkohol. Im Falle der beiden letzten Bausteine spricht man in der Literatur auch oft von Guajacyl- und Syringyleinheiten, die sich von den entsprechenden Benzaldehyden ableiten.

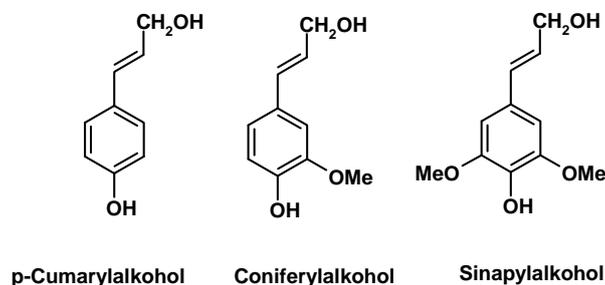
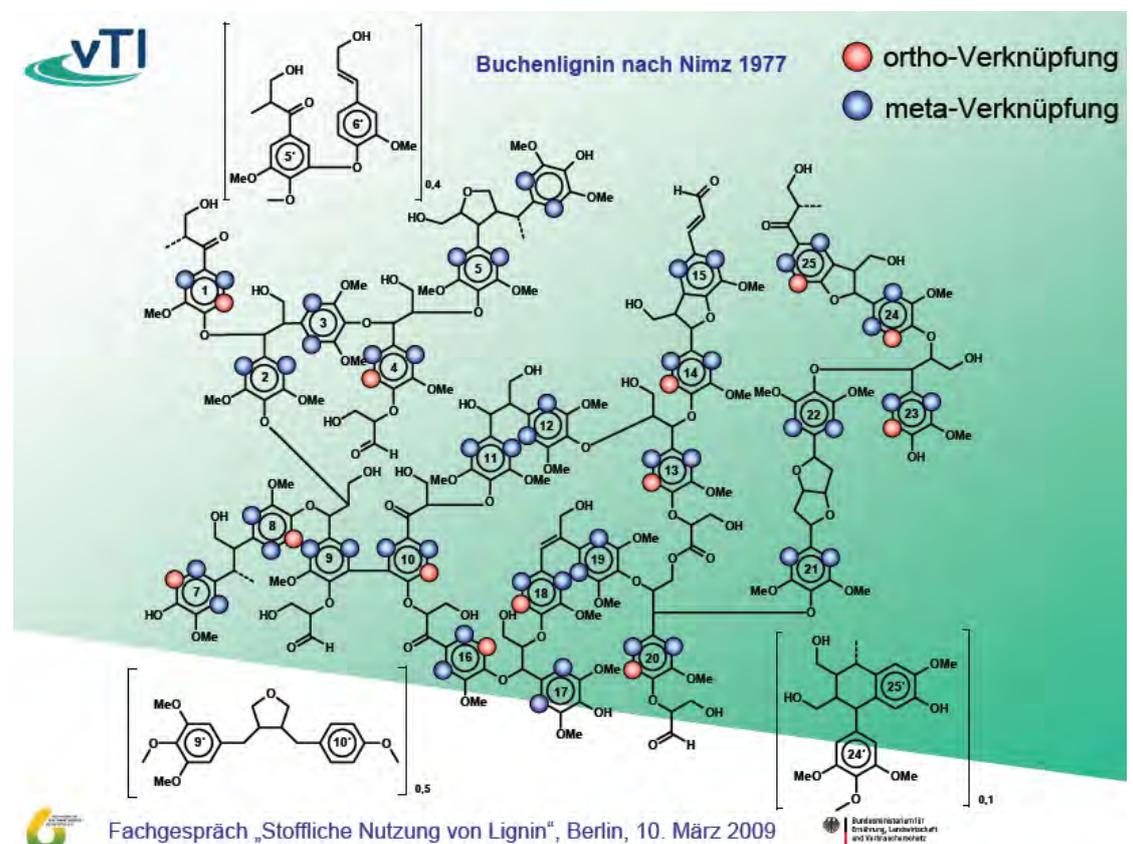
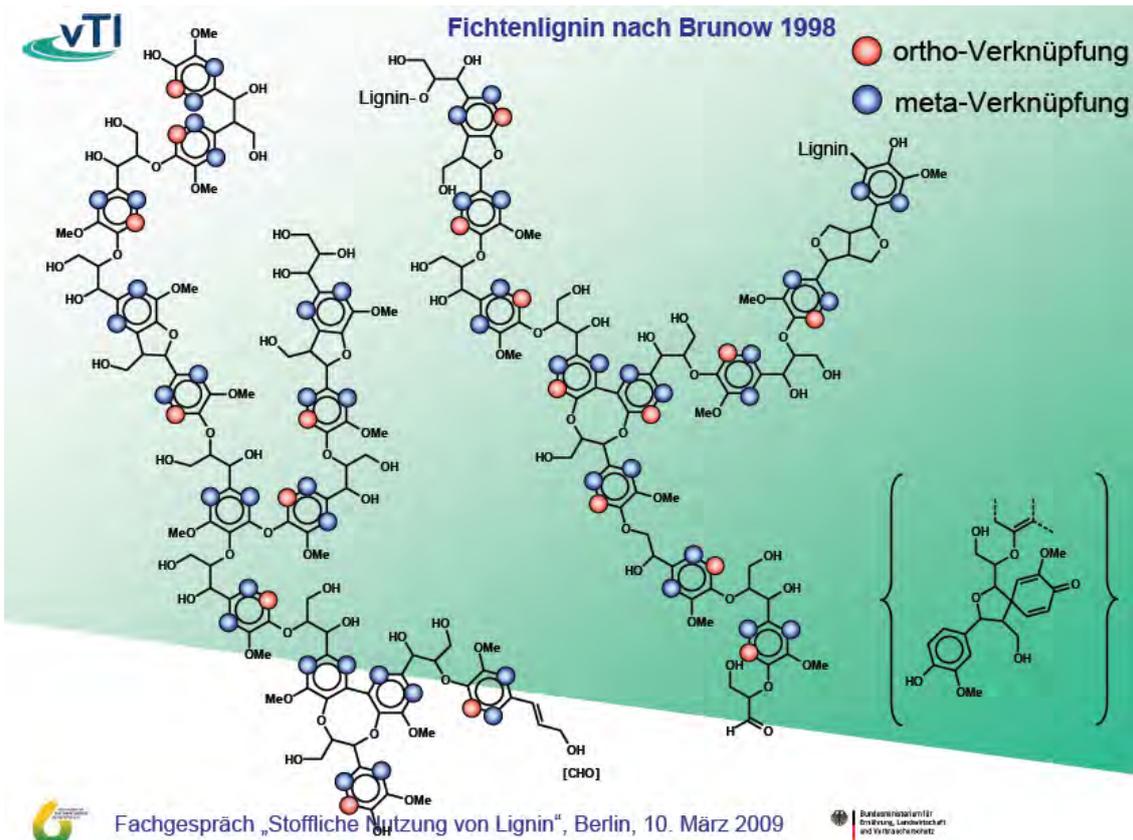


Abbildung 12: Ligningrundbausteine

Je nach Holzart (Laub- oder Nadelholz) haben die Lignine einen unterschiedlichen Anteil dieser Struktureinheiten. Nadelholzlignine bestehen zu über 90 % aus Coniferyleinheiten. Der Rest besteht hauptsächlich aus p-Cumarylalkohol. Durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung kommt es zwischen den einzelnen Struktureinheiten zu verschiedenen Verknüpfungen und damit zu einer unterschiedlichen makromolekularen Struktur.



Abbildungen 13: Lignin-Strukturmodelle aus Fichten- und Buchenholz [27]

Das Lignin ist im Holz kovalent an die Hemicellulosen gebunden, diese wiederum stehen über Wasserstoffbrückenbindungen mit der Cellulose in Verbindung. Die Bindung zwischen Lignin und Hemicellulosen erfolgt hauptsächlich über Ester-, Ether- oder glycosidische Bindungen.

In der Regel ist das Ziel der Auflösung der Holzverbundstruktur bei technischen Prozessen die Zellstoffherstellung, also die schonende Isolierung der Cellulose unter Erhaltung ihrer Struktur. Die polymere Ligninstruktur wird bei den Aufschlussprozessen zumindest teilweise abgebaut oder so verändert, dass die Cellulose schonend herausgelöst werden kann.

Holzaufschlussverfahren

Auf die chemischen Details soll hier nicht eingegangen werden, sondern lediglich eine Übersicht über die Vielfalt gegeben werden. Beim Sulfitaufschluss wird das Lignin zu wasserlöslichem Lignosulfonat sulfoniert. Der Sulfataufschluss (Kraft-Verfahren) führt zum so genannten Kraft-Lignin mit vielen freien COOH- und OH-Gruppen. Der Organosolv-Prozess arbeitet mit alkalischen wässrigen Methanollösungen. Die Aufschlüsse werden zumeist bei Temperaturen von 150 bis 200 °C unter Druck in alkalischem Milieu durchgeführt. Bei saueren Verfahren (wie Acetosolv-Verfahren) werden hohe Ansprüche an die Korrosionsbeständigkeit der Anlagen gestellt.

Bei Bioraffinerieprozessen können auch Lignine anfallen. Da hier in erster Linie der Cellulose-Abbau zu vergärbaren Glucosebausteinen oder die Biogasherstellung das Ziel ist, muss das Lignin beim Aufschluss nicht zwangsläufig weitgehend abgebaut werden. Es fällt dabei gewissermaßen ein „natives Lignin“ an, das seine ursprüngliche Struktur wesentlich ausgeprägter behält.

Der Rohstoff für die Nawaro-basierenden Bitumenersatzstoffe

Mit einem Anteil von 20 bis 30 % in Hölzern und Pflanzenrestmassen ist Lignin der erneuerbare nachwachsende Rohstoff in größtmöglich verfügbarer Menge, der bisher nur untergeordnet in der chemischen Technologie eingesetzt wird. In erster Linie wird Lignin immer noch in den Zellstofffabriken als Energieträger verbrannt, es werden unter Nutzung der oberflächenaktiven Eigenschaften von Lignosulfonaten Betonzusatzmittel hergestellt oder man gewinnt daraus Dünger oder Chemikalien wie Vanillin etc. Der Anfall von geschätzt jährlich mehreren Milliarden Tonnen in der Natur bleibt aber bisher weitgehend ungenützt. Daher wurde Lignin als wesentlichster Grundstoff für die im Folgenden beschriebenen Synthesen eingesetzt.

4.2 Ergebnisse der chemischen Synthese-Serien

Die Durchführung der chemischen Synthesen zur Herstellung von Naturstoffderivaten als Bitumenersatzstoffe erfolgte durch den Konsortialpartner TU-Wien, Institut für Angewandte Synthesechemie im Rahmen einer Dissertationsarbeit (siehe Kap. 3.2) [17]. Aufgrund des großen Umfangs der Ergebnisse, die in einer 3-jährigen Laufzeit erarbeitet wurden, kann hier nur ein Extrakt wiedergegeben werden. Beim Leser dieses Berichtes wird um Verständnis gebeten, dass vorbehaltlich der Anmeldung gewerblicher Schutzrechte die Beschreibung der Ergebnisse in einer Form erfolgt, die nicht neuheitsschädlich ist. Es wird wohl ein Einblick gegeben, welche Syntheserichtungen eingeschlagen wurden, detaillierten Angaben zur exakten Nachvollziehbarkeit des im Projekt erarbeiteten Standes der Technik können aber nicht wiedergegeben werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Herstellung eines auf Lignin basierenden Bitumenersatzstoffes. Dazu wurden aus unterschiedlichen Aufschlussprozessen oder aus unterschiedlichen Holzarten stammende Lignine ohne vorherige Fraktionierung oder Aufreinigung auf ihre Eignung als Bitumenersatzstoff untersucht. Im ersten Teil der Arbeit wurden die Rohstoffe mittels unterschiedlicher Methoden charakterisiert und die Art bzw. Anzahl an freien funktionellen Gruppen bestimmt.

Zur Hydrophobierung und Einstellung bitumenähnlicher Viskositäten wurden die Rohstoffe propoxyliert und durch Variation der Molverhältnisse unterschiedlich lange Propylenglykol-Seitenketten aufgepfropft. Es wurde der Einfluss der aufgepfropften Ketten auf die Viskosität untersucht sowie Möglichkeiten zur gezielten Einstellung dieser entwickelt.

Für die Einstellung bitumenartiger Eigenschaften, wie vor allem eine zuverlässige Beständigkeit unter freier Bewitterung wurden die Lignine so modifiziert, dass sie eine gute Öllöslichkeit aufweisen. Dazu wurden einerseits unmodifizierte Lignine mit Ölsäurechlorid und unterschiedlich propoxylierte Lignine mit Carbonsäuren bzw. Methylestern unterschiedlicher Alkylkettenlänge verestert bzw. umgeestert. Dabei wurde der Einfluss des Veresterungsgrades sowie der Alkylkettenlänge auf die rheologischen Eigenschaften sowie die Öllöslichkeit ermittelt.

Weiters wurde die Auswirkung freier Säuregruppen auf die rheologischen Eigenschaften untersucht. Unterschiedlich propoxylierte Lignine wurden dazu mit funktionellen Gruppen derivatisiert, deren Effektivität dann in Hinblick auf das angestrebte Ziel bewertet werden konnte.

4.2.1 Ligninderivate

Die Darstellung der Ergebnisse bezieht sich in erster Linie auf analytische Daten, wie Spektren und rheologische Messkurven sowie beschreibende Angaben zu Konsistenz. Auf genaue Angaben zu den präparativen Methoden muss aus den oben angeführten Gründen verzichtet werden. Es hat sich im Zuge des umfangreichen Syntheseprogramms herausgestellt, dass die Herkunft und Aufbereitung des Lignins einen erheblichen Einfluss auf die erzielbaren Ergebnisse hat.

Isolierung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Als Ausgangslignin herangezogen wurden ein kommerziell erhältliches sprühgetrocknetes, alkalisch abgebautes Weizenstrohlignin der Fa. Granit-Green Value, das unter dem Handelsnamen Protobind 2400 (PB2400) erhältlich ist, ein Holz-Dicklaugenlignin (DKL) aus dem Kraft-Verfahren der Nettingsdorfer Papierfabrik AG & Co KG, ein mittels Sulfitverfahren aus Holz isoliertes Mg-Lignosulfonat (LS) der Lenzing AG sowie ein kommerziell erhältliches, sprühgetrocknetes Holz-Mg-Lignosulfonat der Fa. Borregaard. Zusätzlich wurde ein so genanntes „Natives Lignin“ untersucht. Von diesem Rohstoff war nur bekannt, dass er bei einem Biotechnologischen Verfahren mit Stroh als Ausgangsstoff isoliert wurde. Abbildung 14 (Bild und Tabelle) gibt eine Übersicht über die eingesetzten technischen Lignine.



	LS (Lenzing)	LS (Borregaard)	Natives Lignin	DKL	PB2400
Aufschluss	Mg-Sulfit	Mg-Sulfit	?	Kraft	Alkalisch
Holzart	Buche	Fichte:Buche = 70:30	Weizenstroh	(Fichte/ Kiefer): Sägerestholz = 50:50	Weizenstroh
Konsistenz	~ 55-65 % Dicklauge	Trocken	Trocken	Dicklauge	Trocken

Abbildung 14: Beschreibung der Synthese-Ausgangsprodukte

Protobind 2400 wird in weiterer Folge als **PB**, das Kraft-Lignin bzw. Dicklaugenlignin als **DKL** und die Lignosulfonate als **LS** bezeichnet, das Native Lignin als **NL**.

