

Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik

Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz

Martin Ziesak

Vollständiger Abdruck der von dem Promotionsausschuss der Studienfakultät für
Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors rer. silv.

genehmigten Dissertation.

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. Dietmar Matthies
2. Prof. Dr. Hans-Dietrich Quednau
3. Prof. Dr. Martin Moog

Datum der mündlichen Prüfung: 13. 10. 2004

Inhalt

0	Vorwort	8
1	Einführung	9
1.1	Holzernte.....	9
1.2	Rahmenbedingungen.....	12
1.2.1	Gesetze und Richtlinien.....	14
1.2.1.1	Bodenschutzgesetz	14
1.2.1.2	FFH-Richtlinie	15
1.2.2	Zertifikate	16
1.2.3	Zusammenfassung und Folgerung	17
2	Wirkungspfad „Maschine — Boden — Baum“	19
2.1	Pfad Fahrzeug → Reifen	19
2.2	Pfad Reifen bzw. Kette → Boden	20
2.2.1	Reifen.....	20
2.2.2	Ketten.....	21
2.2.3	Druckausbreitung im Boden	22
2.3	Pfad Boden → Wurzel bzw. Pflanze.....	23
2.4	Pfad Boden → sonst. Organismen und Bodenchemie.....	25
2.5	Regeneration der Bodenverdichtung	26
2.6	Übersicht der Einflussfaktoren.....	26
2.7	Bisherige Bodenschutzkonzepte und deren Würdigung.....	28
2.7.1	Bodenschutzrichtlinie des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern (1997).....	28
2.7.2	Beurteilungshinweise zur Bodenstruktur in Waldböden (GAERTIG ET AL., 2000)	29
2.7.3	Grenzwerte für sichere Achslasten bei der Zuckerrohrernte (KANALI ET AL., 1996).....	30
2.7.4	TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung (DISERENS und SPIESS, 2004).....	30
2.7.5	Entscheidungsunterstützungssystem zur Beurteilung von Verdichtung in landwirtschaftlichen Böden (CANILLAS UND SALOKHE, 2002).....	31
2.7.6	Vereinfachte Abschätzung der Bodendichte, (O’SULLIVAN ET AL., 1999).....	32
2.7.7	Schadbeurteilungskonzept nach STOKES (1994).....	33
2.7.8	Gefährdungsklassifikation nach LÖFFLER (1982) / MÜLLER (1987).....	33
2.7.9	Risikoabschätzung für Böden auf Bodenveränderungen durch die Holzernte (MCNABB, 1993)	34
2.7.10	Konzept der Landesforstverwaltung Niedersachsen (NLF, 1992).....	35
2.7.11	Managementstrategie für Holzerntemaßnahmen in südafrikanischen Plantagenwäldern (SMITH, 1999)	35
2.7.12	Zusammenfassung der genannten Konzepte.....	36
3	Lösungsansatz.....	41
3.1	Boden.....	42
3.2	Statische Kräfte.....	44
3.2.1	Maschinen.....	45
3.2.2	Reifen.....	46
3.2.2.1	Berechnung der Reifenkontaktfläche	49
3.2.2.2	Berechnung des Kontaktflächendruckes	52
3.2.2.3	Beurteilung der Kontaktflächen- und Bodendruckherleitung	63
4	Struktur des Informationssystems.....	65
4.1	Anforderungsliste	65
4.1.1	Lauffähigkeit.....	66
4.1.2	Benutzerfreundlichkeit	66
4.1.2.1	Softwareergonomischer Kriterien	67
4.1.2.2	Zusatzelemente des Programms.....	67
4.1.3	Leistungsfähigkeit	67

