

**Abschlussbericht zum Forschungsprojekt  
(11D/07Keil)**

**Optimierung des Strohtransportes  
zu einem Säge- und  
Spanplattenwerk**

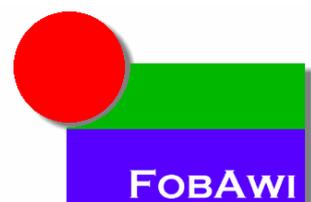
**Zur Vorlage beim Ministerium für  
Umwelt und Forsten  
Rheinland-Pfalz**

**Juni 2008**

**Vorgelegt von : PD Dr. Thomas Smaltschinski  
Wiss. Leitung : Prof. Dr. Dr. hc Gero Becker**

**Institut für Forstbenutzung und  
Forstliche Arbeitswissenschaft  
Wertmannstr. 6  
79085 Freiburg**

**Tel 0761/203-3769  
Fax 0761/203-3763  
E-Mail institut@fobawi.uni-freiburg.de**



Verantwortlich im Sinne des Pressegesetzes für den Inhalt sind die Autoren. Aus der Benutzung der Studie können gegenüber der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz keine Schadensersatzansprüche geltend gemacht werden. Die Forschungsanstalt ist bemüht, die Studien auf Wahrheit, Inhalte und Herkunft zu prüfen. Sie kann jedoch beispielsweise die Urdaten von Vor-Ort-Erhebungen, gegebenenfalls verwendete Algorithmen und Hintergrundinformationen nicht prüfen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Problemstellung</b>	<b>3</b>
<b>2 Ziele</b>	<b>3</b>
<b>3 Problemlösung</b>	<b>4</b>
3.1 Bestimmung des potentiellen Aufkommens an Stroh	4
3.2 Festlegung von realistischen Liefermengen für das jeweilige Lieferjahr	8
3.3 Festlegung des Gebiets zur Direktbelieferung	8
3.4 Festlegung der Lieferzone mit Zwischenlagerung	9
3.5 Festlegung von Zwischenlagern	13
3.6 Verteilung des Strohs auf die Zwischenlager	14
3.7 Endtransport zum Werk	14
3.8 Kostenkalkulation	14
3.8.1 Prozesskette Stroh	15
3.8.2 Prozess Strohernte	16
3.8.3 Transport	17
<b>4 Schlussbemerkung</b>	<b>21</b>
<b>5 Literatur</b>	<b>21</b>



# 1 Problemstellung

Die nachhaltige und ausreichende Versorgung mit geeigneten Rohstoffen wird zunehmend zur Schlüsselfrage für Wachstum und Wertschöpfung der Holzindustrie von Rheinland-Pfalz. Dies gilt besonders für die Spanplattenproduktion, da durch die energetische Verwendung von Holz eine bedeutsame Konkurrenz für den traditionell eingesetzten Rohstoff (Industrieholz mittlerer und geringerer Qualität) entstanden ist. Spanplattentechnologische Untersuchungen haben ergeben, dass es möglich ist, Holz in gewissem quantitativem Umfang durch Stroh aus landwirtschaftlicher Produktion zu ersetzen und damit die Rohstoffbasis zu verbreitern bzw. zu strecken.

Die Fa. Elka in Morbach setzt diese Technologie ein, um Spanplatten mit bis zu 20% Strohanteil herzustellen. Die Spanplatten haben bei etwas geringerer Festigkeit eine deutlich geringere Dichte ( $< 470 \text{ kg/m}^3$ ) als normale Spanplatten. Der Markt sucht derartige Produkte (IKEA), da die Festigkeit einer Normspanplatte für viele Verwendungen gar nicht nötig ist. Leichte Spanplatten sind also gefragt.

Insgesamt ist ein jährliches Kontingent von rund 12.000 t lufttrockenen Material mit ca. 13% Wasseranteil geplant. Dies ist aufgeteilt in 10.000 t Stroh von Getreide und Raps aus der Sommerernte sowie 2.000 t von Miscanthus und Topinambur aus der Frühjahrsernte. Die Sommerernte beginnt üblicherweise Mitte Juni und endet Mitte August. In diesem Zeitfenster können 2.000 t direkt an das Werk in Morbach geliefert werden. Die restlichen 8.000 t müssen auf geeignete Zwischenlager verteilt werden, da Stroh wegen seines relativ geringen Gewichtes pro Volumeneinheit die Lagerkapazität in Morbach sprengen würde.

Innerhalb der Landwirtschaft bildet Stroh ein nur teilweise verwertbares Restprodukt (Stallstreu etc). Hauptsächlich wird Stroh wieder untergepflügt, um die bei der Getreideerzeugung entzogenen Nährstoffe dem Nährstoffkreislauf wieder zu Verfügung zu stellen. Die alternative Verwendung von Stroh in Heizkraftwerken zur Energieerzeugung zeichnet sich ab und bildet für die Verwendung von Stroh in der Spanplatte eine ernsthafte Konkurrenz.

Die logistische Optimierung des Strohtransports unter Berücksichtigung von Zwischenlagern bildet hier den Kern des Problems.

## 2 Ziele

Erstes Oberziel besteht in der Prüfung der Frage, ob in Rheinland-Pfalz überhaupt ein ausreichendes Potential an Stroh vorhanden ist, um ein Werk wie ELKA nachhaltig mit einer bestimmten Menge Stroh zu versorgen. Bei positiver Beantwortung dieser Frage ergibt sich als Folgeziel die Entwicklung eines Logistikkonzepts, mit dessen Hilfe der Ernteanfall von Stroh aus Rheinland-Pfalz innerhalb zweier kurzer Zeitfenster und eine kontinuierliche Versorgung der Holzwerkstoffindustrie harmonisch aufeinander abgestimmt werden können.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde die Untersuchung in acht Arbeitsschritte aufgeteilt:

1. Bestimmung des potentiellen Aufkommens an Stroh
2. Festlegung von realistischen tatsächlichen Liefermengen für das jeweilige Lieferjahr
3. Festlegung des Gebiets zur Direktbelieferung
4. Festlegung der Lieferzone mit Zwischenlagerung
5. Festlegung von Zwischenlagern
6. Verteilung des Strohs auf die Zwischenlager
7. Endtransport zum Werk
8. Kostenkalkulation

Im Folgenden werden diese Arbeitsschritte nacheinander abgearbeitet.

### 3 Problemlösung

#### 3.1 Bestimmung des potentiellen Aufkommens an Stroh

Die Ermittlung des potenziellen Aufkommens an Stroh anhand von Durchschnittswerten soll einen ersten Überblick über die Größe und Lage des Einzugsgebietes geben. Als Datengrundlage wurden dazu die landwirtschaftlichen Daten des statistischen Landesamtes herangezogen. Diese beinhalten die Fruchtart und die Anbaufläche für das Jahr 2003. Eine neuere landwirtschaftliche Erhebung ist noch nicht abgeschlossen. Es ist zu bedenken, dass die Erhebungen durch den Fruchtwechsel eine gewisse Unschärfe besitzen, die allerdings für die Abschätzung des potentiellen Aufkommens als unerheblich anzusehen sind. Geographischer Ausgangspunkt für eine erste Optimierung ist deshalb zunächst die jeweilige geometrische Fläche einer Gemeinde.

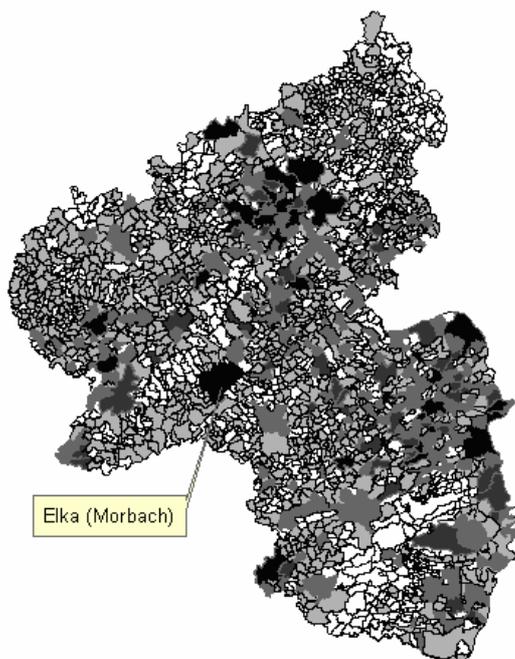


Abb. 1: Strohaufkommen (Getreide und Raps) in Tonnen nach Gemeinden. Weiß (0-20t), hellgrau (20-1000t), grau (1000-2000t), dunkelgrau (2000-3000 t), schwarz (> 3000 t).