Die Isolierung von DKL erfolgte durch Fällung mit H_2SO_4 , Zentrifugieren und Trocknen im Vakuum bei $40^\circ C$. Die Ausbeute nach Fällung betrug 32 % der Gesamteinwaage an Dicklauge. Das Mg-Lignosulfonat der Fa. Borregaard lag als hellbraunes Pulver vor, das Mg-Lignosulfonat der Fa. Lenzing als Pulvrückstand mit 55-65 %. Diese Rohstoffe wurden mit stark sauren Ionenaustauschern in Sulfonsäuren umgewandelt. Natives Lignin wurde, schonend aus dem Prozess durch Filterung und Trocknung gewonnen, als Pulver erhalten.

Die Charakterisierung der Ausgangsstoffe ist wesentlich für die Erfassung der Art sowie der Anteile an verschiedenen funktionellen Gruppen. Dazu wurden unterschiedliche Methoden angewendet.

- Abgeschwächte Totalreflexion Infrarotspektroskopie (ATR-IR)
- Molekulargewichtsbestimmung mittels Gel-Permeations-Chromatographie (GPC)
- Titration der Sulfonsäuregruppen
- Potentiometrische Titration der phenolischen OH und COOH-Gruppen
- Bestimmung der phenolischen OH mit UV/VIS-Spektroskopie
- Titrimetrische Bestimmung der Hydroxylzahl nach DIN 53240
- ^1H -NMR-Spektroskopie nach Acetylierung
- ^{31}P -NMR-Spektroskopie

Die ATR-IR-Spektroskopie zeigt mit ihrer starken Ähnlichkeit der unterschiedlichen Produkte (Abbildung 15) generell die Problematik des Arbeitens mit Naturstoffen auf, denn in den Synthesen erwiesen sich die einzelnen Lignine sehr wohl als sehr unterschiedlich.

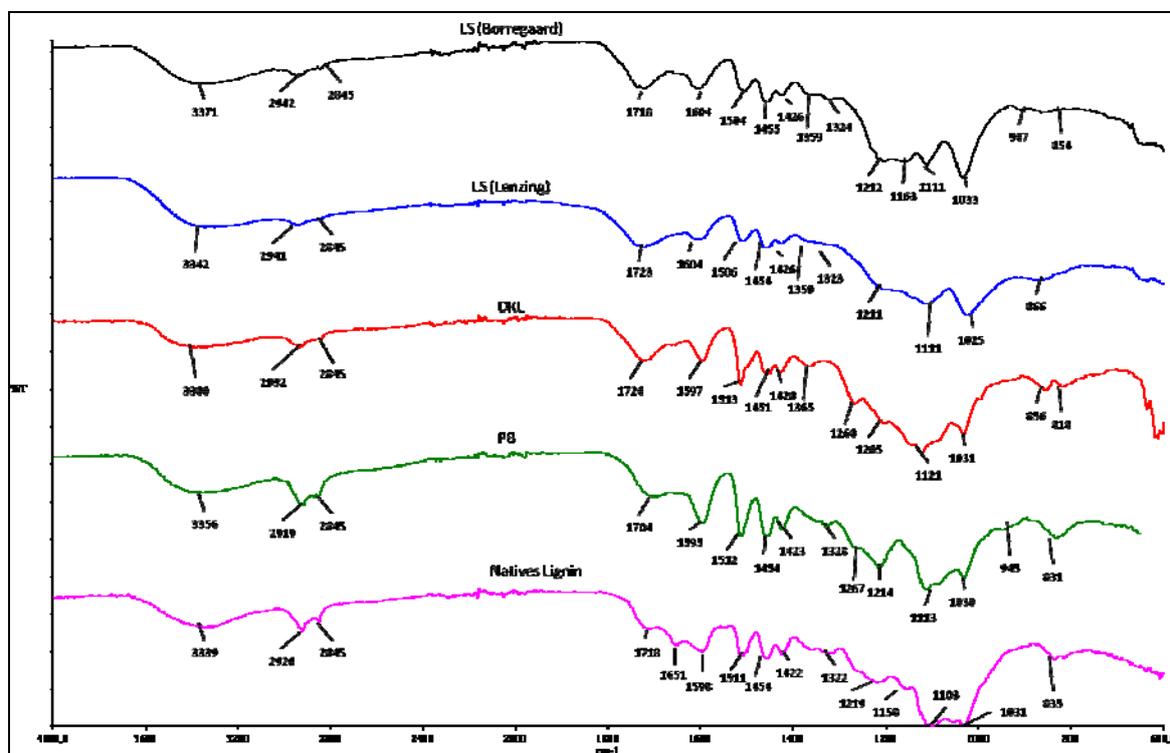


Abbildung 15: ATR-IR-Spektren der unterschiedlichen Lignin-Rohstoffe

Die Molekulargewichtsbestimmung mittels GPC zeigte Spannweiten (M_w) von 1000 (DKL), 1700 (PB), 1500 (Natives Lignin) bis 34000 (LS Lenzing) und 48000 (LS Borregaard).

Die Titration der Sulfonsäuregruppen (LS) sowie der phenolischen OH- und COOH-Gruppen zeigte das Potential der Reaktionsfähigkeit in den Synthesereaktionen und war für die Berechnung der Reagenzienzugabe wichtig (Abbildung 16).

Lignin	COOH [mmol/g]	OH _{phenol} [mmol/g]
PB	2.36	1.84
Natives Lignin	0.73	1.50
DKL	1.03	0.38
LS (Borregaard)	0.19	1.02
LS (Lenzing)	0.37	1.65

Abbildung 16: Molare Anteile der funktionellen Gruppen der Lignin-Rohstoffe

Für die ^1H -NMR-Spektroskopie mussten die Lignine acetyliert werden, um die CDCl_3 -Löslichkeit zu gewährleisten. Die Spektren sind dann aussagekräftiger, weil auch aromatische und aliphatische OH-Gruppen erfasst werden. Am Nativen Lignin wurde ein besonders hoher Anteil von CH-, CH_2 - und CH_3 -Gruppen gefunden, wahrscheinlich verursacht von einem signifikanten Lipidanteil. Die hohe Aussagekraft der ^1H -NMR wurde noch ergänzt durch die ^{31}P -NMR-Spektroskopie, die, ebenfalls nach einer Derivatisierung mit dem Phospholane TMDP, Informationen über die COOH- und OH-Gruppen liefert (Abbildung 17). Die ebenfalls in der Abbildung 17 vorangestellte Ergebnistabelle zeigt im Vergleich zu den titrimetrischen Ergebnissen markante Unterschiede. Sie zeigen generell die Problematik des analytischen Zuganges zu Naturstoffen auf: Einerseits kommt es bei den Titrations und Derivatisierungen zu Niederschlagsbildung sowie zu unvollständigen Umsetzungen, da die Reagenzien zum Teil nicht „in die Tiefe“ des nur teilweise abgebauten Polymergerüsts vordringen können. Ähnlich ist es auch bei den Synthesen. Auch dazu ist es erforderlich, dass die Chemikalien die gesamten Lignin-Molekülfragmente durchdringen. Wenn dies aufgrund der Löslichkeitsverhältnisse nicht gelingt, sind schwer reproduzierbare Syntheseprodukt-Eigenschaften und niedrige Umsetzungsraten die Folge. Daher sind die analytischen Ergebnisse schon ein Hinweis darauf, dass die Vorkonditionierung der Ligninrohstoffe sehr wichtig ist, etwa durch Aufschlussverfahren oder sonstige Degradationsverfahren vor dem ersten Syntheseschritt, mit dem Ziel, die Zugänglichkeit der reaktionsfähigen Zentren der Ligninmoleküle zu vereinheitlichen oder überhaupt erst hinreichend quantitativ zu ermöglichen. Im Prinzip wird im nächsten Abschnitt ein derartiges Verfahren zur Vereinheitlichung der molekularen Struktur beschrieben. Jedoch scheint diese Art der Konditionierung nicht weit genug zu gehen, wie die stofflichen Umsätze aufzuzeigen scheinen.

	PB [mmol/g]	DKL [mmol/g]	Natives Lignin [mmol/g]
COOH [mmol/g]	0.80	0.93	0.11
OH _{aliphatisch} [mmol/g]	2.34	2.19	1.12
OH _{aromatisch} [mmol/g]	2.38	4.54	0.42
COOH _{Titriert}	2.36	1.03	0.73
OH-Zahl _{Titriert}	2.77	2.96	3.94

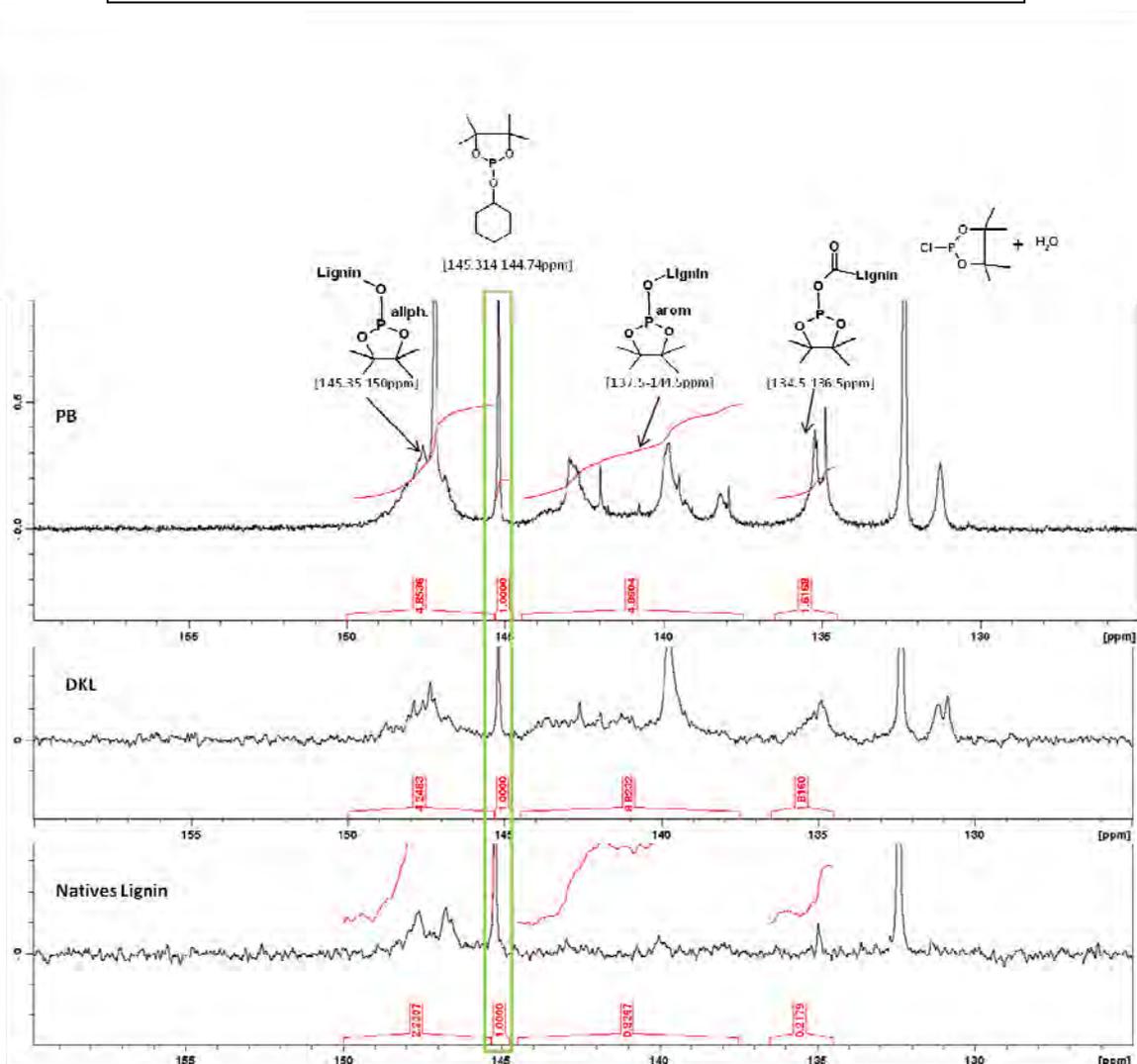


Abbildung 17: ³¹P-NMR-Spektren der Lignin-Rohstoffe (außer LS)

Propoxylierung der Lignine

Eine Möglichkeit zur gleichzeitigen Hydrophobierung unter Reduktion der Glasübergangstemperatur (T_g) bieten im allgemeinen Pfropf-Reaktionen, bei denen alle funktionellen Gruppen gleichzeitig umgesetzt werden. Eine gute Möglichkeit zur Erzielung dieser Anforderungen ist die Umsetzung mit Epoxiden, da diese sowohl mit Säuregruppen

als auch mit aliphatischen und phenolischen OH-Gruppen reagieren können. Sehr reaktive Epoxide sind Ethylenoxid und Propylenoxid, wobei man bei Umsetzung mit Ethylenoxid hydrophile Produkte erhält, mit Propylenoxid dagegen hydrophobe Produkte.

Die Herstellung von Hydroxypropyl-Ligninen wird für unterschiedlich abgebaute Lignine in mehreren Literaturstellen [28] beschrieben, wobei die Umsetzungstemperatur sowie die Zeitdauer in allen Arbeiten variieren. Je nach Ligninart, chemischer Struktur sowie Isolierungs- bzw. Pulpung-Prozess variieren die resultierenden Polyole in ihrem chemischen sowie thermischen Eigenschaftsprofil. Meist dient die Propoxylierung der Erhöhung der Hydrophobie, des Herabsenkens der Glasübergangstemperatur und der Vereinheitlichung der Funktionalitäten zur Verwendung von Lignin in Polyurethanen, Phenol-Formaldehydharzen oder als Verbundwerkstoff-Komponente in unterschiedlichsten Materialien.

Prinzipiell werden Propoxylierungsreaktionen im Autoklaven bei hohen Temperaturen (~80-280°C) und daraus resultierenden hohen Drücken durchgeführt. Die Propoxylierung kann unter saurer oder alkalischer Katalyse erfolgen, wobei die saure Katalyse viele phenolische OH-Gruppen nicht umsetzt, während bei der alkalischen sowohl die Säuren als auch die phenolischen und aliphatischen OH-Gruppen propoxyliert werden.

Durch die für die Propoxylierung notwendigen Reaktionsbedingungen kann es zur Selbstkondensation des Lignin-Makromoleküls kommen, wodurch unlösliche Fraktionen entstehen.