4.1.4	Kosten	68
4.1.5	Wartbarkeit	69
4.2	Datenmodellierung, Datenstruktur	69
4.2.1	Ausschnittbildung, Abstraktion	69
4.2.2	Konzeptionelles Schema	69
4.2.2.1	Assoziationstypen, Kardinalität	70
4.2.2.2	Grafische Darstellung	71
4.3	Informationsfluss	76
4.4	Umsetzung: Entwurf, Implementierung, Test	76
4.4.1	Programmiersprache	77
4.4.2	Datenzugriff	78
4.4.3	Gesamtstruktur des Informationssystems	78
4.5	Dialoggestaltung	79
4.5.1	Eingabemaske „Maschinendaten“	79
4.5.2	Eingabemaske „Boden“	81
4.6	Entwicklungsgeschichte	82
5	Beurteilung des Informationssystems	86
5.1	Inhaltliche Aspekte	86
5.1.1	Evaluierung unter praxisnahen Bedingungen	86
5.1.2	Überprüfung unter Laborbedingungen	89
5.2	Beurteilung aus der Nutzerperspektive	91
5.2.1	Waldbesitzer	91
5.2.2	Maschineneinsatzleiter, Forstunternehmer	92
5.2.3	Naturschutz	92
5.3	Praktikabilität von ProFor	93
5.3.1	Messgröße Bodenwassergehalt	93
5.3.2	Datenbasis	94
5.3.3	Direkthinweise	94
6	Ausblick	95
6.1	Erweiterung des Berechnungsweges	96
6.2	Erweiterung der taktisch-operativen, sowie strategischen Einsatzmöglichkeiten	96
7	Zusammenfassung	99
7.1	Abstract	100
8	Literatur	101
8.1	Artikel, Zeitschriften, Proceedings, Bücher, usw.	101
8.2	Literaturstellen aus dem Internet	113
9	Anlagen	114
9.1	Anlage 1: Ausschnitt aus der PEFC-Kriterienliste	114
9.2	Anlage 2: Berechnung der gefitteten Werte für Reifen T2	117
9.3	Anlage 3: Herleitung der Kontaktflächenberechnung	119
9.4	Anlage 4: Reifenindividuelle Druckermittlung für Reifen N5	128
9.5	Anlage 5: Handbuch des Programmes ProFor	130

Abbildungen

Abb. 1: Die Zahl der in Deutschland eingesetzten Harvester nahm in dem dargestellten Zeitraum von 1990 bis 2000 deutlich zu (HAMBERGER, 2001)	9
Abb. 2: Beispiel für einen auch im Steilgelände einsetzbaren Harvester (Foto: von Bodelschwingh)10	
Abb. 3: Gewichtszunahme bei landwirtschaftlichen Schleppern, Zahlen nach LÖFFLER (1988).....	11
Abb. 4: Schematischer Überblick der Wirkungspfade an einem Radfahrzeug	19
Abb. 5: Die an einem angetriebenen Rad auftretenden Kräfte	20
Abb. 6 (links): In einer Tiefe von 10 cm gemessener Bodendruck, gleicher Reifen aber variierender Reifenfülldruck (verändert nach WEIßBACH, 2001).	21
Abb. 7 (rechts): Vergleich des Kontaktflächendrucks bei festem und lockerem Untergrund (verändert nach WEIßBACH & ISENSEE, 2000).	21
Abb. 8: Gemessene Druckverteilung in einer Bodentiefe von 23 cm bei verschiedenen Kettenfahrzeugen (WONG, 1993 zitiert nach THUVESEN, 1997)	22
Abb. 9: Druckzwiesel unter einem Reifen, der sich von links nach rechts bewegt (BOLLING, 1987)...	23
Abb. 10: Wachstumsverluste, dargestellt für Kiefer und Fichte bei ansteigendem Anteil an betroffener Durchwurzelungsfläche. Abb. nach WÄSTERLUND (1988).....	24
Abb. 11: Größenklassen und Größenspektren der wichtigsten Bodentiergruppen mit Angabe der vorwiegenden Nahrung (mi: mikrophytophag; ma: makrophytophag), (SCHARDT, 2003).	25
Abb. 12: Auflastabhängige Änderung der Porenziffer im Erstverdichtungsbereich für Tone und tonige Lehme (Tongehalt > 35%) bei verschiedenen Gehalten an organischer Substanz (DVWK, 1997).....	27
Abb. 13: Schematisierter Versuchsaufbau und Auswerteweg des Befahrungsversuches	42
Abb. 14: Schemadarstellung der Unbedenklichkeitsgrenze im Versuchsfeld.....	43
Abb. 15: Exemplarische Grenzbelastungskurve für eine Bodenklasse.....	44
Abb. 16: Maximale Radlast über Gesamtmasse bei forstüblichen Vierradmaschinen	45
Abb. 17: Vergleich der maximalen Radlast bei Harvestern mit vier, sechs und acht Rädern.....	46
Abb. 18: Schematisierter Versuchsaufbau der Reifenuntersuchung	47
Abb. 19: Beispielabdrücke der Reifenuntersuchung, Foto: Matthies	49
Abb. 20: Reifenindividuelle Anpassung der Kontaktfläche.....	49
Abb. 21: Generelle Reifenflächenfunktion.....	50
Abb. 22: Residuenvergleich der beiden Kontaktflächenanpassungen.....	52
Abb. 23: Radlastverteilung in einer Reifenaufstandsfläche (CALDERA und SOMMER, 1997)	53
Abb. 24: Lastwinkelmodell, nach ABEELS, 1992	53
Abb. 25 a und b: Druckzonenmodell	54
Abb. 26 a, b, c: Kontaktflächendruck über Radlast und Innendruck, Gleichungen von Rang 1, 5 und 11	56
Abb. 27: Empfohlene Anpassungsgleichung für Reifen N5	57
Abb. 28: Grafische Darstellung der Reifendruck-Vorhersagegleichung im Vergleich mit den Vorgabewerten für Reifen N5	60
Abb. 29: Residuenvergleich für Reifen N5, reifenindividuelle Anpassung gegen generelle Anpassung.....	61
Abb. 30: Einfluss veränderter Reifenbreite auf den Bodendruck	62
Abb. 31: Bodendruck bei variierendem Reifendurchmesser.....	62
Abb. 32: Einfluss sich verändernder PR-Zahl bei unterschiedlich dimensionierten und belasteten Reifen.....	63
Abb. 33: Vergleich der errechneten Reifenkontaktfläche bei Anwendung verschiedener Berechnungsmethoden. In rot ist das auf Basis dieser Arbeit ermittelte Resultat markiert (verändert nach SAARILAHTI, 2002).	63
Abb. 34: Vergleich der Kontaktdrücke bei Verwendung verschiedener Berechnungsmethoden. Das auf Basis dieser Arbeit ermittelte Ergebnis ist rot markiert (verändert nach SAARILAHTI, 2002).	64
Abb. 35: Wichtige innere und äußere Software-Qualitätskriterien, verändert nach PAGEL und SIX (1994).....	65
Abb. 36: ER-Diagramm	71
Abb. 37: Beispiele für Kardinalitätsangaben in ER-Diagrammen (nach LOOS, 1996 und KNOLMAYER und MYRACH, 1990, leicht verändert).....	72
Abb. 38: Darstellungsmethodik im konzeptionellen Modell.....	73
Abb. 39: Ausschnitt der für die Problemlösung relevanten Objekte, dargestellt als ER-Diagramm ...	74
Abb. 40: Vereinfachtes ER-Diagramm. Nutzerbezogene Daten sind gelb markiert.	75