Die Daten des Statistischen Landesamtes über Fruchtart und Anbaufläche liegen in digitaler Form vor und lassen sich den Polygonen, die die Gemeindeflächen bilden, als Attribut zuordnen. Für alle rheinland-pfälzischen Gemarkungen stehen so die Getreideanbaufläche, der durchschnittliche Ertrag je ha und der Gesamtertrag für räumliche Berechnungen zu Verfügung (Abb. 1). Diese Geometrie- und Sachdaten sind als Shapefile in einer Geodatabase im geographischen Informationssystem ArcGis 9.2 gespeichert.

Für das Land Rheinland-Pfalz ergibt sich auf das Jahr 2003 bezogen ein theoretisches Potential von etwas über 1 Mio. t Getreidestroh (~ 220.000 ha) und knapp 40 tsd. t Rapsstroh (~23.000 ha). Miscanthus ist noch im Versuchsstadium und nur auf einer Fläche von 100 ha vertreten.

Für das Zentrum in Morbach können dann für beliebige Entfernungen (Luftlinie) die Aufkommen an Stroh selektiert und berechnet werden. In Abb. 2 wurde für einen Radius von 20 km um Morbach herum das Aufkommen exemplarisch dargestellt.



*Abb. 2: Strohaufkommen (Getreide und Raps) im Umkreis von 20 km um den Standort des Werkes Elka in Morbach*

Die nachfolgende Tabelle enthält das Strohaufkommen innerhalb konzentrischer Kreise und deren Summe für die Entfernungen von 10, 20 und 30 km um das Zentrum Morbach.

*Tab. 1: Strohaufkommen um Morbach in Tonnen und Distanzen (Luftlinie) von 10, 20 und 30 km*

Distanz (km)	Getreide (t)	$\Sigma$ Getreide (t)	Raps (t)	$\Sigma$ Raps (t)
0-10	15,885	15,885	633	633
10-20	37,800	53,685	1,719	2,352
20-30	68,049	121,734	3,317	5,669

Die vorgestellte Kalkulation ist als erste Abschätzung zu verstehen, da hier die Entfernungen als Luftlinie zu Grunde gelegt wurden. In der Realität ist von den Entfernungen auf dem Straßennetz auszugehen. Pauschale Berechnungen wie *Luftlinie* x 1,32 = „Entfernung auf der Strasse“ lassen sich aufgrund der orographischen Gegebenheiten des Hunsrück nicht anwenden.

Um die tatsächlichen Entfernungen auf den Strassen zu ermitteln wurden für ein Routing der Datensatz von NAVTEQ verwendet, wie er auch in den üblichen Autonavigationssystemen eingesetzt wird. Der originale Datensatz lag im Institut als

Forschungslizenz vor und wurde on ArgGis9.2 in einer Geodatabase als hierarchisches Netzwerk mit fünf Hierarchieebenen gespeichert (I Autobahn, II Bundesstraßen & überörtliche Straßen, III Landstraßen und Durchgangsstrassen, IV Wohnstraßen, V untergeordnete Strassen und Feldwege) (Abb. 3).

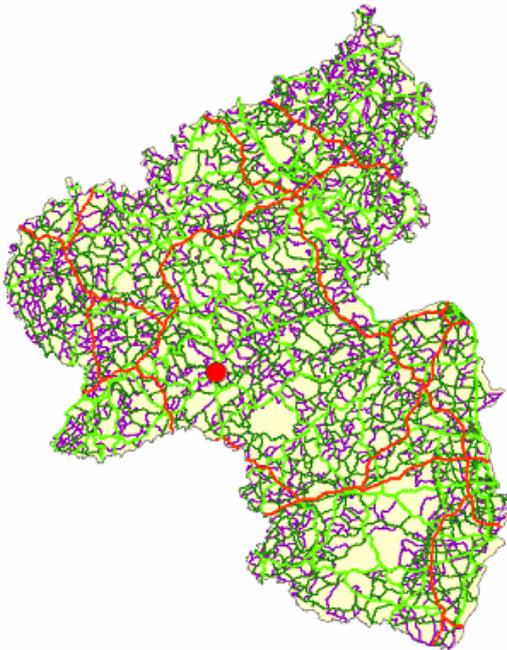


Abb. 3: NAVTEQ Straßendaten für Rheinland-Pfalz.

Für alle Gemeinden in Rheinland Pfalz konnte über Netzwerkalgorithmen (Neumann, 1975) die kürzeste Straßenverbindung vom Gemeindemittelpunkt zum Werk Elka berechnet und als Liniengeometrie mit Gemeindekennung, Distanz und zu erwartender Strohmenge in einem Shape-File gespeichert werden (Abb. 4).

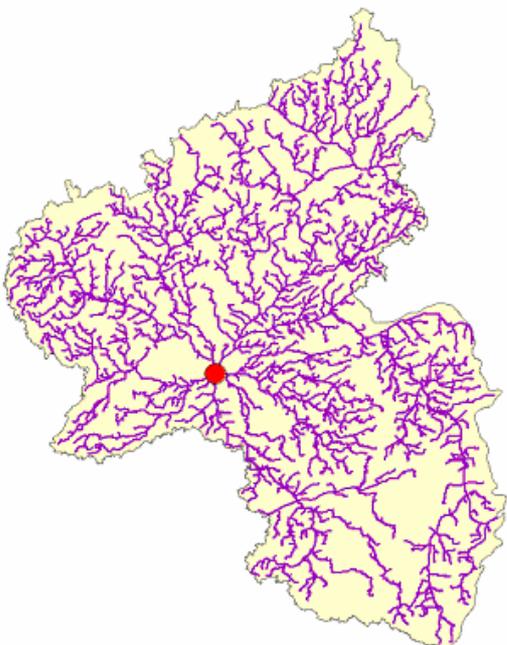


Abb. 4: Kürzeste Strecken von Gemeindemittelpunkten nach Morbach

Mit diesen Geometrien konnten dann die tatsächlichen Entfernungen auf der Strasse beim Strohttransport berechnet und logistischen Überlegungen zugeführt werden. Zunächst wurden alle Gemeinden selektiert, die innerhalb eines Radius von 30 km Luftlinie um Morbach lagen. (Abb. 5). Innerhalb dieser Fläche wurden alle kürzesten Verbindungen ausgewählt. Dabei stellte sich heraus, dass innerhalb dieses Gebietes Transportdistanzen von bis zu 55 km auftraten.

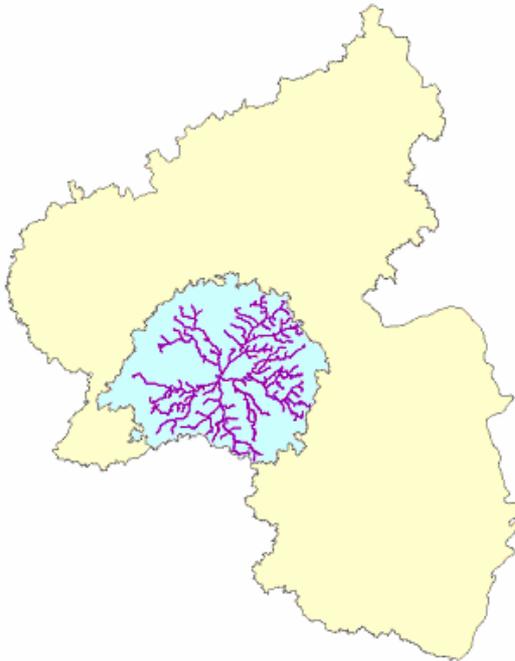


Abb. 5: Gemeinden im Radius von 30 km um Morbach (hellblau) und kürzeste Distanzen auf der Straße von Gemeindemittelpunkten nach Morbach

Die Transportdistanzen und ihr Strohpotential wurde in 5 km Stufen in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Strohaufkommen um Morbach in Tonnen und Transportdistanzen (Straße) innerhalb der Gemeinden bis 30 km Luftlinie

Straßen- distanz (km)	Getreide (t)	Σ Getreide (t)	Raps (t)	Σ Raps (t)
0-5	6,431	6,431	401	401
5-10	243	6,674	0	401
10-15	5,949	12,623	93	494
15-20	11,138	23,760	513	1,007
20-25	14,967	38,727	763	1,770
25-30	17,636	56,363	911	2,681
30-35	16,880	73,242	730	3,411
35-40	25,286	98,528	1,336	4,747
40-45	15,570	114,098	764	5,511
45-50	6,912	121,010	158	5,669
50-55	725	121,734	0	5,669

Tabelle 2 zeigt gegenüber Tabelle 1 die Unschärfe, die bei der Verwendung von Luftlinien entsteht. Das Aufkommen an Stroh in 30 km Transportdistanz auf der Strasse beträgt nur noch knapp 50% gegenüber der Fläche mit einem Radius von 30 km Luftlinie.