Lignosulfonate bei Raumtemperatur in Isopropanol als Dispergiermittel und Propylenoxid im variierten molaren Überschuss, berechnet auf die funktionellen Gruppen, wurden nur mit sehr niedrigen Graden umgesetzt. Hingegen waren die Reaktionen im Autoklaven bei 100 °C erfolgreicher, allerdings wurden auch dabei erhebliche Mengen unerwünschter Homopolymere gebildet und ein Teil des Lignins wurde nicht umgesetzt. Ebenso wurden PB, DKL und Natives Lignin nach verschiedenen Verfahren, „in Suspension“ (in Isopropanol) wie auch „in Masse“ (Propylenoxid im Überschuss als Dispergiermittel) im Autoklaven propoxyliert. Im Prinzip erfolgten diese Umsetzungen nach dem folgenden Formelschema:

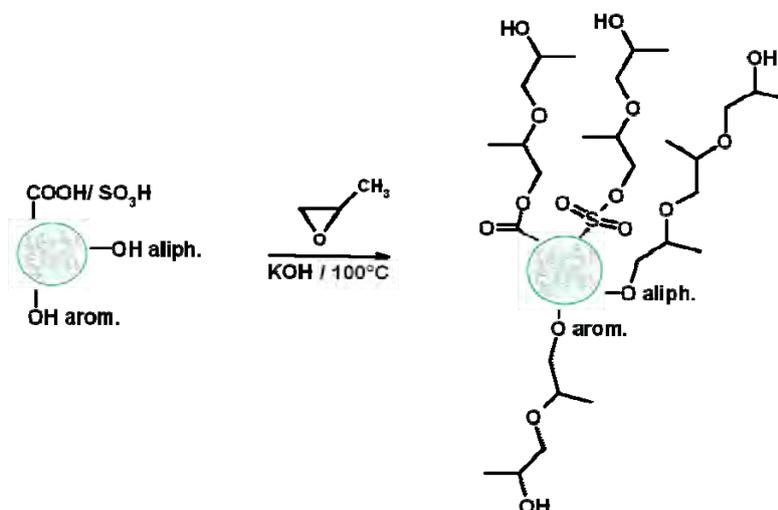


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Propoxylierung von Lignin

Dieses Schema zeigt die Egalisierung der ursprünglich unterschiedlichen funktionellen Gruppen durch das Aufpfropfen einheitlicher Polypropylenoxid-Ketten (PO-Ketten) mit endständigen OH-Gruppen. Die Länge dieser Ketten konnte durch Wahl der Reaktionsbedingungen variiert werden. Allerdings erforderte die Aufarbeitung der Vielzahl von Reaktionsansätzen einen erheblichen präparativen Aufwand: Der Autoklaveneinhalt wurde nach Reaktionsende nach Abziehen des Reagensüberschusses und gegebenenfalls des Dispergiermittels in Dichlormethan gelöst. Das Unlösliche (nicht nennenswert umgesetzte Lignin) wurde mittels Filtration abgetrennt und wird in den Umsatzberechnungen nicht berücksichtigt (was aus der Sichtweise einer erforderlichen technologischen Umsetzung problematisch erscheint, da derartige Rückstände unbedingt eine Weiterbehandlung erfordern). Danach erfolgte die Abtrennung von Homopolymeren (HoPo) (= mit sich selbst umgesetztes „Reagens“) durch ein Extraktionsverfahren mit n-Hexan/Acetonitril. Die HoPo werden im Hexan angereichert, das wiederum weitere unlösliche Anteile enthalten kann. In der Acetonitrilphase löst sich das propoxylierte Lignin, das nach Ausfällen mit Wasser abzentrifugiert und getrocknet werden kann, unerwünschte Oligomere bleiben im Acetonitril in Lösung.

Es wurden bei diesen Synthesen sehr unterschiedliche Ausbeuten im Bereich von 20 bis 70 M-% erhalten. Allerdings ist dazu anzumerken, dass die Berechnung der Ausbeuten auf die Lignineinwaage bezogen wird und die eingesetzte Reagensmenge dabei gänzlich unberücksichtigt bleibt. Ebenso wird der im Dichlormethan unlösliche Anteil, das ist praktisch ein Teil nicht umgesetzten Lignins, von der Lignineinwaage abgezogen. Diese Art der Umsatzberechnung verzerrt daher die realen Verhältnisse erheblich und „schönt“ die Ergebnisse. Deshalb kommen bei dieser eigenwilligen Umsatzberechnung gelegentlich auch Umsätze mit über 100 % vor (von 100 bis 170 %). Eine Erklärung für diese Vorgangsweise ist, dass der Schwerpunkt in dieser Synthesearbeit auf die analytische Bewertung der Ergebnisse gelegt wurde, wie es die „Wissenschaftlichkeit“ erfordert und weniger auf die später geplante technische Nutzung. Denn aus der Sicht der Bereitstellung technischer Massenprodukte ist es nicht unerheblich, wie hoch der Einsatz an Reagenzien ist und vor allem welche nicht nutzbaren Nebenprodukte entstehen, die möglicherweise auch entsorgt werden müssen. Allerdings ist die labortechnische Aufarbeitung möglicherweise der Grund dafür, dass auch umgesetztes Produkt verloren ging und dadurch die Materialbilanzen verfälschte. Es könnte sich durchaus im Dichlormethan-Unlöslichen umgesetztes Lignin, aber mit schwächerem Propoxylierungsgrad befinden und es hat sich auch gezeigt, dass entstandenes HoPo als Löslichkeitsvermittler in der Hexan/Acetonitril-Extraktion die Qualität der Trennung beeinflusst. Die Tabelle in der Abbildung 19, sie ist nur ein kleiner Ausschnitt aus der Vielzahl von Syntheseansätzen, veranschaulicht die Ergebnisse repräsentativ.

Ansatz- Bezeichnung	Eingesetzte Ligninmenge [g]	Molverhältnis Lignin- OH/COOH: PO	Rückstand ¹ (in CH₂Cl₂ n.l.) [%]	HoPo² [%]	Ausbeute³ [%]
PB-PO-Isop.-1	15	1:10	7.34	9.4	85.45
PB-PO-Isop.-2	20	1:5	33.59	2.1	45.92
PB-PO-Isop.-3	20	1:5	66.52	2.0	73.05
PB-PO-Isop.-4	40	1:3	47.01	1.0	32.44
PB-PO-Isop.-5	40	1:2	47.01	0.8	38.68
DKL-PO-Isop.-1 ⁺	71	1:10	68.89	0.7	23.8
DKL-PO-Isop.-2 ⁺	51	1:10	77.76	19.5	69.52
DKL-PO-Isop.-3	26	1:2	59.53	2.3	45.95
Nativ-PO-Isop.-1	15	1:6	79.96	10	72.86

¹ bezogen auf Gesamteinwaage an Lignin

² bezogen auf Gesamteinwaage bei Extraktion

³ berechnet auf Lignineinwaage abzüglich unlöslichem Anteil

+ Rührerstopps während Reaktion

Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung der Reaktionsumsätze/Ausbeuten bei der Propoxylierung des Lignins

Analytische Charakterisierung der propoxylierten Lignine

Alle Ansätze wurden sehr umfangreich analytisch charakterisiert, wobei vor allem wieder die spektroskopischen Methoden Anwendung fanden. Es wurden jeweils alle Löslichkeits-Fractionen untersucht, die Spektren (z.B. ATR-IR) zeigten vor allem quantitative Unterschiede in der Signalintensität nicht aber in der Lage der Absorptionsbanden. Das ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass z.B. die Esterbande bei 1722 cm⁻¹ in der Dichlormethan-Fraktion ausgeprägter, die Bande für eine freie Carboxylgruppe bei 1714 cm⁻¹ aber in der Dichlormethan-unlöslichen Fraktion intensiver ist. Sehr deutlich unterscheidbar sind die Ausgangslignine von den propoxylierten Ligninen, wie die Abbildung 20 zeigt.

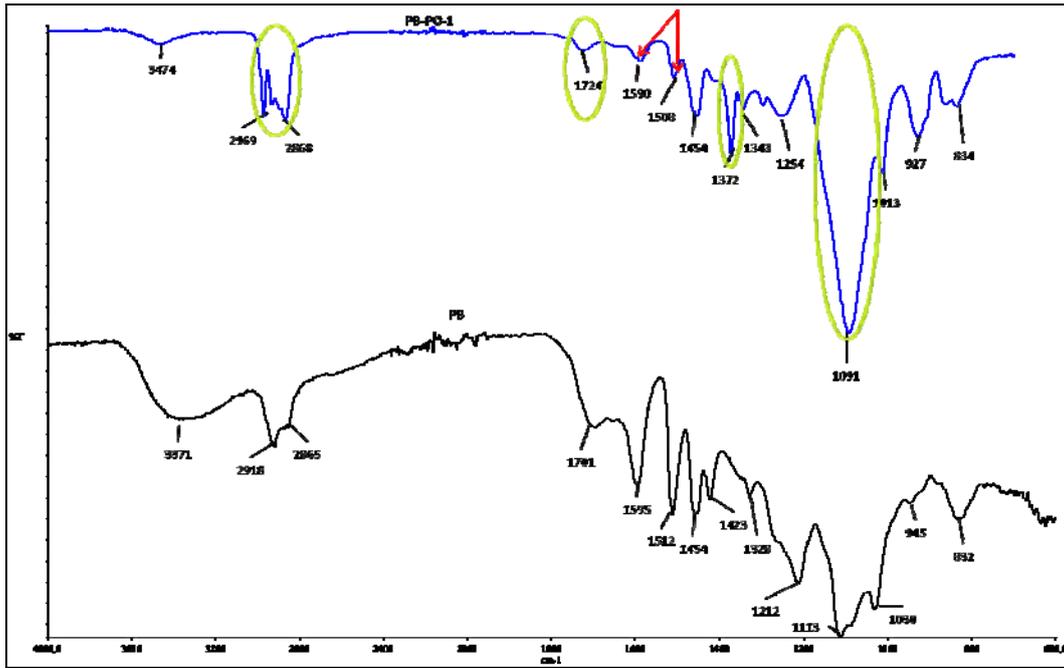


Abbildung 20: ATR-IR-Spektrum von PB und PB-PO-1

Ebenso zeigen die ^{31}P -NMR-Spektren recht deutliche Unterschiede und dokumentieren die erfolgreich verlaufenden Synthesereaktionen.

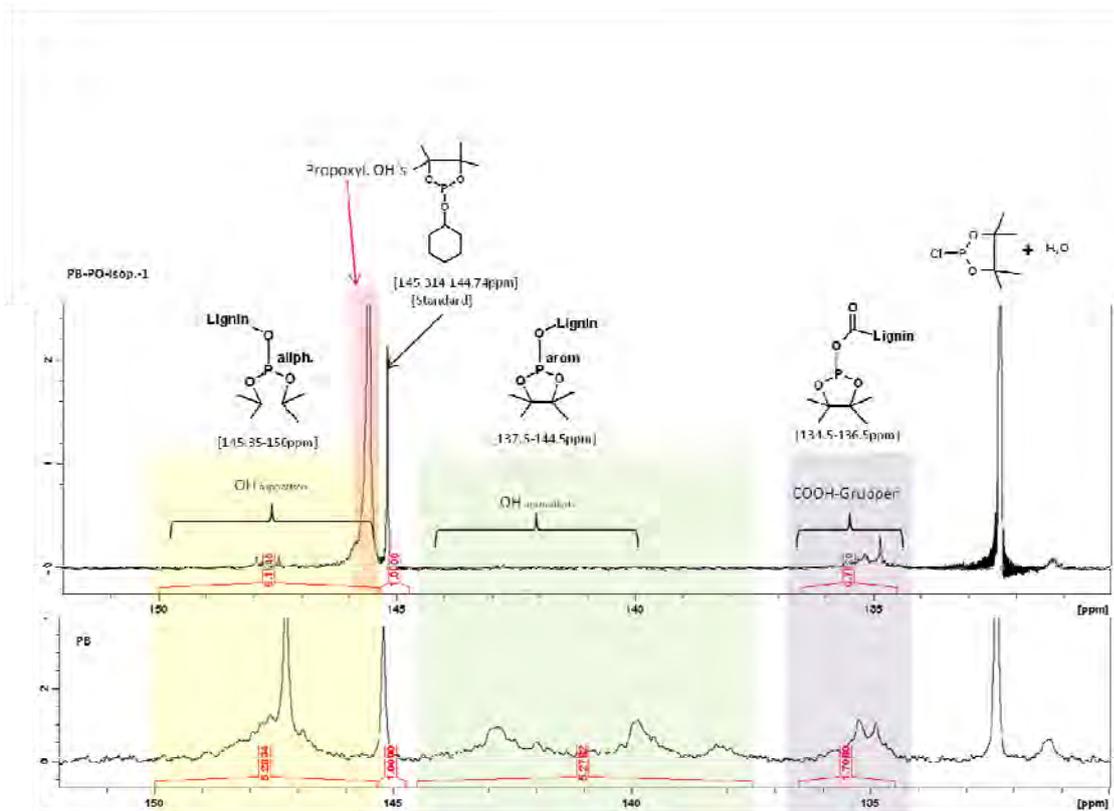


Abbildung 21: ^{31}P -NMR-Spektren von PB und PB-PO-1

Sehr interessant ist die Analyse der OH-Zahlen der propoxylierten Lignine mit 2 verschiedenen Methoden. Bei den Ausgangsligninen war die Übereinstimmung der Werte, bestimmt mittels ^{31}P -NMR-Spektroskopie sowie mittels Titration, oft sehr schlecht (Abbildung 17). Die folgende Tabelle gemäß Abbildung 22 zeigt jedoch eine erstaunlich gute Übereinstimmung. Das ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass in den umgesetzten Molekülen die analytische Zugänglichkeit der funktionellen Gruppen erheblich besser ist, als in den nicht umgesetzten Molekülen, die offensichtlich für den Reagenszutritt zur funktionellen Gruppe sterisch behindert sind.

Probenbezeichnung	^{31}P -NMR (OH _{aliph. und arom})	Titrierte OH
PB-PO-1	1.90	1.94
PB-PO-2	2.53	2.56
PB-PO-3	2.55	2.14
PB-PO-4	2.35	2.15
PB-PO-5	2.70	2.34
PB-PO-6	2.93	2.99
PB-PO-7	2.87	3.06
PB-PO-8	2.99	2.78
PB-PO-9	2.80	2.38
PB-PO-10	3.11	2.91
PB-PO-11	3.04	2.81
PB-PO-12	3.79	3.76
PB-PO-13	2.61	2.90
DKL-PO-1	2.72	3.03
DKL-PO-2	3.62	3.90
DKL-PO-3	3.41	3.76
DKL-PO-4	3.08	4.46
Nativ-PO-1	3.60	3.12
Nativ-PO-2	2.36	1.45

Abbildung 22: OH-Zahlen der in Masse propoxylierten Lignine

Eine ähnlich gute Übereinstimmung gibt es auch bei den in Suspension propoxylierten Ligninen. Titrimetrisch und spektroskopisch konnten keine COOH-Gruppen mehr nachgewiesen werden, was auf den vollständigen Umsatz dieser Gruppen hinweist.

Mittels ^1H -NMR-Spektroskopie wurden die acetylierten propoxylierten Lignine auf die Länge ihrer PO-Seitenketten untersucht, erkennbar am Signal der CH_3 -Gruppen bei 1 ppm Verschiebung. Es gibt einen signifikanten Zusammenhang zwischen eingesetzter Reagenzmenge und Kettenlänge und es lassen sich daraus interessante Erkenntnisse zur Reproduzierbarkeit der Reaktionen ableiten. Daraus lässt sich z.B. auch schlussfolgern, dass bei den in Suspension (Isopropanol-Ansätze) durchgeführten Propoxylierungen eine gleichmäßigere Kettenverteilung über das Molekül stattgefunden haben muss, die PO-Ketten aber durchschnittlich kürzer sind.

Die Charakterisierung der Rückstände (Dichlormethan-Unlösliches) ergab, dass diese relativ lange PO-Ketten enthalten, die aber nur an relativ wenige funktionelle Gruppen der Ligninmatrix gebunden sind und daher noch entsprechend viele funktionelle Gruppen frei sind, also nicht reagiert haben. Das Resümee lautet: Je ungleichmäßiger Lignin propoxyliert wird, umso stärker bestimmt die polare Ligninmatrix das Löslichkeitsverhalten [17, Seite 77]. Bei wenigen und langen PO-Ketten ist das Produkt weder in Dichlormethan noch in Acetonitril löslich. Sind dagegen viele OH-Gruppen mit kurzen PO-Ketten versehen, ist das Produkt vollständig in Dichlormethan löslich, fällt aber in Acetonitril aus.