Abb. 41: Informationsfluss aus Anwendersicht, „ProFor“ ist der Name des Kalkulationsprogramms	76
Abb. 42: Prinzip der interpretierten Programmiersprache Java	77
Abb. 43: Gesamtstruktur des Informationssystems:	79
Abb. 44: Dynamische Fenstergestaltung: Beispiel: Anwendbarkeit von Bogiebändern (rot) und Maschinen mit unterschiedlicher Zahl an Achsen (blau)	80
Abb. 45: Bearbeitungsrichtung bei Festlegung der Maschinenparameter	81
Abb. 46: Nutzerführung in der Eingabemaske „Boden“	81
Abb. 47: Dialogfenster "Boden", Dialogelemente	82
Abb. 48: Evaluierung im FoA Kleve. Ebene: Bodenwassergehalt 30 %, Spurtiefe unter 5 cm. (Foto: Matthies)	88
Abb. 49: Evaluierung im FoA Kleve: Hang: Bodenwassergehalt 33 %, Spurtiefe im Mittel zwischen 10 und 13 cm. (Foto: Matthies)	88
Abb. 50: Evaluierung FoA Kleve: Hangfuß: Bodenwassergehalt 40 %, Spurausprägung inakzeptabel (Foto: Matthies)	89
Abb. 51: Veränderung einer Bodenpore bei verschiedenen Belastungen, verändert nach SCHARDT (2003)	90
Abb. 52: FDR-Sonde, links mit frei erkennbaren Sondenspitzen, rechts während einer Messung	93
Abb. 53: Eingabe- und Ausgaberichtung des existierenden Informationssystems	95
Abb. 54: Eine erste Erweiterung entsteht durch „Drehen“ des Dreieckes	95
Abb. 55: Ein veränderter Berechnungspfad eröffnet neue Berechnungsperspektiven	96
Abb. 56: ProFor, Erweiterung um eine Zeitachse	97
Abb. 57: Schematischer Überblick der denkbaren Erweiterungen von ProFor zu "ProFor+"	98