Zu diesen Zahlen ist anzumerken, dass sie aus dem Jahr 2003 stammen und das Potential darstellen und nicht exakt die in einem anderen Jahr tatsächlich zu erwartenden Mengen auf den gleichen Flächen. Die Anbaufläche ändert sich durch die Fruchtfolge von Jahr zu Jahr, so dass diese Zahlen nur als Richtschnur dienen können.

### **3.2 Festlegung von realistischen Liefermengen für das jeweilige Lieferjahr**

Die in einem gegebenen Lieferjahr tatsächlich anfallenden Liefermengen hängen vom Witterungsverlauf ab und können im Erntejahr vor Ort z. B. durch die örtlichen Maschinenringe oder die Landwirtschaftsbehörden vor Beginn der Ernte mit hinlänglicher Sicherheit abgeschätzt werden.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist davon auszugehen, dass von dem beobachteten Potential nur 10 bis 20% zum Verkauf stehen. Die Ursachen dafür sind unterschiedlich. Zum einen sind alternative Nutzungen bei der Wärmeenergie denkbar, zum anderen wird ein großer Teil traditionell untergepflügt um den Nährstoffentzug bei der Getreideernte zu kompensieren. Letztlich spielt auch der erzielbare Verkaufspreis im Verhältnis zu den Bereitstellungskosten von Stroh eine wichtige Rolle. Im Folgenden wurde generell mit einem Anteil von 10 % des Potentials an Stroh gerechnet, um einen gewissen Sicherheitsspielraum zu besitzen.

Unter der Annahme, dass sich im Durchschnitt 10 % des Potentials gekauft werden können und die Zielgröße bei 10.000 t liegt müsste innerhalb einer Transportdistanz bis 45 km ein ausreichendes Potential vorliegen. Nach Tab. 4 liegt das Potential der kumulativen Häufigkeit bei 1140 t (entspricht 114.000 t x 10%). Die Transportdistanz Feld-Werk reicht dann bis 45 km. Bei 10.000 t aus der Sommerernte sind im Monat rund 1000 t oder pro Woche 250 t Stroh an das Werk ELKA zu liefern. Bei der derzeitigen Zuladung pro LKW von 10 t Stroh entspricht dies etwa 5 LKW Ladungen pro Tag.

### **3.3 Festlegung des Gebiets zur Direktbelieferung**

Es wird davon ausgegangen, dass während des Zeitfensters der Sommererntezeit (zwei Monate = 2.000 t Stroh) eine Direktbelieferung des Werkes ohne Zwischenlagerung erfolgt, und dass dabei die jeweils relativ nächsten Gemeinden berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann die Direktbelieferung in enger organisatorischer und zeitlicher Absprache, gemäß den Bedürfnissen des Werkes am besten gesteuert werden.

Außerdem ist es in der Direktbelieferungszone für besonders nahe gelegene Ernteflächen für die Landwirte möglich, das Stroh mit eigenen landwirtschaftlichen Schleppern mit Anhänger (LWS) anzuliefern und dadurch den LKW-Transport einzusparen.

Die Zone der Direktbelieferung wird ermittelt, indem die jeweiligen tatsächlichen Stroherträge je Gemeinde nach ihrer Transportentfernung zum Werk gemeindeweise aufaddiert werden, bis die Direktliefermenge von 2.000 t erreicht ist. Nach Tabelle 2

ist diese Menge in einem Bereich von bis zu 20 km Transportentfernung lieferbar (2.376 t = 23,760 x 10%). In Abb. 5 sind die Gemeinden dieses Einzugsbereichs für direkte Lieferungen und die zugehörenden Transportstrecken türkis markiert.

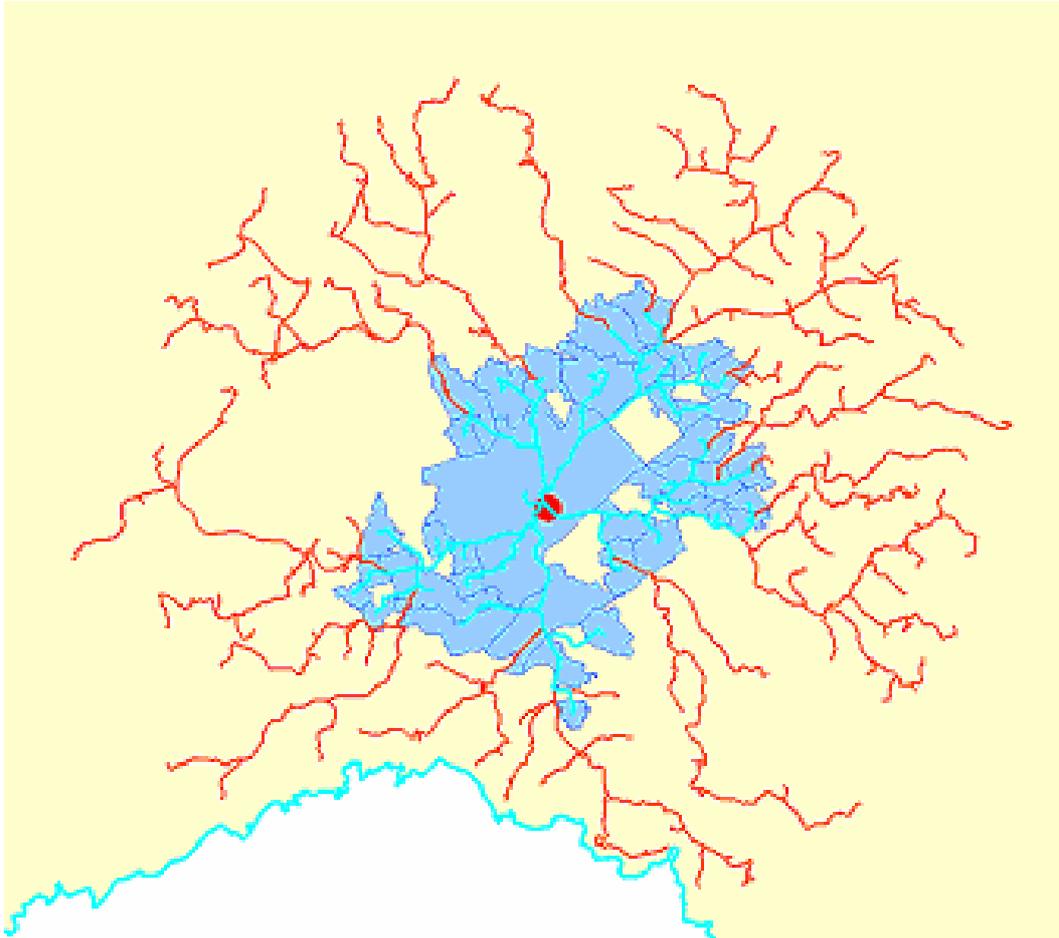


Abb. 5: Gemeinden für Direktbelieferung ohne Zwischenlager (hellblau), Transportdistanz kleiner als 20 km (türkis).

### 3.4 Festlegung der Lieferzone mit Zwischenlagerung

Die übrigen Gemeinden werden mit ihren jeweiligen Mengen nach zunehmender Transportentfernung zum Werk geordnet, bis die verbliebene Menge von 8.000 t Stroh erreicht ist. Diese Gemeinden bilden das Einzugsgebiet zur Belieferung mit Zwischenlager. Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass diese Gemeinden die Komplementärmenge zu denen bilden, die ihr Stroh direkt an das Werk liefern.

Nach Tab. 2 liegen diese Gemeinden in einem Bereich über 20 km Transportdistanz. Aus Tab. 2 kann auch abgelesen werden, innerhalb welcher Transportdistanzen 8.000 t Stroh verfügbar sind, ist mit einem Sicherheitsspielraum im Bereich von 20 bis 45 km dargestellt. Die Zahlen wurden aus Tab. 2 extrahiert und in Tab. 3 zusammengestellt. Hier sind die Distanzen wieder in 5 km Stufen zusammengestellt. Die kumulative Verteilung in der dritten Spalte zeigt an, dass im Bereich 20 bis 45 km Transportentfernung um die gewünschte Restmenge von 8.000 t sogar um 1.000 t überschritten wird (9.034 t = 90,338 t x 10%).