Rheologische Charakterisierung der propoxylierten Lignine

In der Bitumen- und Asphalttechnologie zählen die rheologischen Untersuchungen an Bitumen zu den wichtigsten Prüfmethode. Besonders die Prüfung von Bitumen mit sogenannten Dynamic Shear Rheometern (DSR) im oszillierenden Messmodus ermöglicht die Bewertung der Fließeigenschaften über einen weiten Temperaturbereich von +10 °C bis 100 °C, in dem Bitumen vom nahezu springharten Festkörperzustand in eine dünnflüssige viskose Flüssigkeit übergeht. Die Messergebnisse lassen Aussagen über die viskoelastischen Eigenschaften zu und es reichen minimale Probemengen von 0,5 g zur umfassenden Charakterisierung aus [29]. Daher eignen sich DSR-Messungen auch vorzüglich zur Bewertung der Bitumenersatzstoffe für die im Labormaßstab verfügbaren eher kleinen Probemengen. Das folgende rheologische Ergebnis zeigt beispielhaft die Ähnlichkeit eines Straßenbaubitumens mit einem im Zuge dieses Projektes hergestellten propoxylierten Lignins.

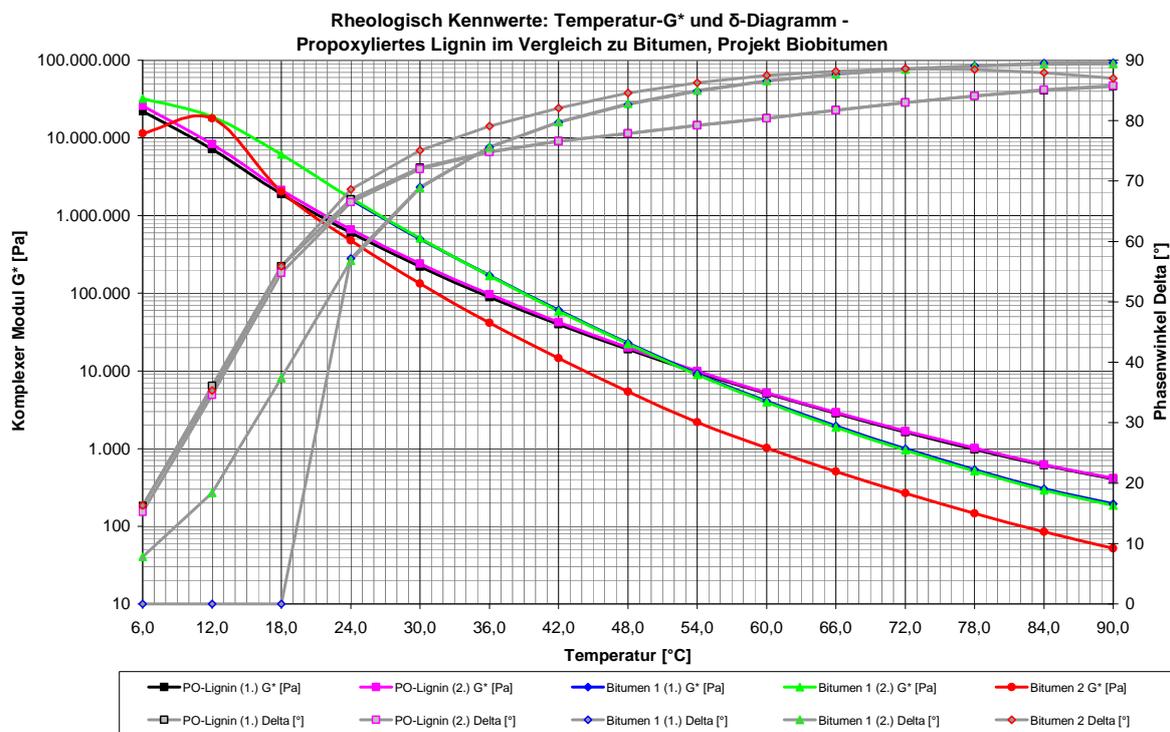


Abbildung 23: Rheologisches Diagramm, Bitumen im Vergleich zu propoxyliertem Lignin

Dieses Diagramm zeigt, dass ein propoxyliertes Lignin in seinem Fließverhalten einem Bitumen über einen weiten Temperaturbereich sehr ähnlich sein kann. Somit schien ein sehr wichtiges Ziel erreicht worden zu sein: Durch die Einführung von Propylenoxid-Ketten in das Ligninmolekül ist es möglich, das ursprünglich erst bei etwa 150 °C zu schmelzen beginnende Lignin, das für Asphaltanwendungen keinesfalls als Bindemittel geeignet wäre, in eine geeignete bitumenartige Konsistenz zu bringen. Allerdings muss angemerkt werden, dass es zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war, die Konsistenz durch eine stets reproduzierbare Reaktionsführung gezielt einzustellen. Es war eher ein günstiges Zufallsergebnis und diese optimale rheologische Beschaffenheit konnte in Wiederholungsansätzen nicht mehr erzielt werden.

Da eine rheologische Kurve für Vergleichszwecke in Reihenuntersuchungen nicht sehr praktisch handhabbar ist, hat es sich in der DSR-Bitumenprüfung bewährt, jene Temperatur als „Rheologischen Erweichungspunkt“ (=ERK Rheo) anzugeben, bei welcher der „Komplexe Schubmodul“ (G^*) den Wert 10.000 Pa aufweist. Diese Temperatur entspricht praktisch einem zentralen Punkt innerhalb eines Schmelztemperaturintervalles, der bei Bitumen als „Erweichungspunkt Ring und Kugel“ bezeichnet wird [1]. Im Diagramm liegen die ERK-Rheo für die Bitumenprobe 1 bei 54 °C (2 Parallelmessungen an derselben Probe) und für Bitumen 2 bei 44 °C. Das propoxylierte Lignin hat eine ERK-Rheo von ebenfalls 54 °C und hat noch dazu den Vorteil, dass die G^* -Kurve flacher verläuft, was wiederum den Vorteil der niedrigeren Temperaturempfindlichkeit aufweist.

In der Bewertung der propoxylierten Lignine aus den Reihenversuchen wurde der ERK-Rheo als Maßstab verwendet, um die Produkte zu charakterisieren, also deren „Härtegrad“ zu beschreiben. Die Spannweite der Konsistenzunterschiede der propoxylierten Lignine wird in der Abbildung 24 veranschaulicht und es werden Korrelationen zwischen Konsistenz und den analytischen Parametern wie PO-Kettenlänge (n_{stat}) und OH-Zahl dargestellt. Aus der Abbildung kann zum Beispiel geschlossen werden, je mehr PO-Einheiten auf das Ligninmolekül gepfropft werden, umso stärker wird die Matrix erweicht. Das heißt, die PO-Ketten stören die ursprünglichen Ligninmatrix-Wechselwirkungen und lösen seine schwer schmelzbare Struktur auf, die wahrscheinlich durch starke OH-/COOH-Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen oder eine Art „kristalline Ordnungsstruktur“ oder sonstige „Schichtungsstruktur“ wie auch immer, geprägt ist. Die Verfeinerung der Interpretation (alle Daten können in dieser Berichts-Kurzform nicht dargestellt werden, z.B. ein so genannter Integralwert A) zeigt auf, dass der nicht modifizierte Teil der Ligninmatrix ausschlaggebend für die rheologischen Eigenschaften ist: Das würde bedeuten, wie schon früher erwähnt, es ist besonders wichtig, die Reaktionszentren möglichst gleichmäßig über das Ligninmolekül zu verteilen und nicht an einigen wenigen Stellen „etwas dranzuhängen“. Offensichtlich geht es tatsächlich darum, die gefestigte innere Struktur der (nach dem Holzaufschluss vorliegenden) Bruchstücke des ursprünglich hochpolymeren Ligningerüsts an vielen Stellen „aufzureißen“ und durch Einbringen „störender Anhängsel“ (wie es die PO-Gruppen sind)

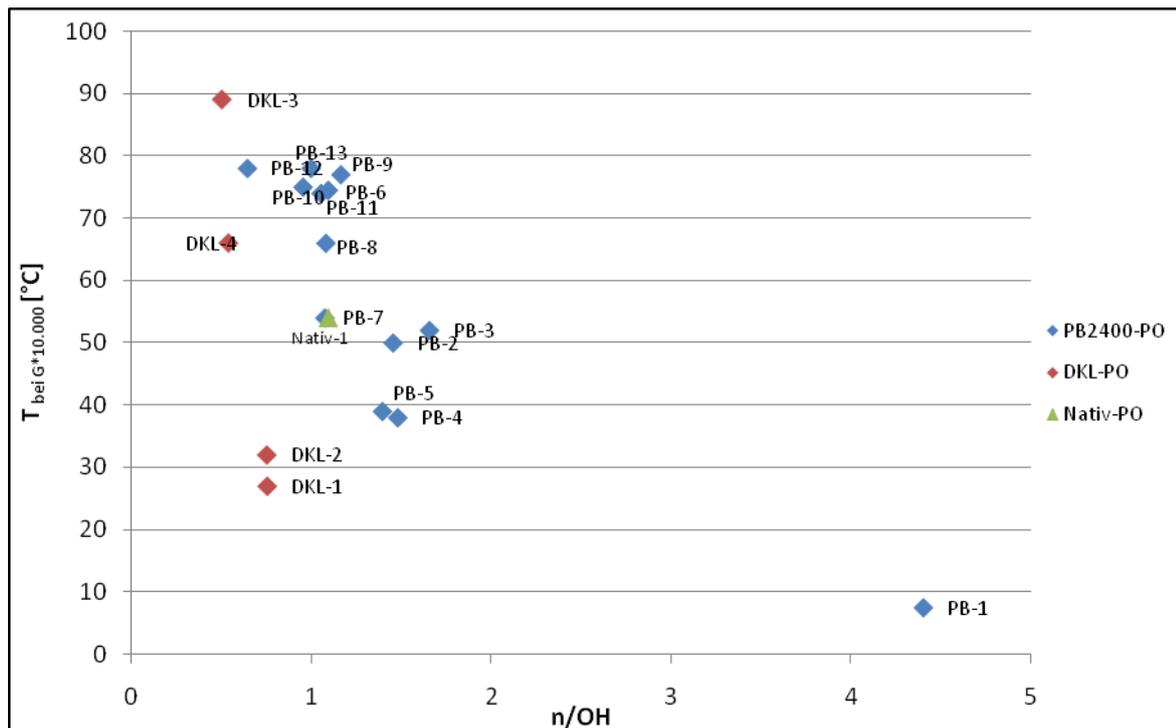


Abbildung 24: Konsistenz der propoxylierten Lignine anhand des Kennwertes „ERK-Rheo“ und dessen Korrelation zum PO-Kettenlänge n_{stat} / OH-Zahl-Quotienten

die „Reassoziaton“ zu verhindern. Erst dann können die Bruchstücke „gegeneinander gleiten“, die Ligninderivate werden bei Raumtemperatur flüssig bis zähflüssig oder spröde, der Schmelzpunkt wird von nahezu 200 °C auf unter 100 °C herabgesetzt.

Es hat sich auch gezeigt, dass das Mischen härterer und weicherer Derivate zielführend ist. So resultiert bei einem 1:1-Gemisch aus einem PB-PO-9 (ERK-Rheo von 77 °C) und einem PB-PO-5 (ERK-Rheo von 39 °C) ein ERK-Rheo von etwa 60 °C. Bei Bitumen ergibt das Mischen harter und weicher Sorten übrigens denselben linearen Effekt auf den ERK-Rheo.

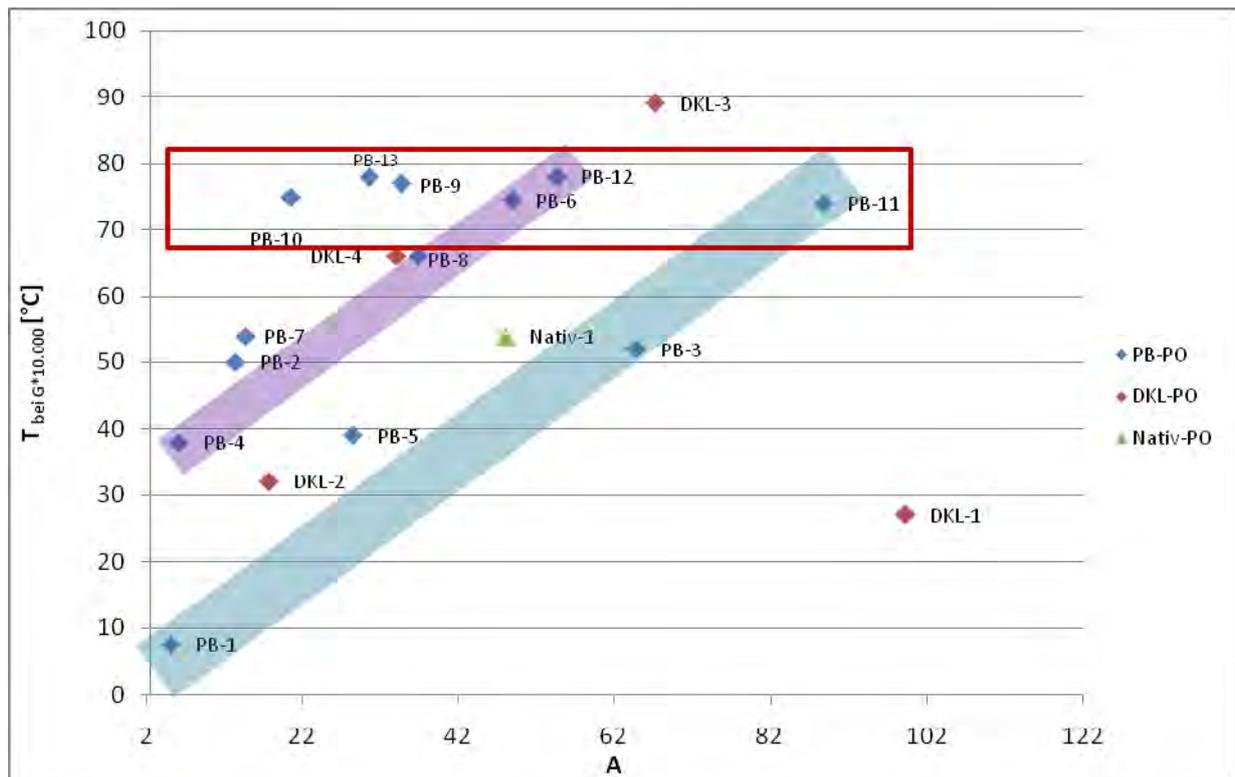


Abbildung 25: ERK-Rheo in Abhängigkeit vom Ausmaß der „Integralabweichung“ (A)

Der Rückschlag nahe am Ziel

Etwa bei der Hälfte der Projektlaufzeit war dieser erfolgreiche Zwischenzustand erreicht; man konnte davon ausgehen, dem Ziel nahe zu sein und durch weitere Optimierung der Reaktionsbedingungen bald die gewünschten Eigenschaften des Zielproduktes einstellen zu können. Es mussten zwar die Ausbeuten noch erhöht und die verbrauchten Reagentmengen erniedrigt werden. Das könnte eventuell durch Vorbehandeln der Lignine durch einen optimierten Aufschlussprozess erreicht werden.