Tab. 3: Strohaufkommen um Morbach in Tonnen für Transportdistanzen (Straße) von 20 bis 45 km

Straßen- distanz (km)	Getreide (t)	$\Sigma$ Getreide (t)	Raps (t)	$\Sigma$ Raps (t)
20-25	14,967	14,967	763	763
25-30	17,636	32,603	911	1,674
30-35	16,880	49,482	730	2,404
35-40	25,286	74,768	1,336	3,740
40-45	15,570	90,338	764	4,504

Über räumliche Abfragen im geographischen Informationssystem kann der interessierende Bereich ausgewählt werden, innerhalb dessen ein Strohpotential von 8.000 t vorliegt. Gleichzeitig wurden die kumulativen Strohströme von den Gemeinden ausgehend bis nach Morbach berechnet.

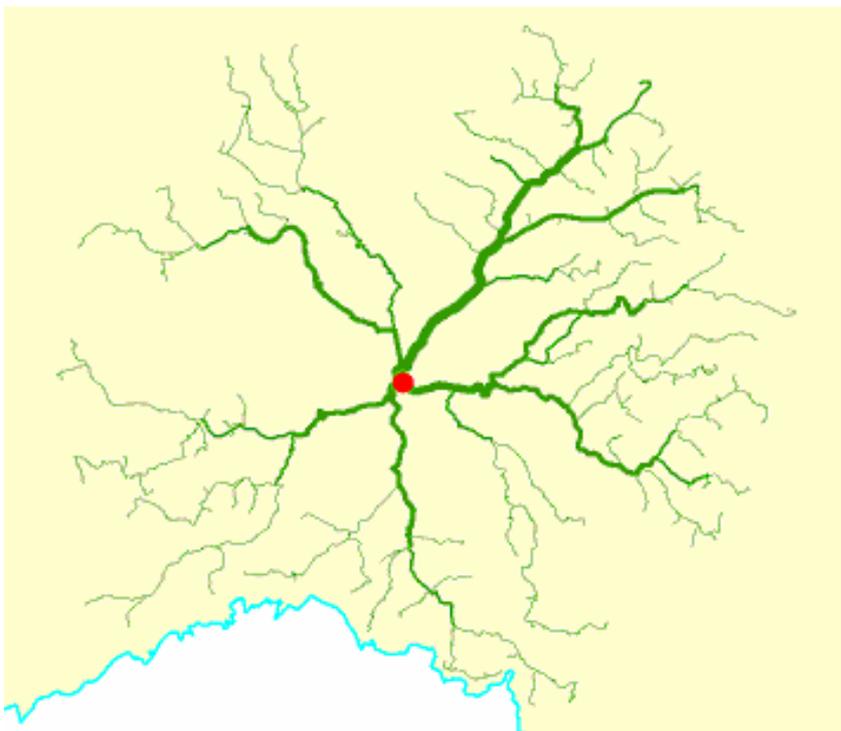
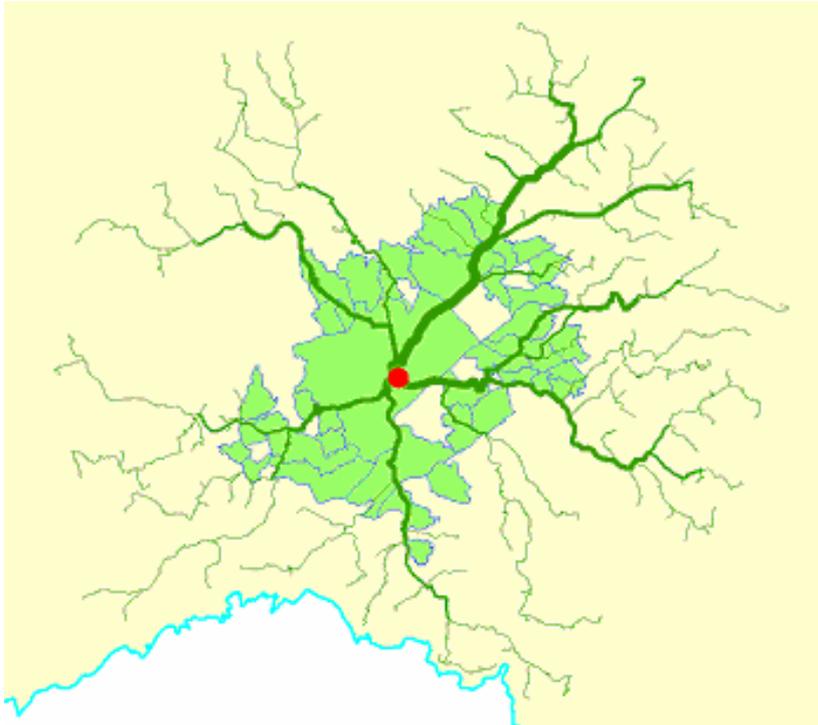


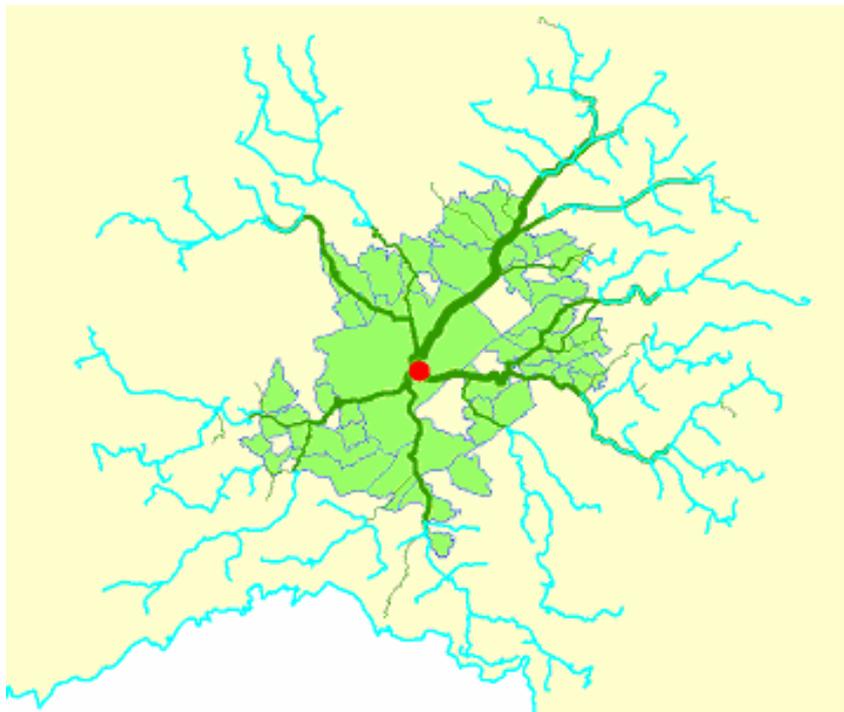
Abb. 6: Kumulative Strohströme auf den kürzesten Routen von Gemeindemittelpunkten nach Morbach.

Die kumulativen Strohströme oder Transportwege verhalten sich ähnlich wie ein Flussnetz. Verfolgt man dieses Netz von Morbach aus „flussaufwärts“, steht man immer wieder vor der Alternative „links“ oder „rechts“. Um diese Alternativen einzugrenzen und indirekt „Wassereinzugsgebiete“ für Stroh zu bilden, wurden die Gemeinden im Direkteinzugsgebiet von 20 km eingezeichnet (Abb. 7).



*Abb. 7: Strohpotential von 8.000 t/a bei Transportdistanzen von 20 bis 45 km und Gemeindegebiet im 20 km Direkt-einzugsbereich*

Selektiert man alle Transportwege außerhalb dieser Gemeinden (Abb. 8),



*Abb. 8: Selektierte Transportströme außerhalb des direkten Einzugsgebietes von 20 km um Morbach.*

dann erhält man direkt die „Wassereinzugsgebiete für Stroh“, die Gruppen bilden und voneinander getrennt sind (Abb. 8 und 9).

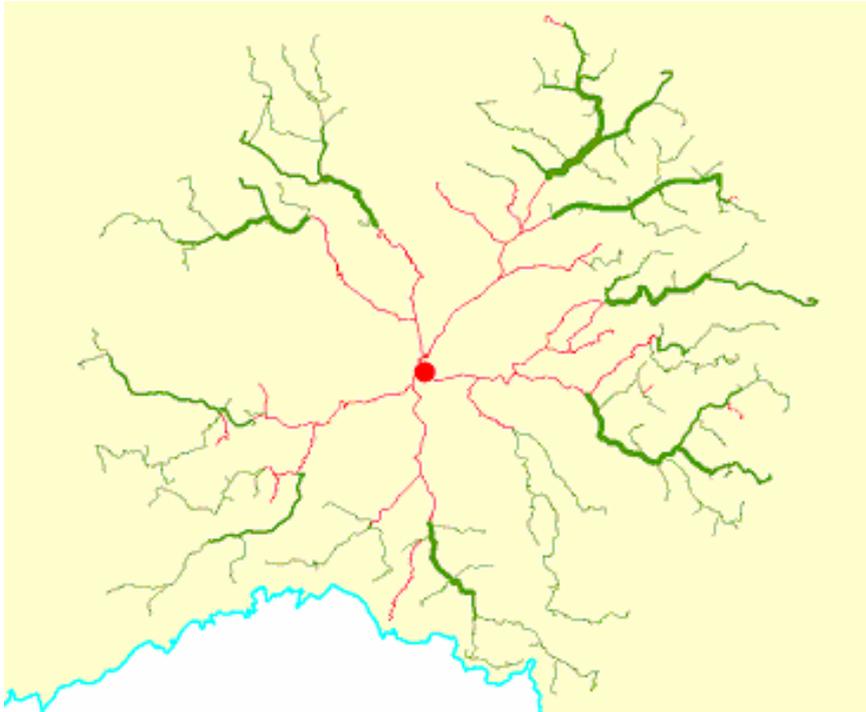


Abb. 9:  
Zusammenhängende  
Strohströme (~ Stroh-  
einzugsgebiete,  
dunkelgrün)  
außerhalb des  
direkten  
Einzugsgebietes um  
Morbach (rote  
Strassen).

In Abb. 9 sind zu der selektierten Menge der Strohströme noch die zugehörigen Gemeinden und das Strohpotential der „Stroheinzugsgebiete“ dargestellt. Unter Weglassung zu kleiner „Strohflüsse“ verbleiben noch 10 Einzugsgebiete mit einem Potential von knapp 80.000 t Stroh, resp. einer 10%- Verkaufsmenge von 8.000 t.

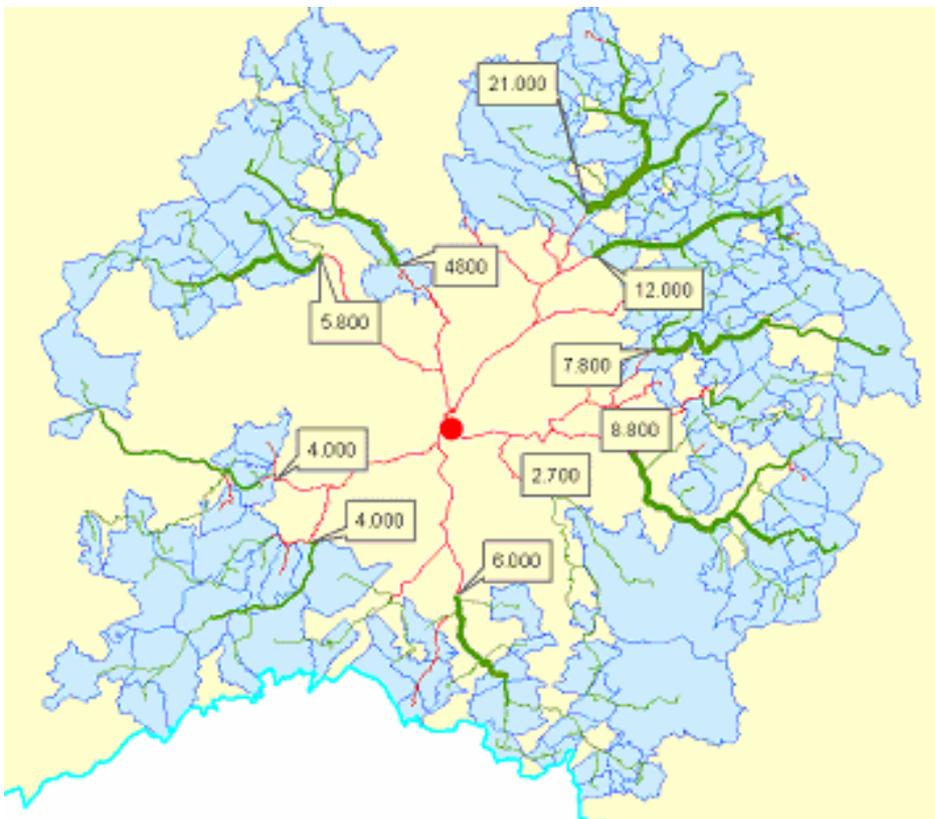


Abb. 10:  
Stroheinzugs-  
gebiete  
außerhalb des  
direkten Einzugs-  
gebietes von 20  
km Transport-  
entfernung und  
ihr Strohpotential

### 3.5 Festlegung von Zwischenlagern

Im Bereich der Gemeinden der Lieferzone mit Zwischenlagerung sind geeignete Zwischenlager zu bestimmen. Da die Neuerrichtung eines überdachten Zwischenlagers erhebliche Kosten verursacht, sind dabei im Zweifelsfall zunächst vorhandene geeignete Lagermöglichkeiten zu nutzen, auch wenn dies nicht-optimale Transportentfernungen von der Anbaufläche zum Zwischenlager und vom Zwischenlager zum Werk zu Folge hat, also zu einer suboptimalen Lage der Zwischenlager in der Fläche führt.

Die Größe der jeweiligen Zwischenlager ist flexibel, sollte jedoch mindestens 5 LKW-Ladungen oder ein Vielfaches davon betragen. Günstig wären Strohmieten, deren Größe ein Vielfaches der Tageslieferungen, resp. Wochenlieferungen beträgt. Dabei sollten innerhalb einer Miete nur Ballen gleicher Größe vorkommen, um den Stauraum der LKW optimal auszunutzen, den Ladevorgang zu vereinfachen und die Umsetzzeiten des Ladekrans zu minimieren. Die Gesamtkapazität aller identifizierten Lagermöglichkeiten sollte ca. 20% über dem aktuellen Bedarf liegen.

In Regionen, in denen im Umkreis von mehreren Gemeinden keinerlei geeignete Zwischenlager vorhanden sind, ist an die Einrichtung spezieller neuer Zwischenlager, z. B. durch Zelte, zu denken, und es werden transportoptimale Standorte hierfür vorgeschlagen.

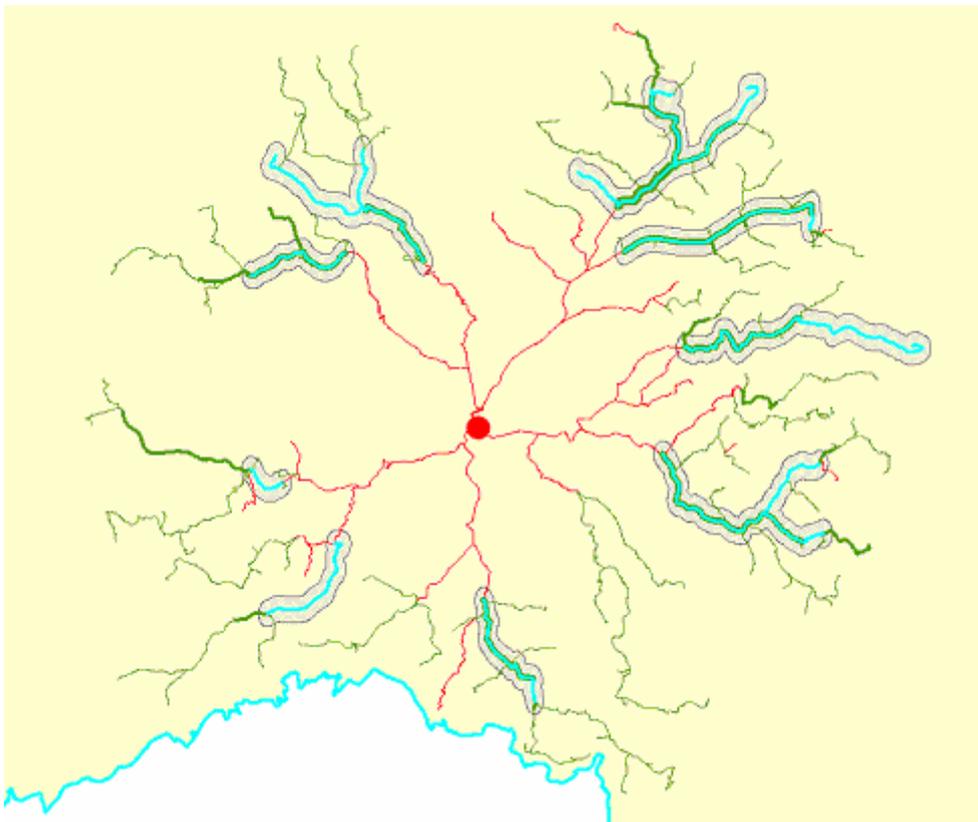


Abb. 11: Pufferstreifen entlang der Hauptachsen mit mehr als 2.000 t Strohabfuhr als potentielle Gebiete für Zwischenlager.