Nachdem das oben angeführte gute rheologische Ergebnis erzielt worden war (gemäß Abbildung 23), ersuchte der Antragsteller den mit den Synthesen beauftragten Projektpartner, das gute Ergebnis zu reproduzieren und für Versuche im Bitumenlabor etwa 100 g Material zur Verfügung zu stellen. Es wurde allerdings ein härteres Produkt erhalten als erwartet worden war, daher musste es „zurückgeflut“ werden, also durch Zugabe von Öl (im konkreten Fall Rapsöl) weicher eingestellt werden. Dabei fiel dem Projektleiter auf, dass keine hinreichend homogene Lösung erhalten werden konnte, es kam zu einer Entmischung. Eingehende Löslichkeitsstudien zeigten, dass das übergebene Produkt nicht wirklich „bitumenartig“ war, sondern einen erheblich polarerer Charakter hatte. Das Expertenteam des Syntheselabors hatte den notwendigen lipophilen Charakter des Bitumenersatzproduktes nicht hinreichend berücksichtigt. Die Einführung von Propylenoxidketten in die Ligninmatrix stellte gewissermaßen eine Anreicherung von Sauerstoffatomen, noch dazu mit endständigen OH-Gruppen dar, eigentlich nicht verwunderlich, dass ein – zwar deutlich eingeschränkter – hydrophiler Molekülcharakter existierte.

Das Aufmischen des Syntheseproduktes auf Gestein und die nachfolgende Wasserlagerung bestätigten diesen Verdacht auf drastische Weise. Bitumen muss bei solchen Haft-Versuchen das Gestein auch bei Lagerung im warmen Wasser (40 bis 60 °C) dauerhaft bedecken und darf sich möglichst nur an den Kanten etwas durchscheinend ablösen. Das Syntheseprodukt jedoch löste sich total vom Gestein und begann das Wasser sogar allmählich gelblich einzufärben.



Abbildung 26: Wasserlagerung eines mit propoxyliertem Lignin umhüllten Gesteinskornes

Mit diesem Ergebnis war klar geworden, dass das nahe geglaubte Ziel wieder in weite Entfernung gerückt war. Die Syntheseschritte mussten völlig neu konzipiert werden! Zweifellos waren aber die bisher gewonnenen Erkenntnisse wertvoll und als guter Teilerfolg einzuschätzen.

Herstellung von Ligninestern

Im vorherigen Abschnitt wurde die erfolgreiche Einführung funktioneller Gruppen mittels Propoxylierungsreaktionen beschrieben. Das Ziel, ein dem Erdölbitumen gleichwertiges Ersatzprodukt auf Ligninbasis auf diese Weise zu entwickeln war aber an den zu hydrophilen Eigenschaften der Syntheseprodukte gescheitert. Es war daher nahe liegend, die Lipophilie durch das Einführen langkettiger aliphatischer Kohlenwasserstoffe zu erhöhen.

Zunächst wurde unter Anwendung klassischer Labormethoden das Lignin mit Säurechlorid in Pyridin modifiziert. Mit Ölsäurechlorid, eingesetzt in einem mehrfach molaren Überschuss wurden mittlere Umsatzraten von 30 bis 70 % (je nach Lignin-Sorte) erzielt. Mittels Spektroskopie (ATR-IR, $^1\text{H-NMR}$ und $^{31}\text{P-NMR}$) wurde ein praktisch vollständiges Abreagieren der OH-Gruppen nachgewiesen, die gewünschte hohe Lipophilie, messbar an der Löslichkeit des Syntheseproduktes in Rapsöl, stellte sich aber nur bei einem einzigen Lignin-Typ ein. Grundsätzlich war ein Säurechlorid als Reagens nur von theoretischem

Interesse, in einem technologischen Maßstab wäre dessen Einsatz weder wirtschaftlich noch umweltverträglich genug.

Eine Veresterung der propoxylierten Lignine mit Säureanhydrid (zunächst Essigsäureanhydrid) im Überschuss in Pyridin verlief ebenfalls erfolgreich und mit besseren Umsätzen als die Säurechloridreaktion am Lignin selbst. Konkret werden dabei die endständigen OH-Gruppen der PO-Ketten sowie die Reste noch freier aliphatischer oder aromatischer Lignin-OH-Gruppen acetyliert. Die Umsätze waren fast vollständig und die Ausbeuten lagen zwischen 89 % und 97 %. Das vollständige Reagieren aller OH-Gruppen konnte mittels ^{31}P -NMR-Spektroskopie nachgewiesen werden. Einige PO-Lignine wurden auch partiell verestert, indem die Acetanhydridmengen auf 20, 60 und 70 % der theoretisch erforderlichen stöchiometrischen Menge reduziert wurden. Auch hier wurden noch hohe Umsätze zwischen 83 % und 93 % erzielt, ein Hinweis darauf, dass die Acetylierung mit Anhydrid recht unproblematisch abläuft. Die Verseifungszahl (VZ) der erhaltenen Acetate wurde nach Hydrolyse mit ethanolischer KOH durch Titration mit HCl bestimmt und es zeigte sich erwartungsgemäß eine Abnahme der VZ bei den unter-stöchiometrischen Ansätzen. Es ließ sich daraus ableiten, dass es bei der Aufarbeitung auch zu gewissen Fraktionierungseffekten kommt. Über ^1H -NMR-Spektroskopie konnte gezeigt werden, dass zunächst die PO-Ketten-OH reagieren und erst bei 1:1-stöchiometrischen Reagensmengen auch die noch freien Lignin-OH acetyliert werden.

In Bezug auf die Lipophilie der erhaltenen Produkte zeigte sich in keinem Fall eine Rapsöllöslichkeit der PO-Lignin-Acetate.

Die Veresterung mit C6-Säure (Capronsäure) unter saurer Katalyse mit p-Toluolsulfonsäure in Toluol brachte ebenfalls eine gute Ausbeute von 85 %, aber auch diese Produkte waren noch nicht in Rapsöl löslich.

Beim Einsatz längererkettiger C16 bis C18-Carbonsäuren wurden bei Umesterungsreaktionen sowohl in Masse als auch in Lösung nur relativ niedrige Ausbeuten von 15 bis 30 % erhalten und eine vollständige Rapsöllöslichkeit wurde ebenfalls nicht erreicht.

Ein erfolgreicher Ausgang in Sicht

In weiterer Folge wurden noch Reaktionsvarianten sowohl unter geänderten Reaktionsbedingungen als auch mit anderen Reagenzien durchgeführt. Auf der Basis der Erkenntnisse aus den Teilerfolgen, Fehlschlägen und vor allem auch aus den analytischen Untersuchungen konnte schlussendlich ein Lösungsweg gefunden werden, der im Labormaßstab einen hoffnungsvollen Ausblick auf einen Erfolg versprechenden Syntheseweg zulässt.

Bei diesen weiteren Reaktionsführungen konnten Produkte erhalten werden, die eine relativ niedrigviskose Konsistenz aufweisen. Es liegen noch keine großen Mengen vor, sodass die weiteren asphalttechnischen Erprobungen in einem eher ungewöhnlich kleinen Maßstab im Labor des Antragstellers durchgeführt werden müssen und diese Arbeiten zum Zeitpunkt der Berichtslegung auch noch nicht abgeschlossen worden sind. Sie werden außerhalb des

geförderten Projektteils durchgeführt. Aus diesem Grund und nicht zuletzt auch wegen der Vermeidung neuheitsschädlicher Offenlegungen sind diese Erkenntnisse nicht Gegenstand dieses publizierbaren Endberichtes.

4.2.2 Enzymatische Studien an Lignin (Laccasen) [30]

In der von Melina Riegler durchgeführten Diplomarbeit war das Ziel der Versuche, Magnesium-Lignosulfonat der Firma Lenzing auf biochemischem Weg zu modifizieren. Dazu wurde mit dem Enzym Laccase und parallel dazu mit zwei unterschiedlichen Pilzstämmen gearbeitet.

Die Verwendung von Laccase (gewonnen aus dem Pilz *Trametes pubescens* ohne anschließende Reinigung) wurde in mehreren Experimenten ausgetestet, wie sich die Ligninkonzentration und das Vorhandensein von Citratpuffer und HBT-Mediator in der Versuchslösung auf die Ergebnisse auswirken würden. Am besten geeignet stellte sich eine Ligninkonzentration von 1 % und der Verzicht auf Citratpuffer und HBT-Mediator heraus. Die Versuchsdauer betrug 48 Stunden. Das Ergebnis war eine Polymerisierung von Lignosulfonat, welche durch ein deutliches Ansteigen des Molekulargewichtes erkennbar wurde.

Bei den Versuchen mit Pilzen wurden eine Weißfäule (*Trametes pubescens* CBS 696.94 MB89) und eine Braunfäule (*Gloephyllum trabeum* CBS 900.73) verwendet. Es war zu erkennen, dass die Braunfäule zum Abbau bzw. zur Modifizierung von Lignosulfonat nicht geeignet war, deshalb wurden die weiteren Versuche nur mit dem Weißfäulepilz durchgeführt.

Auch hier wurden zunächst einige Parameter wie Lignosulfonatkonzentration und geeignete Zusammensetzung des Nährmediums für den Pilz ausgetestet. Als ideal stellte sich eine Gesamtkonzentration von 1 % Lignosulfonat in stickstoffarmem Nährmedium heraus. Die Bruttemperatur lag bei 28 °C und es wurde 7 Tage lang bebrütet, bevor die Zugabe von Lignosulfonat erfolgte. Der Versuch wurde über 2 Wochen lang beobachtet, wobei hier ebenfalls eine Polymerisierung des Lignosulfonats das Ergebnis war.

Es ist geplant, weitere Versuche zur Isolierung des modifizierten Lignosulfonats mittels Membranfiltration durchzuführen. Anschließend sollen seine chemischen Funktionalitäten bestimmt und eine Hydrophobierung auf enzymatischem Weg vorgenommen werden.

4.2.3 Nebenprodukte der Fischer-Tropsch-Konversionsverfahren (Güssing-Waschung)

In der von Bernhard Weillbuchner begonnenen Diplomarbeit war es das Ziel, einen Reststoff, der in der Gaswäsche der Biomassevergasungsanlage Güssing anfällt, zunächst zu isolieren, dann zu identifizieren und anschließend zu modifizieren, um diesen als Bitumenersatzstoff oder als Komponente davon zu verwenden.

Hierfür war es notwendig, den als Waschflüssigkeit verwendeten Rapsmethylester (RME) mit rund 70 % Anteil, abzutrennen. Dieser Vorgang erfolgte mittels Mitteldruckchromatographie

(MPLC), da dies durch Destillation nicht möglich war. Die einzelnen Fraktionen wurden mittels Gaschromatographie (GC-MS) analysiert. In der Aromatenfraktion fanden sich Naphthalin, Biphenyl, Acenaphtylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren und Pyren und in der RME-Fraktion die Methylester von Palmitinsäure (C16:0), Stearinsäure (C18:0), Ölsäure (C18:1), Arachinsäure (C20:0), Icosensäure (C20:1) und Behensäure (C22:0).

Zur Modifikation der Aromatenstruktur wurden anhand von Modellverbindungen Friedel-Crafts-Alkylierung, bzw. -Acylierungen über Anionenradikale durchgeführt. Als Reaktionspartner wurde in allen Fällen der bereits vorhandene Methylester verwendet. Die ersten Analyseergebnisse zeigten, dass eine Kopplung beider Komponenten stattfindet. In weiterer Folge sollte versucht werden, die Ausbeute zu steigern und weitere Modifikationen (z.B. Hydroxymethylierung) durchzuführen.

Nach Vorliegen eines guten Zwischenergebnisses wurde, wahrscheinlich aus privaten Gründen (Umzug in eine andere Stadt), die Arbeit an der Diplomarbeit auf unbestimmte Zeit unterbrochen und gemäß Auskunft des die Diplomarbeit leitenden Projektpartners 1, bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht mehr fortgesetzt.

4.2.4 Biopolyester

Für den Fall, dass die auf Lignin bezogenen Synthesen keinerlei gangbaren Wege aufzeigen sollten, wurden sowohl im Syntheselabor des Projektpartners 1 als auch im Labor des Antragstellers eine andere Syntheselinie begleitend durchgeführt. Nicht zuletzt ist auch vorgesehen, diese sehr interessante Stoffgruppe – die Synthesen verliefen in mehreren Fällen recht viel versprechend – auch als Zumischkomponente zu Ligninderivaten einzusetzen, sozusagen einen Bitumenersatzstoff-Cocktail herzustellen.

Es konnte dafür eine Nawaro-Basis gefunden werden, welche preislich durchaus als wirtschaftlich vertretbar angesehen werden kann. Allerdings ist die Auswahl an Möglichkeiten relativ niedrig und die absehbare Verfügbarkeit dieser Naturstoffe mit weltweit derzeit einigen Millionen Tonnen beschränkt. Als positiv ist hervorzuheben, dass derartige Synthesen bei relativ einfacher einstufiger Reaktionsführung durchgeführt werden können. Dafür ist ein Temperaturniveau ausreichend, das in der Zukunft durchaus auch mit thermischen Solaranlagen bereitgestellt werden könnte. Es wurden mittel- bis hochviskose hydrophobe Polykondensate erhalten, die sehr gut an Gesteinsmaterial haften und im Testzeitraum auch hinreichend wasserbeständig waren. Für eine Asphaltanwendung sind sie einsetzbar, wie die Laborversuche zeigten.

4.3 Ergebnisse der asphalttechnischen Erprobung der Syntheseprodukte

Dieses kurze Kapitel beschreibt in Grundzügen eine mögliche Erprobung der Syntheseprodukte im Sinne des Projektzieles, und soll zur Abrundung des Verständnisses dienen. Einerseits war die asphalttechnische Erprobung nicht mehr im geförderten Projektteil enthalten, weil der ursprünglich vorgesehene Förderungsumfang von der Förderstelle

eingeschränkt wurde. Diese Einschränkung hat sich, vom jetzigen Zeitpunkt aus betrachtet, als günstig und vorausblickend erwiesen. Für die asphalttechnischen Prüfungen sind grundsätzlich je Einzelversuch (beispielsweise für eine Prüfkörperherstellung) mindestens 500 g Mischgut aus Bindemittel und Gestein im Verhältnis von etwa 6 % zu 94 % erforderlich. Der Bindemittelbedarf liegt also bei rund 30 g je Versuch. Da die Syntheseoperationen vom Projektpartner 1 ausschließlich im Labormaßstab durchgeführt wurden und für die Vielzahl von hunderten Einzelsynthesen, die vor allem zur analytisch/spektroskopischen Aufklärung der Syntheseergebnisse notwendig gewesen sind, relativ kleine Ansätze im Ausmaß von 2 bis 20 g ausreichen, liegen nur kleine Stoffmengen vor. Von den vor allem in der Schlussphase Erfolg versprechenden Laboransätzen wurden mehrere gut reproduzierbare Wiederholungen gemacht, sodass für die asphalttechnischen Prüfungen derzeit Probemengen von einigen hundert Gramm zur Verfügung stehen. Es war ursprünglich geplant, einen Synthesereaktor für die Herstellung größerer Versuchsmengen im Rahmen dieses Projektes anzuschaffen. Die Anforderungen konnten aber nicht rechtzeitig genug definiert werden, daher konnte dieser Plan nicht weiter verfolgt werden.

Erste Versuche mit dem Bitumenersatzstoff haben ergeben, dass unter Wasserlagerungsbedingungen eine gute Haftung des Bindemittelüberzuges am Straßenbaugestein gegeben ist. Es konnte des weiteren bestätigt werden, dass eine gute Verträglichkeit mit den Zumischkomponenten für die vom Antragsteller entwickelte Reaktivasphalttechnologie (Kap. 2.5) besteht und dieses Kaltverfahren damit grundsätzlich ausführbar ist. Ob die resultierenden Asphalteigenschaften mit der Qualität der derzeitigen Erdölbitumen-basierenden Ausführungsformen konkurrieren können, kann nur ansatzweise in der nächsten Zeit bewertet werden. Dazu sind die vorhandenen Probemengen zu niedrig. Jedenfalls besteht die Möglichkeit, auf der Basis des in diesem geförderten Projekt geschaffenen Wissens in einer weiteren Forschungsarbeit, die primär auf die Vergrößerung der Syntheseproduktmengen ausgerichtet sein sollte, die Arbeiten fortzusetzen.