Für die zehn verschiedenen Stroheinzugsgebiete aus Abb. 10 wurden die Streckenabschnitte selektiert, in denen der 10%-Potentialanteil größer als 200 t Stroh war. Diese Linienelemente wurden mit einem Puffer von 1 km Breite versehen innerhalb dessen sich ein oder mehrere Zwischenlager befinden können. Die ausgewählten Transportabschnitte liegen zwangsläufig auf den kürzesten Transportrouten nach Morbach.

Berechnet man das Centroid eines Pufferstreifens in Abb. 11 als virtuellen Position für ein Zwischenlager, dann ergeben sich Transportdistanzen nach Morbach von 17 bis 27 km. Die Transportdistanzen vom Feld zu den so bestimmten Zwischenlagern liegen zwischen 5 und 20 km. Um die Transportdistanzen zu den Zwischenlagern zu verringern, können innerhalb der Pufferstreifen auch mehrere Zwischenlager angelegt werden. Eine optimale Position eines Zwischenlagers liegt generell „flussabwärts“ unterhalb des Zusammenflusses zweier „Strohströme“.

Die Frage nach einer exakten Positionierung der Zwischenlager ließ sich leider nicht genauer untersuchen, da durch eine unklare Verhandlungssituation zwischen der Fa. ELKA und den Landwirten keine Aussagen über benötigte Strohmenge zustande kamen. Damit lagen auch keine Informationen über die Positionen der Feldstücke mit Stroh vor. Zwischenlager als festes Gebäude oder als geschützte Miete auf dem Feld sind aber in der Anlage und Unterhaltung teuer und amortisieren sich nur bei mittel- bis langfristigen Verträgen. Als methodischer Lösungsvorschlag wurden vorerst variable Gebiete in Form von Pufferstreifen um die Hauptachsen der Strohabfuhr als logistisch optimierter Vorschlag berechnet (Domschke u. Drexler, 1996).

### **3.6 Verteilung des Strohs auf die Zwischenlager**

Sind die Standorte für bekannte und ggf. neu zu errichtende Zwischenlager und deren jeweilige maximale Lagerkapazität bekannt, kann eine entfernungsoptimale Belieferung der Zwischenlager für die jeweiligen Ernteflächen kalkuliert werden. Dazu sind die Algorithmen des Routings aus Abschnitt 3.1 zu verwenden.

Sind die Zwischenlager direkt hinter den Zusammenflussspunkten zweier Transportwege nach Morbach angelegt, kann als Transportweg die entsprechende Liniengeometrie aus Abb. 4 verwendet werden.

### **3.7 Endtransport zum Werk**

Der Endtransport von den Zwischenlagern zum Werk wird in der Weise kalkuliert, dass eine wöchentlich oder auch täglich gleiche Anzahl von LKW in Werk eintrifft. Dabei wird die kürzeste Route bestimmt. Die kürzesten Routen von den Zwischenlagern zum Werk sind analog zu Abschnitt 3.1 ebenfalls zu berechnen (s.a. Abb. 4.).

### **3.8 Kostenkalkulation**

Unter Berücksichtigung der in den bisherigen Arbeitsschritten ermittelten Transportmengen und Transportentfernungen können für die drei Typen von

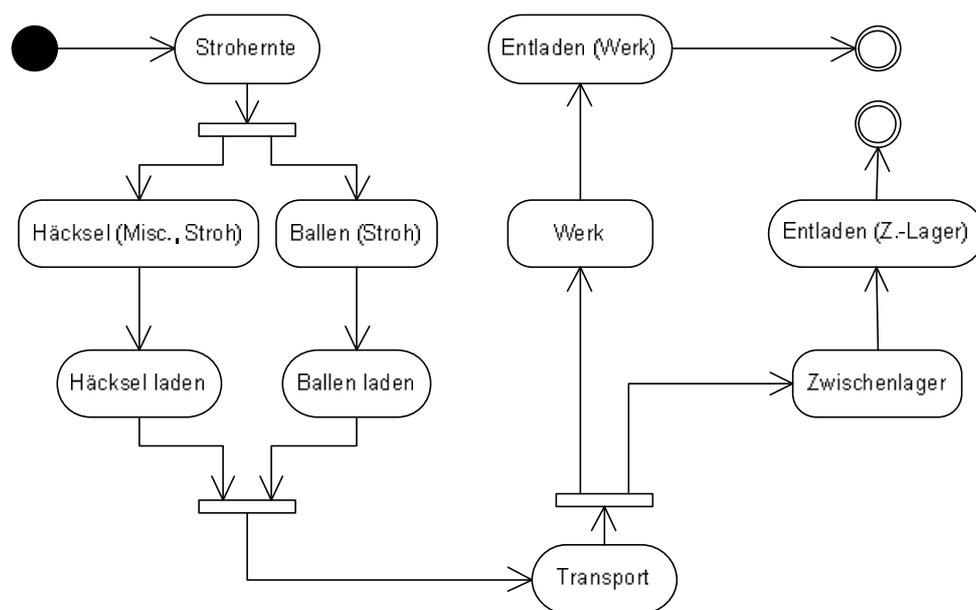
Transportrouten Feld Werk, Feld-Zwischenlager und Zwischenlager-Werk die Kosten zusammengestellt werden. Dies erfolgt aufgrund der jeweils zu ermittelnden Kostensätze für die verschiedenen Prozesse wie Beladen, Transport, Entladen oder Zwischenlagern.

Die Kosten für den Strohtransport sollen als Prozesskosten der Strohbereitstellungskette abgeleitet werden. Dabei soll zunächst modellhaft auf die Prozesskette an sich und danach auf die Kosten der Einzelprozesse eingegangen werden.

### 3.8.1 Prozesskette Stroh

Ganz allgemein stellt die Versorgung eines Spanplattenwerkes mit Stroh eine logistische Prozesskette dar, die aus verschiedenen in sich abgeschlossenen einzelnen Prozessen besteht, die in einer notwendigen Abfolge stehen (Ernte, Be- und Entladen, Transport etc.). Im Folgenden sollen die Prozesskette und die sie bestimmenden Grundlagen und Einzelprozesse erläutert werden.

Die Prozesskette Stroh, die bei der Ernte startet und beim Abladen im Werk oder Zwischenlager endet, hat folgende schematische Darstellung (Abb. 12).





- Anfahrt zum Zwischenlager (ohne Ladung)
- Laden von Ballen oder Häckseln
- Fahrt zum Werk
- Entladen

Diese Prozessketten sind der methodische Ansatz, um zu objektivierbaren Aussagen über Kosten bei den genannten Prozessen, Ressourcenverbrauch und letztlich einer einvernehmlichen Preisgestaltung für das verkaufte Produkt zu kommen.

Vor der eigentlichen Beschreibung der Prozesse zunächst eine Beschreibung des Produktes Stroh. Das zu transportierende Stroh stammt aus drei Fruchtarten: Getreide, Raps und Miscanthus. Das Stroh dieser Früchte kann je nach Erntetechnik in Ballenform oder als Häcksel anfallen, wobei Miscanthus ausschließlich gehäckselt wird. Die Ballen sollten nach einer Absichtserklärung auf eine gewisse Größe normiert (220 x 120 x 70 cm ~ 1,85 m<sup>3</sup>) werden. Das Gewicht eines derartigen Ballen beträgt 250-300 kg bei ca.13% Feuchteanteil; ein Kubikmeter Getreidestroh besitzt danach bei 13% Feuchte eine Dichte von etwa 0,145 t/m<sup>3</sup> (atro ~ 0,13 t/m<sup>3</sup>). Diese Normierung konnte bis heute nicht realisiert werden.

Zum Vergleich Holz (Fichte), welches den Grundstoff für die Spanplattenherstellung bildet, gelten folgende Umrechnungszahlen. Fichte hat eine atro-Dichte von 0,43t/m<sup>3</sup>, waldfrisch je nach Feuchteanteil eine Dichte zwischen 0,6 bis 0,8 und eine Tonne Holz (atro) hat somit ein Volumen von 2,32 m<sup>3</sup>.

### 3.8.2 Prozess Strohernte

Für den Prozess „Strohernte“ hat der Maschinenring Föhren folgende Zusammenstellung gebildet (Tab. 4-6), wobei Stroh in Ballen und Raps in Ballen und als Häcksel untersucht wurden.

In der Zusammenstellung sind die verschiedenen Arbeitsschritte und ihre Kostenbelastung aufgelistet, die innerhalb des Prozesses Strohernte auftreten. Die Strohernte bis zum Ballen/Häcksel unterteilt sich demnach in den Ernteschnitt, das Schwaden, das Aufnehmen und Pressen, Zusammenfahren, Abdecken und Laden.

Tabelle 4: Komponenten Prozess Strohernte und Kosten für Getreidestroh

Getreidestroh (ca. 4 - 5 t/ha)	€/t	€/Ballen
ernten	25,00	7,50
schwaden	10,00	3,00
pressen	20,00	6,00
zusammenfahren	13,00	3,90
abdecken, laden	10,00	3,00
<u>optional Transport Feld-Werk</u>		
0,1 - 10 km	11,50	3,45
10,1 -20 km	14,50	4,35
Kosten ohne Transport	<b>78,00</b>	23,40
Kosten bei 15 km Transportentfernung zum Werk	92,50	27,75

Tabelle 5: Komponenten Prozess Strohernte und Kosten für Rapsstroh

<b>Rapsstroh-Ballen (ca. 1,5 - 2 t/ha)</b>	€/t	€/Ballen
ernten	35,00	10,50
schwaden	10,00	3,00
pressen	20,00	6,00
zusammenfahren	13,00	3,90
abdecken, laden	10,00	3,00
<u>optional Transport Feld-Werk</u>		
0,1 - 10 km	11,50	3,45
10,1 - 20 km	14,50	4,35
Kosten ohne Transport	<b>88,00</b>	26,40
Kosten bei 15 km Transportentfernung zum Werk	102,50	30,75

Tabelle 6: Komponenten Prozess Strohernte und Kosten für Rapsstroh

<b>Rapsstroh-Häcksel (ca. 1,5 - 2 t/ha)</b>	€/t
ernten	40,00
schwaden	10,00
häckseln	25,00
<u>optional Transport Feld-Werk</u>	
0,1 - 10 km Entfernung zum Werk	16,50
10 - 20 km Entfernung zum Werk	19,50
Kosten ohne Transport	<b>75,00</b>
Kosten bei 15 km Transportentfernung zum Werk	93,00

### 3.8.3. Transport

Der Transport kann bei der Prozesskette Stroh über folgende Transportmittel erfolgen: LKW und Landwirtschaftlicher Schlepper mit Anhänger (LWS). In Abhängigkeit von der Entfernung sind diese beiden Transportmittel miteinander zu vergleichen, um das günstigste Mittel wählen zu können.

Für den Transport wurden im Jahr 2007 LKWs mit Rungen verwendet, wie sie auch für den Holztransport eingesetzt werden. Beim Transport mit dem LKW ist Stroh gegenüber Holz ein ungünstiges Transportgut, da es durch seine geringe Dichte zwar das Ladevolumen aber nicht die mögliche Zuladung eines LKW ausschöpft. Man kann nach den bisherigen Erfahrungen einen LKW mit 30-40 Ballen beladen, was eine Zuladung von 10-14 t bedeutet. Diese Variation hängt mit dem unterschiedlichen Druck zusammen, mit dem die Ballen gepresst wurden, resp. von der Größe der Ladefläche des LKW. Das resultierende Problem beim Strohtransport ist, dass der LKW bei gleichen Betriebskosten nur zu 40% ausgelastet ist. Exemplarisch soll hier eine Kostenrechnung für einen LKW durchgeführt werden, wie sie beim Holztransport üblich ist (Tab. 7 und 8).

Tab. 7: Anschaffungskosten LKW und Personalkosten

Anschaffungskosten (Euro)	
Zugmaschine, Kran Aufbau (Euro)	130.000,00
Anhänger (Euro)	30.000,00
Laufleistung/Jahr (km)	100000
Einsatztage	260
Treibstoff/l (Euro)	1,40
Verbrauch/100km (l)	45
Reifenkosten/km (Euro)	0,03
Schmierstoff/km (Euro)	0,01
Wartung & Reparatur	0,09
Personalkosten/Monat incl. Sozialabgaben * 1,12 Fahrer (Euro)	3615,44

Tab. 8: Kosten LKW/Jahr in Euro

<b>A. Variable Kosten</b>		<b>68.700</b>
Treibstoff	56.000,00	
Reifenkosten	2.697,73	
Wartung & Reparatur	9.000,00	
Schmierstoffe	1.000,00	
<b>B. Fixe Kosten</b>		<b>45.210</b>
Jährliche Rate Zins 5%		
Laufzeit 6 Jahre	30.666,67	
Kfz-Steuer	1.485,00	
Kfz-Versicherung	4.857,27	
Maut	6.200,00	
sonst. Prüf- & Fixkosten	500,00	
Autotelefon	1.500,00	
<b>C. Personalkosten</b>	43.385,26	<b>43.385</b>
<b>D. Kalkulatorische Kosten</b>		<b>22.000</b>
Verwaltungskosten	12.000,00	
Unternehmerrisiko	10.000,00	
Sa.		<b>179.300</b>

In Tabelle 7 sind die Anschaffungskosten eines LKW und die Kosten für Reifen, Reparatur und Wartung pro km zusammengestellt. Der Dieselpreis wurde mit 1.40 €/l veranschlagt. Bei 260 Arbeitstagen pro Jahr und einer Laufleistung von 100.000 km ergeben sich mit Hilfe dieser Tabellen Kosten pro Jahr von rund 179.300 €. Im Folgenden wird der Stundensatz von 70 €/h verwendet.

Der Prozesse Transport setzt sich aus folgenden Arbeitsschritten zusammen: Fahrt zur Ballenmiete, Beladen, Fahrt zum Werk, Entladen. Das Beladen des LKW mit Strohballen nimmt ungefähr eine Zeit von 40 Minuten in Anspruch, das Entladen nochmals 15 Minuten, so dass als Wartezeit ca. 0,9 Stunden (dezimal) beim

Strohtransport anzusetzen sind. Diese Wartezeit belastet die Transportkosten mit einem Betrag von  $0,9 \text{ h} \times 70 \text{ €/h} = 63 \text{ €}$

Die Fahrtzeit des LKW ist die zweite Kostengröße. Es ist anzunehmen, dass bei kurzen Entfernungen Feld-Werk ( $< 10 \text{ km}$ ) die Durchschnittsgeschwindigkeit kleiner als bei längeren Entfernungen ist, weil keine Autobahnen oder Landstraßen, die höhere Geschwindigkeiten gestatten, benutzt werden können. Für die Kostenüberlegungen beim Transport wurde angenommen, dass bis  $5 \text{ km}$  Transportdistanz eine Durchschnittsgeschwindigkeit von  $50 \text{ kmh}$  möglich ist, die sich kontinuierlich bis  $120 \text{ km}$  Transportdistanz auf  $75 \text{ kmh}$  steigert.

Die einfache Transportdistanz von  $5 \text{ km}$  bedeutet, dass der LKW  $10 \text{ km}$  fährt und eine Zeit von  $10 \text{ km} / 50 \text{ kmh} = 0,2 \text{ h} = 12 \text{ Min}$  benötigt, was Kosten von  $0,2 \text{ h} \times 70 \text{ €/h} = 14 \text{ €}$  ausmacht. Der gesamte Transport für eine Fuhre Stroh von  $10 \text{ t}$  kostet bei einer Transportdistanz dann  $77 \text{ €}$  und auf die Tonne umgerechnet  $7,70 \text{ €/t}$ . Diese Kalkulation wurde für beliebige Distanzen zusammengestellt und für Zuladungen von  $10$  bis  $14$  Tonnen Stroh.