Im folgenden Kapitel 4.4 wird ein kurzer Einblick gegeben, wie sich in der praxisorientierten Forschungsarbeit des Antragstellers die Einsatzmengen nachwachsender Rohstoffe schon jetzt schrittweise steigern lassen.

4.4 Ergebnisse mit teilweisem Einsatz von Bitumenersatzstoffen in Asphaltbindemitteln

Kaum ein Bereich der Technik ist so ausgeprägt vom Erdöl und den daraus hergestellten Produkten (wie Bitumen) abhängig wie die Straßenbautechnik mit Asphalt. Der Antragsteller hat schon vor 20 Jahren die ersten Schritte gesetzt, diese Abhängigkeit zu verringern, wie die folgende Aufzählung von Entwicklungsmeilensteinen zeigt.

- 1992: Straßenbaubindemittel des Typs Fluxbitumen mit Rapsölzusatz
- 1992: Nawaro-haltiges Bindemittelsystemen für den Lagenverbund von Asphalt
- 1995: Grundprinzip der Reaktivasphalt-Technologie mit Nawaro-Zusätzen
- 1996: Markteinführung mehrerer Produkte der Reaktivasphalt-Technologie
- 1997: Markteinführung von Bitumenemulsionen mit Rapsölzusätzen

- 1997: Vorspritz-Asphaltfertiger zur Anwendung des „Nawaro-Lagenverbundes“
- 1998: Markteinführung der Reaktivasphaltprodukte im europäischen Ausland
- 2000: Markteinführung von Raps-Bitumenemulsionen in Deutschland
- 2001 bis 2012: Laufende Erweiterungen der Reaktivasphalt-Technologie und die Markteinführung von Asphalt-Serviceprodukten für verschiedene Anwendungen in zahlreichen europäischen Ländern und auf anderen Kontinenten

Waren anfangs nur einige Prozent nachwachsende Rohstoffe im Bindemittel dieser Baustoffgruppen enthalten, sind es mittlerweile bis zu 50 %. Es stammt also nur mehr die Hälfte des Bindemittels aus Erdöl, der Rest kommt aus erneuerbaren Quellen.

Im Folgenden wird eine Ausführungsform der Reaktivasphalt-Technologie beschrieben, die auch zur großflächigen Herstellung von Asphaltsschichten geeignet ist (siehe auch Kap. 3.2). Die Bauausführung erfolgt grundsätzlich kalt, das bedeutet einen erheblich niedrigeren Energieeinsatz im Vergleich zur derzeitigen Heißasphalt-Technologie. Es treten keine gasförmigen Emissionen auf, die Baumannschaft ist durch die Asphalttemperatur nicht belastet und keiner Verbrennungsgefahr ausgesetzt. Wie die folgenden Bilder zeigen, gibt es während des Einbaus dieser Asphaltsschicht tatsächlich keinerlei Dämpfe. In der Abbildung 27 wird eine einfache erste Einbaumethode mit einem etwa 1 Meter breiten „Prototyp-Kaltfertiger“, der im Zuge eines FFG-Projektes [20] schrittweise noch optimiert werden konnte, gezeigt. Das Mischgut muss nicht in einer stationären Mischanlage weitab von der Baustelle erzeugt werden, sondern das Mischen von Bindemittel und Gestein wird am Kaltfertiger durchgeführt. Die Asphaltsschicht wird eingebaut und bei Umgebungstemperatur endverdichtet. Die Kaltverdichtung ist durch die niedrige Bindemittelviskosität im Einbauzustand möglich. Rasch nach dem Einbauen nimmt die Viskosität stark zu, sodass das Befahren durch den fließenden Verkehr schon wenige Stunden danach möglich ist. Besonders an heißen Sommertagen ist im Gegensatz dazu beim Heißasphalteinbau das Befahren, bis die Bindemittelviskosität durch Abkühlen hinreichend angestiegen ist, erst nach bis zu einem Tag möglich, sodass häufig lange Sperrzeiten den Verkehrsfluss stark beeinträchtigen.

Moderne gebrauchsvorhaltensorientierte Prüfverfahren (GVO-Ansatz gemäß ÖNORM B 3580-2 [31]) bescheinigen dem Reaktivasphalt-Mischgut eine hervorragende Leistungsfähigkeit, sowohl in Bezug auf die Wärmestandfestigkeit als auch das Verhalten bei tiefen Temperaturen. Das günstige Ermüdungsverhalten ermöglicht auch den Einsatz für dünne Deckschichten, an deren Bindemittel erfahrungsgemäß besonders hohe Anforderungen gestellt werden. In einem Prüfbericht wird dies, wie folgt, bestätigt.



Abbildung 27: Einbaubeispiel zur Reaktivasphalt-Technologie

Zitate aus einem Prüfbericht (Februar 2010) zu „Zyklische triaxiale Druckschwellprüfung“: „Die ausgewerteten Proben weisen eine Kriechrate f_c von rund $0,15 \mu\text{m}/\text{m}/\text{n}$ (=Normlastwechsel) gemäß ÖNORM...auf und entsprechen somit der höchsten Anforderungskategorie, die die europäische Normung zur Verfügung stellt.“ Oder zu „Kornverlustprüfung = kantabrischer Test“: „Der Mittelwert des Kornverlustes beträgt 7 % ...die geforderten Klassen für eine offenporigen Asphalt werden erreicht und würden den Anforderungen bei weitem genügen.“



Abbildung 28: Zustand einer Gemeindestraße vor und nach Einbau der Reaktivasphalt-Deckschicht (nach einer Liegezeit von 2 Winterperioden)

Die Leistungsfähigkeit der Reaktivasphalt-Technologie wird durch die Abbildung 28 gut dokumentiert. In einer Siedlungsstraße mit sehr schlechtem Erhaltungszustand wurde im Zuge des Entwicklungsprojektes eine Erhaltungsdeckschicht aus Reaktivasphalt aufgebracht. Nach 2 Winterperioden ist der Zustand praktisch noch immer fehlerfrei, das Erhaltungsziel wurde also optimal erreicht.

5 Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

5.1 Einpassung in die Programmlinie

Dieses Projekt ist klar in den Zielbereich „Nutzung Nachwachsender Rohstoffe, die Ressourcen von morgen“ einzustufen und ist ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt des Bereiches Industrielle Forschung mit dem Trend zur experimentellen Entwicklung. In Anbetracht der bisherigen Ausrichtung des Bereiches Asphaltstraßenbau auf ausschließlich fossile Rohstoffe haftet dem Projekt auch ein Grundlagenforschungsaspekt an, denn es wurden grundlegend die Verfügbarkeiten nachwachsender Rohstoffe analysiert und diese Informationen können eine gute Basis für weitere Forschungsansätze liefern.

Von den 7 Leitprinzipien wird in erster Linie der „Nachhaltigen Entwicklung“ und der „Nutzung erneuerbarer Ressourcen“ entsprochen, wobei auch das „Effizienzprinzip“ aufgrund energiesparsamer Ausführungsvarianten bei gleichzeitig erfüllbarer „Rezyklierungsfähigkeit“ nicht zu kurz kommen.

5.2 Umsetzungspotentiale und Demonstrationsvorhaben

Zielgruppe für dieses Projekt ist in erster Linie der öffentliche Auftraggeber, denn es geht im weiteren Sinn um das Thema Straßenbau. Die Straßen eines Landes stellen ein beträchtliches Volksvermögen dar, deren Erhaltung in einem guten Nutzungszustand beträchtliche Kosten verursachen. Der Verfall eines gut ausgebauten Straßennetzes hätte schwerwiegende Folgen für die Wirtschaftskraft eines Landes und die Möglichkeiten der Bevölkerung, miteinander in direkten Kontakt zu treten. Straßen sind seit jeher die Lebensadern der Gesellschaft. Nachdem der viel zitierte „Peak Oil“ wahrscheinlich schon vor wenigen Jahren überschritten worden ist, wird nicht nur der Kostendruck auf die Straßenerhaltungsbudgets zunehmend größer sondern es sinkt auch die Verfügbarkeit der Baustoffe dafür, wie Bitumen. Schon in der Antragsphase wurde daher eine Landesstraßenverwaltung in das Forschungsvorhaben einbezogen. Insbesondere die ersten praktischen Ergebnisse wurden mit Interesse zur Kenntnis genommen und es wurde dem Antragsteller signalisiert, alle Möglichkeiten zur Erprobung einer neuen zukunftsweisenden Technologie zu bieten und derartige Vorhaben zu unterstützen. Zum gegebenen Zeitpunkt sind auch Straßenbaufirmen und Bitumenlieferanten als Zielgruppen anzusehen und sie müssen durch die Bereitstellung geeigneter technischer Verfahren für die Verarbeitung neuer erdölfreier Bindemittel sorgen. Schließlich werden auch die Erdölraffinerien als Produktionsstätten weltweit agierender Konzerne vom Versiegen der Rohstoffquellen unmittelbar betroffen sein und zur Zielgruppe für die Beschaffung nachwachsender Ersatzstoffe werden. Allerdings wird noch einige Zeit vergehen, bis es so weit ist!

Die Betreiber von Anlagen für die stoffliche oder energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, wie Bioraffinerien, BtL-Anlagen, Biotreibstoffhersteller der 2. Generation und viele andere werden ebenfalls zu einer Zielgruppe für die Bitumenersatzstoff-Produktion

avancieren. Denn gerade in diesen Anlagen fallen derzeit schon große Mengen an brauchbaren Stoffen an, die aber in der Regel bisher rein energetisch genutzt werden.

Die Umsetzungspotentiale wären extrem hoch, wenngleich jetzt die Zeit noch nicht reif ist, ernsthaft darüber nachzudenken. Es ist eine bekannte Tatsache, dass selbst in Zeiten der weltweit intensiven Diskussionen zum Thema Klimawandel nur wenige Staaten bereit und fähig sind, sich der Tatsache des dringenden Handlungsbedarfs zu stellen, obwohl Unwetter und klimabedingte Naturkatastrophen auf gravierende Veränderungen in der Weltklimasituation hinweisen. Solange die fossilen Quellen noch sprudeln, werden sich Konzerne nicht um Bitumenersatzstoffe ernsthaft kümmern. Da technologische Umstellungen aber eine lange Zeit erfordern, kann nicht früh genug damit begonnen werden, über Ersatztechnologien nachzudenken. So hat es auch viele Jahrzehnte gedauert, bis die moderne Erdölwirtschaft die Industrie revolutioniert hat und zur Grundlage der reichen Industriegesellschaft geworden ist. Mit einem Aufwärtstrend konnte die Menschheit schon immer gut umgehen. Ein Abwärtstrend ist aber die größere Herausforderung! Schon lange bevor bestimmte Rohstoffquellen erschöpft sind, muss der spätere Umgang mit diesem Mangel „eingeleitet“ werden: Jetzt!

Demonstrationsvorhaben für die Machbarkeit des teilweisen Bitumenersatzes wurden in den vergangenen 2 Jahrzehnten vom Antragsteller schon im umfangreichen Ausmaß betrieben und Rapsasphalt und Reaktivasphalt kamen dadurch rasch zur Marktreife und sind mittlerweile Stand der Technik. Auch die Testbaustelle gemäß Abbildung 28 kann als Demonstration der Machbarkeit des bisher möglichen teilweisen Bitumenersatzes angesehen werden.

Der neue Denkansatz eines vollständigen Bitumenersatzes durch nachwachsende Alternativen hingegen ist noch nicht öffentlich demonstrierbar, denn es fehlen dafür die Stoffmengen. Eine technologische Zwischenstufe zur Schaffung größerer Produktmengen muss vorher noch erfolgreich umgesetzt werden!

6 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

6.1 Erkenntnisse für das Projektteam

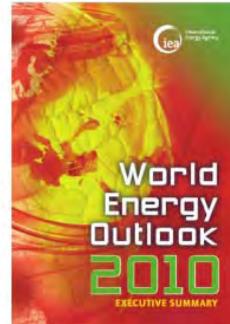
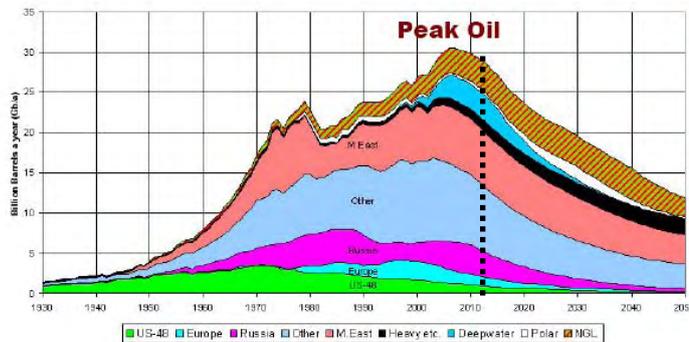
Die Erkenntnisse nach einer mehrjährigen Forschungsarbeit sind für die Projektmitarbeiter vielfältig. Je nach Art der durchgeführten Arbeiten sind die Sichtweisen und Erkenntnisse verschiedenartig. Für das Projektteam 2, das sich mit der Erhebung der verfügbaren Nawaro-Quellen befasst hatte, war es sicher bemerkenswert, dass die weltweit unmittelbar genutzten nachwachsenden Stoffe in einer dem Erdölkonsum größenordnungsmäßig ähnlichen Menge anfallen (Kap. 4.1.1). Für das Projektteam 1, das mit dem synthesechemischen Auftrag den umfangreichen Hauptteil der Projektarbeit zu leisten hatte, gab es eine Fülle von Erkenntnissen und nicht zuletzt auch Überraschungen. Das intensive Befassen mit chemischen Reaktionen am „Naturstofffragment Lignin“ führte zu vielen grundsätzlich neuen Erfahrungen. Die Verschiedenartigkeit des Reaktionsverhaltens der auf unterschiedlichem Wege gewonnenen Lignine ging über die ursprünglichen Erwartungen

hinaus, erklärt aber auch, warum Lignin bisher noch immer vorwiegend energetisch genutzt wird (Verbrennen zur Energiegewinnung in den Zellstofffabriken) und nur im untergeordneten Ausmaß stofflich. In der Analyse der Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte konnten sehr wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, vor allem was die Bedeutung der Verteilung der synthesechemisch eingeführten funktionellen Gruppen auf die resultierenden Eigenschaften, wie hydrophile/lipophile-Balance sowie rheologische Eigenschaften anbelangt. Wie wichtig es ist, in jeder Phase der Synthesearbeit das erklärte Projektziel im Auge zu behalten, fällt auch unter wichtige Erkenntnisse bei dieser Forschungsarbeit, denn Umwege kosten Zeit.