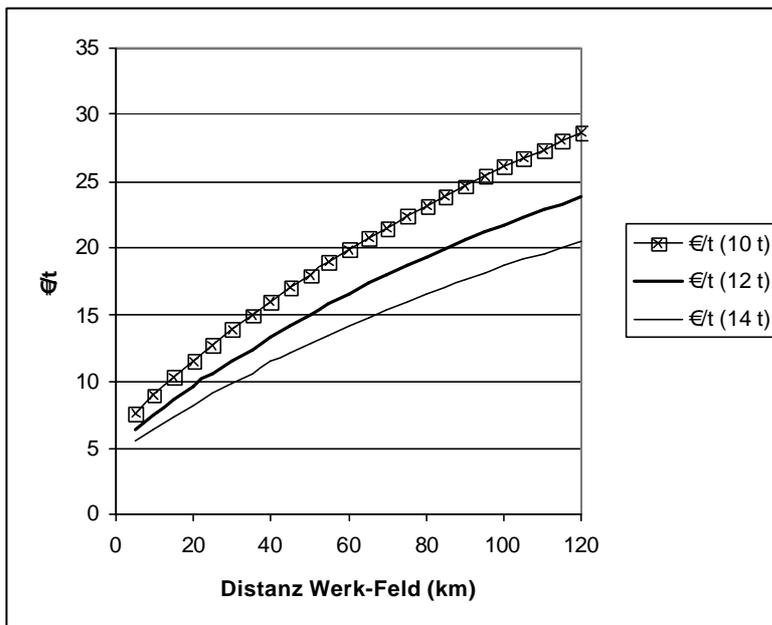


Abb. 13: Fahrtkosten beim Strohtransport für unterschiedliche Auslastung

Bei Kosten pro Tonne von  $15 \text{ €}$  und einer Zuladung von  $10 \text{ t}$  liegt die Distanz Werk-Feld etwa bei  $37 \text{ km}$ . Bei  $14$  Tonnen Zuladung ergeben sich die gleichen Kosten bei einer Distanz Werk-Feld von knapp  $70 \text{ km}$ . Eine höhere Verdichtung der Ballen im Rahmen des Möglichen ist daher wünschenswert. Mit dieser Kostenkalkulation ist innerhalb der Strohkette der Prozess Transport per LKW für beliebige Entfernungen Feld-Werk und Zuladungen berechenbar. Daraus können die sinnvollen Einzugsbereiche um das Werk in Morbach ermittelt werden.

Für den landwirtschaftlichen Schlepper ergibt sich aus den Angaben der Maschinenringe (Tab. 4-6) eine Kostensatz für Ballen von ca.  $1 \text{ €/t}$  und gefahrenem Kilometer und für Häcksel von ca.  $1,2 \text{ €/t}$ .

### 3.8.4 Prozesskosten Strohtransport

Die Prozesskosten sind für drei unterschiedliche Fälle zu kalkulieren:

- A Transport ohne Zwischenlager mit landwirtschaftlichem Schlepper (LWS)
- B Transport ohne Zwischenlager mit LKW
- C Transport mit Feld-Zwischenlager & Zwischenlager-Werk mit LWS resp. LKW

A) Der Transport mit dem landwirtschaftlichen Schlepper ohne Zwischenlager liegt bei etwa 1 € pro Tonne Ballenstroh und bei 1,2 € Pro Tonne Häckselgut. Beim direkten Transport zum Werk im Bereich bis 20 km Transportentfernung sind im Durchschnitt mit 10-12 €/t reinen Transportkosten zu rechnen. Für den Bereich des Direkt-Transportes (s. a. Abb. 6) sind somit für 2.000 t Getreidestroh als Transportkosten ein Betrag zwischen 20.000 und 24.000 € anzusetzen.

B) Beim direkten LKW-Transport zum Werk sind die Kosten für das Beladen und die Transportkosten an sich zu berechnen. Aufgrund der geringen Dichte pro Raumeinheit von Stroh fährt ein voll beladener LKW nur unter halber Last, da er nur zwischen 10 und 14 Tonnen Zuladung mit sich führt. Bei gleichbleibenden Grundkosten von 70 €/h belaufen sich die Transportkosten bei 12 t Zuladung nach Abb. 13 auf 7,5 €/t, 10 €/t und 12,5 €/t bei Transportentfernungen von 10, 20 und 30 Kilometer und das Beladen auf 10 €/t nach Tab. 4/5. Beim Direkttransport zum Werk per LKW im Bereich bis 20 km fallen also durchschnittliche Kosten von 17,5 €/t an.

Bei kurzen Transportentfernungen ist der landwirtschaftliche Schlepper deutlich kostengünstiger als der LKW. Bei Transportentfernungen über 20 km kehrt sich dieses Verhältnis allerdings um. So ist die Tonne Ballenstroh bei einer Transportdistanz von 25 km per LKW mit 21 € und beim LWS mit 25 € belastet.

C) Die Transportkosten mit Zwischenlager setzen sich zusammen aus den Kosten für den

- Transport Feld-Zwischenlager mit LWS
- Lagerkosten
- Transport Zwischenlager-Werk mit LKW

Der Transport Feld-Zwischenlager führt zu Kosten wie im Fall A, da nach Abb. 11 die Transportentfernungen zu den Lagern innerhalb der Pufferstreifen im Durchschnitt unter 10 km liegen. Hier fallen also Kosten zwischen 10 und 12 € pro Tonne an.

Die Lagerkosten für mobile Mieten mit einer Größe von etwa 250 t, was dem Wochenverbrauch der Fa. ELKA entspricht, fallen Kosten für das Aufschichten der Miete und die Sicherung durch das Abdecken mit Planen an. Die Manipulationskosten belaufen sich auf rund 5,5 €/t und die Kosten für die Planen bei einem Abschreibungszeitraum von 5 Jahren auf 1,5 €/t. Diese Kosten basieren auf den Erfahrungen der Fa. Kunz, die 1.140 t Stroh auf ihrem Gelände gelagert und mit Planen abgedeckt hatten. In der Summe fallen Lagerkosten von etwa 7 €/t an.

Der Transport Zwischenlager-Werk per LKW erzeugt ähnliche Kosten wie der Fall B. Bei maximalen Transportentfernungen Zwischenlager-Werk von 30 km ist mit Kosten von 22,5 €/t zu rechnen.

In der Summe ergeben sich im Fall C Gesamtkosten für Transport zum Zwischenlager, Zwischenlagern und Transport zum Werk von knapp 40 €/t.

#### **4 Schlussbetrachtung**

Ein wichtiges Ziel dieser Studie ist es, die Machbarkeit einer kontinuierlichen Belieferung eines Werkes mit Stroh aufzuzeigen. Dabei sollen die Transportkosten durch optimale Logistik soweit als möglich minimiert werden. Beide Ziele wurden erreicht.

Bedauerlicherweise wurde im Jahr 2008 von der Fa. ELKA weder Stroh von Getreide noch von Raps eingekauft. Auch der geerntete Miscanthus wurde an andere Abnehmer abgegeben. Die derzeitigen Holzpreise sind so weit gefallen, dass Stroh in der Relation zu teuer ist. Die Studie konnte also das weitere Ziel, das logistische Konzept für die Ernte des Jahres 2008 konkret zu erstellen, nicht verwirklichen, da keine Vertragsabschlüsse zum Kauf von Stroh vorlagen.

Der alternative Ansatz, Stroh als Rückfrachtgut zu transportieren, lässt sich methodisch in ähnlicher Form, wie in dieser Studie gestalten. Hier würde sich die Potentialschätzung von Stroh auf die Leerfahrtrouten von LKWs, die unbeladen nach Morbach fahren beziehen. Diese Routen können mit einem Pufferstreifen von 5 km versehen werden. Das Stroh innerhalb dieser Streifen entspricht dem zu 10 % nutzbarem Potential. Statt der Leerfahrten Werk-Zwischenlager könnten die LKWs dann die Zwischenlager auf der Rückfahrt entlang der Leerfahrtrouten ansteuern und Stroh laden. Dieses Konzept dürfte zu erheblichen Einsparungen bei den Transportkosten und bei der Ressourceneffizienz führen, wenn die Fa. ELKA über die entsprechenden LKW verfügt.

Das entwickelte Logistikkonzept ist jedoch nicht nur für die Versorgung eines Spanplattenwerkes von Bedeutung. Das methodische Vorgehen lässt sich auch auf die energetische Nutzung von Stroh übertragen. Statt der logistischen „Transportsenke“ Morbach könnten auch für andere Orte in Rheinland-Pfalz nach Potentialschätzungen für Stroh optimale Standorte berechnet werden, bei denen die Transportentfernungen und der sonstige logistische Aufwand minimiert sind.

#### **5 Literatur**

Domschke W., Drexl A. (1996): Logistik: Standorte. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 276 S.

Neumann K (1975): Operation Research Verfahren. Carl Hanser Verlag München Wien. 371 S.