Für das Team des Antragstellers war es absolut überraschend, wie klein die Auswahl an Nawaro-Quellen ist, die für eine Massenanwendung zur Verfügung steht. Um Bitumen weltweit zu kompensieren kann eigentlich nur die Gruppe der holzartigen Stoffe die erforderlichen Mengen decken. Aber gerade diese Gruppe hat materialchemisch vorwiegend hydrophilen Charakter, die freie Bewitterung erfordert aber unbedingt lipophile Eigenschaften. Es wären eigentlich die Öl oder Harz liefernden Pflanzen am interessantesten, die aber mengenmäßig bei weitem nicht ausreichen. Es wäre nahe liegend, wenn Bitumen als Bindemittel für Asphaltstraßen nicht mehr zur Verfügung steht, an deren Stelle nur mehr Betonstraßen zu bauen! Die folgende Schätzung bringt aber eine überraschende Erkenntnis. Beton erfordert grundsätzlich dickere Schichten als Asphalt, um durch sein starres Verhalten eine Mindesttragfähigkeit zu erreichen. Anstelle von 10 Millionen Tonnen Asphalt (nur für Österreich!) würde man etwa 20 Millionen Tonnen Beton jährlich verbrauchen. Der Zementgehalt eines dafür geeigneten Betons beträgt etwa 15 M-%, was rund 3 Millionen Tonnen Zement jährlich zusätzlich erfordern würde. Die Herstellung von Zement benötigt relativ viel Energie und es wird beim „Zementbrennen“ auch direkt CO₂ aus dem Ausgangsgestein (Kalk) frei, sodass je Tonne Zement rund 700 kg CO₂-Emission verursacht werden. Beim Umsteigen von Asphalt auf Beton als Straßenbaustoff würden demzufolge zusätzlich rund 2 Millionen Tonnen Kohlendioxid alleine jährlich in Österreich anfallen.

Generell wurde in dieser Projektarbeit das Bewusstsein vertieft, welche Herausforderung es für die menschliche Gesellschaft sein wird, innerhalb der nächsten 50 Jahre schrittweise auf das Erdöl verzichten zu müssen. Die folgende Abbildung 29 [32] veranschaulicht unseren Ölbestand in Vergangenheit und Zukunft, die punktierte schwarze Linie kennzeichnet das Jahr 2012. Einschätzungen zufolge wird derzeit Erdöl zu 90 % als Energiequelle (Treibstoff für Verkehr zu Land, Wasser und Luft, Brennstoff für die kalorische Stromerzeugung und für Heizzwecke) und nur zu 10 % als Rohstoffquelle (Kunststoffe und Chemikalien, Bitumen) genutzt. Die Kompensation des Erdöls durch Nawaros kann sich für die 10 % der stofflichen Nutzung durchaus ausgehen. Keinesfalls aber ist es realistisch, die 90 % Erdöl für die energetische Nutzung auch noch vollständig durch Nawaros zu ersetzen!

97 % dependence of transport on fossil fuels & increasing scarcity



Quelle: Uppsala Hydrocarbon Depletion Study Group, 2009

... Crude oil output reaches an undulating plateau of around 68-69 mb/d by 2020, but never regains its all-time peak of 70 mb/d reached in 2006, while production of natural gas liquids (NGLs) and unconventional oil grows strongly.

Quelle: World Energy Outlook 2010/ International Energy Agency

Abbildung 29: Weltweite Erdölvorräte – vor und nach 2012

Die energetische Nutzung fossiler Rohstoffe birgt generell die große Gefahr der Zerstörung des Klima-Gleichgewichtes (Stichwort Klimawandel). Es wäre auch inkonsequent, anstelle von Erdöl Kohle und Erdgas oder Methanhydrat in der Zukunft vermehrt einzusetzen, den Energiekonsum also weiterhin im bisherigen Ausmaß aus fossilen Quellen aufrecht zu erhalten. Fossile Energie zu nutzen heißt nichts anderes, als Sonnenenergie, die vor Jahrmillionen über eine Zeitperiode von Jahrtausenden bis Jahrmillionen von der Biosphäre „deponiert“ wurde, aus dem Depot zu holen und zeitgerafft innerhalb von wenigen Jahrhunderten (wie eben jetzt in den letzten 2 Jahrhunderten) zu verbrauchen. Es ist nicht verwunderlich, dass dadurch ein stabiles natürliches Gleichgewicht in der Biosphäre und Atmosphäre gestört wird. Von 1960 bis 2010 hat sich der jährliche Erdölkonsum vervierfacht. Es ist bekannt, dass die Entropie (anschaulich definiert als „Maß für Unordnung“) bei jedem (irreversiblen) Verbrennungsvorgang zunimmt und nur lebendige (biologische, reversible) Prozesse in der Lage sind, die Unordnung nicht zu erhöhen sondern die Ordnung aufrechtzuerhalten. Alleine die Sonnenenergie, die laufend auf die Erdoberfläche einstrahlt ist im Gleichgewicht mit der Biosphäre. Nur jene Energie zu nutzen, die momentan einstrahlt, ist umweltverträglich, Kurzzeitspeicher (1 Jahreszyklus) mit eingeschlossen. Aber auch nur einen kleinen Teil der über Millionen Jahre eingesammelten Sonnenenergie binnen weniger hundert Jahre (wieder) in Wärme zu verwandeln, entspricht dem Einsturz der Staumauer eines Speicherkraftwerkes – mit allen seinen negativen Auswirkungen auf das vorher intakte

idyllische Flussbett. Es ist übrigens egal, ob die Energie aus fossiler oder nuklearer Quelle stammt, ein über das natürlicher Ausmaß hinausgehender zeitgeraffter Energiekonsum wird Schäden anrichten, deren Reparatur viel Zeit braucht.

Schlussendlich resultiert als tiefste Erkenntnis aus diesem im weitesten Sinne umweltorientierten Projekt: Es ist höchste Zeit, den Energiehunger der Menschheit (sofort!) auf das Maß zurückzuschrauben, das uns die Sonneneinstrahlung gewährt. Vielleicht ist es noch zulässig und hilfreich, mit fossilen Energieträgern eine „Kreislaufwirtschaft“ aus Ernten, Speichern, Verteilen und Verbrauchen für nachhaltige Energie in Gang zu bringen, aber der Kreislauf muss ehest möglich ohne jeden Zugriff auf fossile Speicher funktionieren. Das Tröstliche dabei ist, es ist genügend Energie vorhanden: Die jährliche Sonneneinstrahlung liegt bei $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh, der Bedarf bei $1,4 \cdot 10^{14}$ kWh. Der „Überschuss“ ist also zehntausendfach [33] und die Sonne liefert in etwa 3 Stunden auf die beladete Erdoberfläche die Energiemenge für den Jahresbedarf der Menschheit ($1,4 \cdot 10^{14}$ kWh Energiebedarf / $150 \cdot 10^6$ km² Landfläche = etwa 1 kWh/m² und Jahr).

6.2 Weiterarbeit mit den Projektergebnissen

Der Antragsteller wird auf der Basis bisheriger Erkenntnisse wie Reaktivasphalttechnologie, den Anteil an Nawaros als Rohstoffalternative zu Bitumen weiter vergrößern. Obwohl bekannt ist, dass die derzeit dafür genutzten Quellen unter dem Aspekt einer weltweiten Verwendung nicht annähernd ausreichend wären, ist es ein Schritt in die passende Richtung. Vor allem die energiesparsame Einbautechnologie öffnet den Weg zum „nachhaltigen Asphaltieren“. Für eine Wettbewerbsfähigkeit des „nachhaltigen Neuen“ ist die Bereitschaft der (zumeist öffentlichen) Auftraggeber Voraussetzung, bei Ausschreibung und Vergabe dafür die Tür zu öffnen. Die rechtliche Grundlage dafür wäre schon vorhanden (siehe Anhang). Das „Herkömmliche“ ist zumeist das preisgünstigere Produkt oder Verfahren. Daher ist es für ein forschendes Unternehmen mehrfach schwer. Es müssen die Kosten für die Entwicklung getragen werden und der Rückfluss der finanziellen Ausgaben scheitert am harten Wettbewerb mit der arrivierten alten Technologie.

Eine Partnersuche für Kooperationen am Sektor ligninhaltiger Rohstoffe und deren weitere Anpassung an den neuen Verwendungszweck wurde schon vor 2 Jahren eingeleitet. Man findet rasch einen Partner, der bereit ist, das Wissen aus Forschungsprojekten interessiert entgegen zu nehmen. Es wird schon erheblich schwieriger, dafür eine vertragliche Kooperationsvereinbarung abzuschließen, die beidseitige Interessen berücksichtigt. Vor allem dann, wenn der Kooperationspartner Teil eines umsatzschweren Konzerns ist. Als Umsetzungspartner für eine neue Technologie mit nachwachsenden Rohstoffen kommen nur kapitalstarke Unternehmen in Frage, die bereit sind, einen langsamen Rückfluss eingesetzter Mittel zu akzeptieren. Derartige Unternehmen findet man nicht wie Sand am Meer.

7 Ausblick und Empfehlungen

Während einer mehrjährigen Projektarbeit verfolgt man mit erhöhter Aufmerksamkeit einschlägige Fachpublikationen, Nachrichten und andere Medienberichte. Man erkennt daran häufig den Trend der Zeit und es hat sich gezeigt, dass weltweit über diese oder eine ähnliche Thematik dieses Projektes nachgedacht wird, wenngleich auch im Vergleich zur derzeitigen Energiediskussionen im untergeordneten Maßstab. Es ist aber nahe liegend, ähnlich wie es bei der Nutzung des Erdöls der Fall war, auch bei der künftigen Nutzung von Nawaros die energetischen und stofflichen Szenarien zu verbinden. Nach einer Phase zum Teil an den Haaren herbeigezogener „Tank-Teller-Diskussionen“ hat sich auf der Ebene der alternativen Treibstoffbereitstellung aus Nawaros der „Biosprit der 2. Generation“ gegen den früheren Ansatz der direkten Nutzung von Wertstoffen für die Mensch- und Tierernährung, wie die Herstellung von Bioethanol aus Zucker oder Stärke, durchgesetzt. In jüngster Zeit gibt es dazu populärwissenschaftliche Medienberichte in Zeitungen [34] sowie in Chemie-Reporten [35]. Mit den Pflanzenrestmassen steht Cellulose als Sonnenenergie-speicherndes Polysaccharid in riesigen Mengen zur Verfügung und es kann mit den Mitteln fortschrittlicher Biotechnologie zu vergärbaren Zuckern gespalten werden. Dass dabei Konzerne auf das Fachwissen österreichischer Forschungspartner (wie Acib) zurückgreifen ist interessant und beachtenswert. Im Juli 2012 ist in Bayern die aus dieser Kooperation herausgewachsene Bioraffinerie-Pilotanlage in Betrieb gegangen und wird neben Bioethanol auch ligninhaltige Nebenprodukte liefern, einen möglichen Rohstoff für ein Bitumenersatzprodukt (die Parallele zu Benzin und Bitumen liegt auf der Hand). Für Österreich geht man von einem Getreidestrohanfall von 1,8 Millionen Tonnen aus, für Europa schätzt man das Potential auf 400 Millionen Tonnen. Zwei Drittel davon könnten für die Biotechnologie abgezweigt werden. Bei einem Gehalt von 20 % Lignin würden diese rund 50 Millionen Tonnen wohl ausreichen, als Ersatzstoff für den europäischen Bitumenbedarf von 16 Millionen Tonnen die Basis zu bilden.

Auch ein GESTRATA-Fachvortrag [32] setzt sich mit der Zukunftsthematik „Bitumenersatz“ auseinander und stellt Holz als eine der möglichen Quellen vor, wie die folgende Abbildung 30 zeigt. Diesem Denkansatz liegt zwar kein biotechnologisch gewonnenes Ausgangsmaterial wie vorher erwähnt zugrunde, sondern ein klassischer Pyrolyseprozess. Überhaupt wird die „Trockene Destillation“ oder „Hydrothermale Konversion“ biogener Rohstoffe als Zukunftstechnologie heute viel diskutiert und sie hatte im Prinzip in der „Holzvergaser-Technik“ seinen technischen Vorfahren.

Originell anmutend ist auch eine Meldung aus den USA [36], die davon berichtet, dass erfolgreich ein Asphaltbindemittel aus Schweinegülle hergestellt wurde und der Asphalt gar nicht danach riecht. Auch hier liegt eine thermische Behandlung des biogenen Abfallstoffes unter Druck zugrunde.

Dieser kurze Ausblick zeigt, dass die Endlichkeit von Bitumen nach dem Erdölzeitalter wohl diskutiert und ansatzweise auch beforscht wird. Über einzelne Versuchsstrecken gehen die Erfahrungen bisher nicht hinaus, zeigen aber die grundsätzliche Machbarkeit auf.

Hauptsächlich wird der technische Pyrolyseansatz verfolgt, der ein Vielstoffgemisch liefert, das aus nebeneinander ablaufenden chemischen Abbau- und Aufbaureaktionen entsteht. Insofern ergänzen sie sich mit dem gegenständlichen Forschungsprojekt, dessen Schwerpunkt auf einer möglichst genau definierten synthesechemischen Basis beruht.

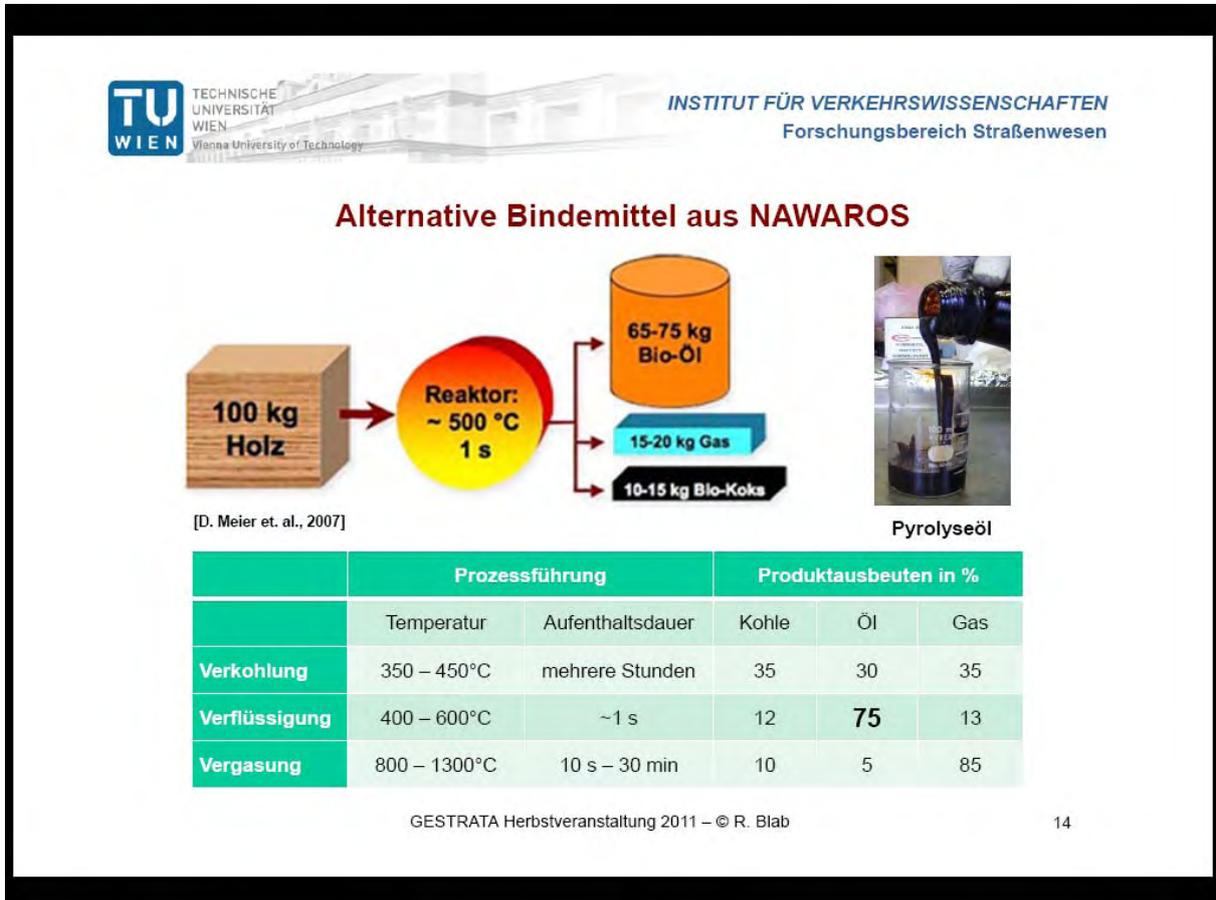


Abbildung 30: Alternative Bindemittel aus der Nawaro-Quelle Holz

Es ist durchaus denkbar, dass eine Kombination beider Ansatzrichtungen zu neuen Erkenntnissen führt und sich daraus besonders wirtschaftliche Gewinnungsmethoden ableiten lassen.

Eine weitere aktive praxisbezogene Forschung zum Thema „Bitumenersatzstoffe nach dem Erdölzeitalter“ ist weiterhin empfehlenswert, denn Straßen werden auch in ferner Zukunft noch die bedeutendsten Verkehrswege darstellen, da sie der natürlichen Fortbewegungsart des Menschen am besten entsprechen. Einen preiswerteren Baustoff als Asphalt, ein Gemisch aus Naturgestein und einem organischen Bindemittel, wird es auch in Hinkunft dafür nicht geben.

8 Literatur- und Abbildungsverzeichnis

8.1 Literaturverzeichnis

- [1] SPIEGL M. et al., „Bitumenhaltige Bindemittel“, Asphalt Handbuch, 4. Auflage Jänner 2010, GESTRATA-Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt, Kap. 1, Seite 17 ff
- [2] MÜLLER W. et al., „Asphalt im Straßenbau“, Asphalt Handbuch, 4. Auflage Jänner 2010, GESTRATA-Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt, Kap. 4, Seite 139 ff
- [3] WEIXLBAUM M. et al., „Asphalt-Erzeugung und Einbau“, Asphalt Handbuch, 4. Auflage Jänner 2010, GESTRATA-Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt, Kap. 5, Seite 219 ff
- [4] www.fabrikderzukunft.at/diashow/wettbewerb-nawaro/index.htm (Abgerufen 2012-09-20; 11:02)
- [5] GOODWIN Kevin, British Petrol, „Die Rückkehr der Kohle“, Chemie Report.AT, 5/2012, Seite 29
- [6] SPIEGL M. et al., „Alterungsbeständigkeit von Straßenbaubitumen“, Gestrata Journal Ausgabe 120, 2/2008, Seite 12-26
- [7] www.gestrata.at/publikationen/archiv-beitraege/gestrata-journal-128/asphalt-2010-2013-regelungen-fur-prufung-abrechnung (Abgerufen 2012-09-20; 11:04)
- [8] WAGNER M., „Fischer-Tropsch Paraffin modifizierte Bitumen und Asphaltbetone“, Gestrata Journal Ausgabe 119, 1/2008, Seite 19
- [9] Vegecol Produktinformation Ausgabe 2006, COLAS Gratkorn
- [10] www.shell.com/home/content/bitumen/products/shell_floraphalte/ (Abgerufen 2012-09-20; 11:07)
- [11] www.ecopave.com.au/ (Abgerufen 2012-09-20; 11:08)
- [12] VASILJEVIC A. et al., „Bauliche Erhaltung von Asphaltstraßen“, ASPHALT HANDBUCH, 4. Auflage Jänner 2010, GESTRATA-Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt, Kap. 8, Seite 319 ff
- [13] BLEIER J., „Rapsöl im Straßenbau – 17 Jahre Bewährung in Österreich“, Pflanzenöl, Ausgabe 1/2009, Seite 17-19
- [14] www.rephalt.com (Abgerufen 2012-09-20; 11:12)
- [15] BLEIER J., Synthese von Biopolyestern“, unveröffentlichte Laborberichte 2008
- [16] KNAUS S, persönliche Mitteilung bei Projektbesprechung, 03.05.2011
- [17] DAUTEFENDIC D. „Untersuchung der Eignung von chemisch modifizierten Ligninen als Bitumenersatzprodukt“, Dissertation am Institut für Angewandte Synthesechemie, TU-Wien, 2012

- [18] WEILBUCHNER B., „BtL-Waschflüssigkeit Güssing, Identifizierung und Friedel-Crafts-Reaktionen“, Zwischenbericht zu nicht fertig gestellter Diplomarbeit, Institut für Angewandte Synthesechemie, TU-Wien, 2010
- [19] RIEGLER M., „Biotechnologische Modifizierung von Industriellen Lignosulfonaten“, Diplomarbeit (in Arbeit) am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU-Wien 2011
- [20] BRUCKBAUER A., „Entwicklung und technische Umsetzung eines kalt einbaubaren, jedoch standfesten Asphaltverschleißbelages“, FFG-Projekt Nr. 827913, Mai 2010 bis Dezember 2011
- [21] www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/Wirtschaftspolitik/oeffentliche-auftraege,did=190676.html?view=renderPrint (Abgerufen 2012-09-20; 11:16)
- [22] CARMEN-Studie, unveröffentlichte Studie, Biobit CAR_3_Rohstofftabelle 20Mrz2009
- [23] EUROBITUME „European Bitumen Consumption 2009“, Quelle: Europäisches Normungsgremium CEN TC 336, Download 3. Juni 2011
- [24] <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdoberfl%C3%A4che> (Abgerufen 2012-09-20; 11:18)
- [25] BARISKA M., Vorlesung „Holzkunde II-Holzchemie“, ETH Zürich, 2001
- [26] ANKERHOLM M. et al., „The Oriented Structure of Lignin and its Viscoelastic Properties...“, *Holzforschung* 57/2003, S 459-465
- [27] PULS J., Fachvortrag „Stoffliche Nutzung von Lignin“, Berlin, 10. März 2009]
- [28] GLASSER W. et al. „Engineering Plastics from Lignin II Characterisation of Hydroxyalkyl Lignin Derivatives“, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 29, 1815 ff
- [29] BLEIER J., www.anton-paar.com/Suche/5_Corporate_de#Applikationsbericht@Documents@2@3 „Angewandte Rheologie zur Qualitätssicherung von Straßenbaubitumen (Vialit), 2009
- [30] RIEGLER M. et al. "Biotechnological Modification of Industrial Lignosulfonates"; Poster: 10th Austrian Polymer Meeting and 2nd Joint Austrian-Slovenian Polymer Meeting 2010, Leoben; 2010-09-08 - 2010-09-10; in: "Book of Abstracts", (2010), 118 - 119.
- [31] ÖNORM B 3582-2:2007 Asphaltmischgut-Mischgutanforderungen-Asphaltbeton-Fundamentaler Ansatz-Regeln zur Umsetzung der EN 13108-1
- [32] BLAB R., Vortrag bei Gestrata-Herbstveranstaltung November 2011
- [33] <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenenergie> (Abgerufen 2012-09-20; 11:20)
- [34] AUMÜLLER S., „Nichts als Stroh im Tank“, *Der Standard, Forschung Spezial*, 5. September 2012, Seite 16
- [35] SACHS G. „Frischer Wind in die Wirtschaftskette“, *Chemie Report.AT*, 5/2012, Seite 18 f
- [36] www.theatlantic.com/magazine/archive/2010/11/road-hogs/308252/ (Abgerufen 2012-09-20; 11:19)

8.2 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Beispiele von Asphaltbohrkernen aus Straßen unterschiedlicher Belastungskategorien
- Abbildung 2: Preisentwicklung von Bitumen in den Jahren 2004 bis 2012 in Österreich
- Abbildung 3: Verzögerung der Bitumenalterung durch Rapsölzusätze
- Abbildung 4: Asphaltprobekörper mit einem Nawaro-basierenden Polymer als Bindemittel
- Abbildung 5: Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe
- Abbildung 6: Diagramm-Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe, Skalierung 4 Milliarden Tonnen
- Abbildung 7: Diagramm-Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe, Skalierung 600 Millionen Tonnen
- Abbildung 8: Diagramm-Darstellung der Menge jährlich nachwachsender Rohstoffe, Skalierung 250 Millionen Tonnen
- Abbildung 9: Globale Flächenverhältnisse – Quelle: Wikipedia
- Abbildung 10: Tabelle zur Zusammensetzung einiger Holzarten
- Abbildung 11: Struktureller Aufbau von holzartigen Pflanzen
- Abbildung 12: Ligningrundbausteine
- Abbildung 13: Lignin-Strukturmodelle aus Fichten- und Buchenholz
- Abbildung 14: Beschreibung der Synthese-Ausgangsprodukte
- Abbildung 15: ATR-IR-Spektren der unterschiedlichen Lignin-Rohstoffe
- Abbildung 16: Molare Anteile der funktionellen Gruppen der Lignin-Rohstoffe
- Abbildung 17: ^{31}P -NMR-Spektren der Lignin-Rohstoffe (außer LS)
- Abbildung 18: Schematische Darstellung der Propoxylierung von Lignin
- Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung der Reaktionsumsätze/Ausbeuten bei der Propoxylierung des Lignins
- Abbildung 20: ATR-IR-Spektrum von PB und PB-PO-1
- Abbildung 21: ^{31}P -NMR-Spektren von PB und PB-PO-1
- Abbildung 22: OH-Zahlen der in Masse propoxylierten Lignine
- Abbildung 23: Rheologisches Diagramm, Bitumen im Vergleich zu propoxyliertem Lignin
- Abbildung 24: Konsistenz der propoxylierten Lignine anhand des Kennwertes „ERK-Rheo“ und dessen Korrelation zum PO-Kettenlänge n_{stat} / OH-Zahl-Quotienten
- Abbildung 25: ERK-Rheo in Abhängigkeit vom Ausmaß der „Integralabweichung“ (A)
- Abbildung 26: Wasserlagerung eines mit propoxyliertem Lignin umhüllten Gesteinskornes

- Abbildung 27: Einbaubeispiel zur Reaktivasphalt-Technologie
- Abbildung 28: Zustand einer Gemeindestraße vor und nach Einbau der Reaktivasphalt-Deckschicht (nach einer Liegezeit von 2 Winterperioden)
- Abbildung 29: Weltweite Erdölvorräte – vor und nach 2012
- Abbildung 30: Alternative Bindemittel aus der Nawaro-Quelle Holz

9 Anhang

Information zum Vergabeverfahren unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit

Von Mag. Norbert Wangler, Vialit Asphalt GmbH & CoKG, August 2012

Die Europäische Kommission hat schon vor Jahren klargestellt, dass das Gemeinschaftsrecht öffentlichen Auftraggebern, die bei der Vergabe von Aufträgen Umweltbelange berücksichtigen möchten, zahlreiche Möglichkeiten hierzu lässt ("Leitlinien der Europäischen Kommission für ein umweltgerechtes Vergabewesen"). Umweltbelange können auf jeder Stufe eines Vergabeverfahrens einbezogen werden. Da öffentliche Auftraggeber in der Europäischen Union jährlich Aufträge im Wert von über einer Milliarde Euro (14 % des BIP in der EU) vergeben, könnte eine umweltbewusste Gestaltung der Beschaffungspolitik einen beträchtlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten.

Die öffentlichen Auftraggeber wurden von der Umweltkommissarin Margot Wallström 2001 ausdrücklich dazu aufgefordert, die in ihrer Mitteilung beschriebenen Möglichkeiten zu nutzen. Es könne dadurch sichergestellt werden, dass Einsparungen, die durch den Kauf energiesparender oder recyclingfähiger Güter erzielt werden, der Allgemeinheit zu Gute kommen und eine umweltbewusste Gestaltung der Beschaffungspolitik zur Verbesserung der Umweltsituation beitragen kann (Kampf gegen den Klimawandel, Verbesserungen in der Abfallwirtschaft).

Bezugnahme auf Umweltkriterien:

Bei der Festlegung des Auftragsgegenstandes beispielsweise kann sich der öffentliche Auftraggeber, ebenso wie der Private, dafür entscheiden, umweltfreundliche Produkte oder Dienste zu erwerben, die nach ihrer Umweltleistung definiert sind.

In ähnlicher Weise kann der öffentliche Auftraggeber die Rohstoffe und die Produktionsverfahren bestimmen, die im Rahmen des Auftrags einzusetzen sind. Ein Auftraggeber kann beispielsweise verlangen, dass für ein öffentliches Gebäude Energie aus erneuerbaren Quellen verwendet wird, dass die Lebensmittel für eine Schulkantine aus biologischem Anbau kommen müssen, oder dass in Straßenbaubindemitteln enthaltene flüchtige Lösemittel durch natürliche nachwachsende Öle ersetzt werden müssen. Vom Beginn des Vergabeverfahrens an können öffentliche Auftraggeber damit ihre Vergabepolitik auf umweltfreundliche Produkte und Dienste ausrichten.

Das öffentliche Vergabewesen wird als Bereich genannt, der einen beträchtlichen Beitrag zu einem umweltfreundlicheren Markt leisten könnte, wenn die Auftraggeber die Umweltleistung als Beschaffungskriterium heranziehen würden. Die Mitteilung der Kommission sollte dazu beitragen, dass diese Maßnahmen auch verwirklicht werden, denn sie zeigt, welche Möglichkeiten das geltende Gemeinschaftsrecht den öffentlichen Auftragnehmern lässt, die diesen Weg beschreiten möchten.

Aus der Entscheidungspraxis des Europäischen Gerichtshofes sind insbesondere die Entscheidungen C-31/87, Gebroeders Beentjes, sowie aus der neueren Rechtsprechung, die Entscheidungen C-379/98, Preussen Elektra, und insbesondere C-513/99, Concordia Bus Finland, sowie C-448/01, EVN AG und Wienstrom, hervorzuheben. In diesen Erkenntnissen nimmt der Gerichtshof in positiver Weise zur Zulässigkeit der Berücksichtigung ökologischer Aspekte in Vergabeverfahren Stellung.

Auf nationaler Ebene ist darauf hinzuweisen, dass bereits die österreichischen Vergabennormen - so etwa die ÖNORM A 2050 (Ausgaben 1957, 1993 und 2001) - wie auch die österreichischen vergabegesetzlichen Regelungen, zuletzt das Bundesvergabegesetz 2006 (BVerG 2006), die Bedachtnahme auf die Umweltgerechtigkeit der Leistung als einen der Grundsätze der Leistungsvergabe festgelegt haben. Im BVerG 2006 wird dieser Grundsatz dahingehend präzisiert, dass die Bedachtnahme auf die Umweltgerechtigkeit der Leistung insbesondere durch die Berücksichtigung ökologischer Aspekte bei der Beschreibung der Leistung, bei der Festlegung der technischen Spezifikationen oder durch die Festlegung konkreter Zuschlagskriterien mit ökologischem Bezug zu erfolgen hat:

Siehe insbesondere in „Grundsätze des Vergabeverfahrens“

§ 19. (5) BVerG: Im Vergabeverfahren ist auf die Umweltgerechtigkeit der Leistung Bedacht zu nehmen. Dies kann insbesondere durch die Berücksichtigung ökologischer Aspekte (wie etwa Endenergieeffizienz) bei der Beschreibung der Leistung, bei der Festlegung der technischen Spezifikationen oder durch die Festlegung konkreter Zuschlagskriterien mit ökologischem Bezug erfolgen.

Hier noch ein paar Unterlagen von der EU, die die nationale Gesetzgebung und Bürokratie zur umweltgerechten Vergabe anhalten will:

Link:http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/buying_green_handbook_de.pdf

Eine aktuelle Zusammenstellung der Möglichkeiten der Aufnahme von umweltrelevanten Kriterien in der Ausschreibung siehe auch

Link:http://www.procuraplus.org/fileadmin/template/projects/procuraplus/New_website/Printed_Manual/Printed_Manual_German/kapitel3_deutsch_www.PDF