Tabellen

Tabelle 1: Gründungsjahr von Umweltinteressensverbänden (Auswahl) [siehe auch UMWELTGESCH]	12
Tabelle 2: Einrichtungsjahr einiger umweltbezogener Behörden und Ministerien	13
Tabelle 3: Überblick der gefundenen Parameter	37
Tabelle 4: Übersicht der Zielgrößen für die Beurteilung der Befahrungssituation	37
Tabelle 5: Bewertender Überblick der vorgestellten Bodenschutzkonzepte	39
Tabelle 6: Ökosystemare Beurteilungsklassifikation nach KREMER, 1998	42
Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Reifen	48
Tabelle 8: Ausschnitt der ermittelten Anpassungsgleichungen für Reifen N5	56
Tabelle 9: Übersicht der Evaluierungsflächen in NRW. Es bedeuten:	87
Tabelle 10: Semiquantitative Bewertung der Veränderung der mittleren Porenquerschnittsflächen und Strukturdeformationen in Abhängigkeit von Belastung und Wassergehalt (Standort Scheyern), verändert nach SCHARDT, 2003	90

0 Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München. Sie baut auf Forschungsarbeiten auf, die bereits in den 80er Jahren von Prof. em. Dr. Dr. h.c. Löffler an diesem Lehrstuhl initiiert wurden.

Mein erster und aufrichtiger Dank geht an meinen Betreuer und Gutacher, Herrn PD Dr. Dietmar Matthies, der mir dieses Thema großzügig zur Verfügung stellte. Sein steter Rat half, manche Klippe elegant zu überwinden.

Des Weiteren möchte ich mich beim Leiter des Lehrstuhles, Herrn Prof. Dr. Walter Warkotsch, für die angenehme Arbeitsatmosphäre und den zugestandenen Freiraum bedanken, welche für kreatives wissenschaftliches Arbeiten von so unschätzbarem Wert sind. In gleichem Zuge möchte ich alle Kollegen des Lehrstuhles, wie auch jene des Lehrbereiches Biometrie und Angewandte Informatik, in diesen Dank mit einbeziehen.

Ohne finanzielle Unterstützung ließen sich derart umfangreiche Vorhaben, in die der hier vorgestellte Forschungsansatz integriert war, kaum realisieren. Deshalb darf der Geldgeber des Projektes nicht unerwähnt bleiben. Die Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten, NRW, vertreten durch die Waldarbeitsschule Neheim-Hüsten waren die unterstützenden Partner. Die genannte Institution bekommt ihr Gesicht durch einige hier zu benennende Personen, dies sind Herr Prof. Dr. H. Jacke, ehemals Leiter der Waldarbeitsschule, jetzt Vorstand des Institutes für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie, Herr Thilo Wagner, der jetzige Schulleiter, sowie Herr Norbert Nolte. Ihnen allen gebührt für die gewährte Unterstützung ebenfalls ein herzliches „Danke schön“.

1 Einführung

1.1 Holzernte

Betrachtet man die Entwicklung der forstlichen Mechanisierung seit etwa 1950, so ist diese Entwicklung durch folgende, wesentliche Tendenzen geprägt.

1. Ausweitung des Arbeitsspektrums, der im Wald fahrenden Maschinen

Waren zu Beginn der 50er Jahre im Wald als einziger Fahrzeugtyp fast ausschließlich Schlepper für Rücketätigkeiten zu finden, so existieren heute für fast sämtliche Betriebsarbeiten Spezialmaschinen.

Ihr Tätigkeitsspektrum reicht heutzutage von der Kulturbegründung (Maschinen zur Bodenvorbereitung, Pflanzung), Kulturpflege und Läuterung (Mulchgeräte) über die Durchforstung bis zur Endnutzung (Harvester zum Fällen und Einschneiden, Forwarder zum Rücken, Kombinationsmaschinen („Harwarder“) für beide Aktivitäten).

2. Anwachsen der Anzahl der im Wald fahrenden Maschinen

Mit dem Vorhandensein entsprechender Maschinen war eine Voraussetzung zu deren breiter Einführung gegeben. Die tatsächliche Akzeptanz und damit die flächige Einführung erfolgte in den Forstbetrieben vor allem wegen des sich zunehmend verschlechternden Preis-Kosten-Gefüges und dem damit einhergehenden Zwang zur Mechanisierung.

So konnten sich Harvester und Forwarder bei der Aufarbeitung der Sturmkatastrophen zu Beginn der 90er Jahre für jedermann sichtbar bewähren und nehmen seitdem einen festen Platz in der deutschen Forstwirtschaft ein.

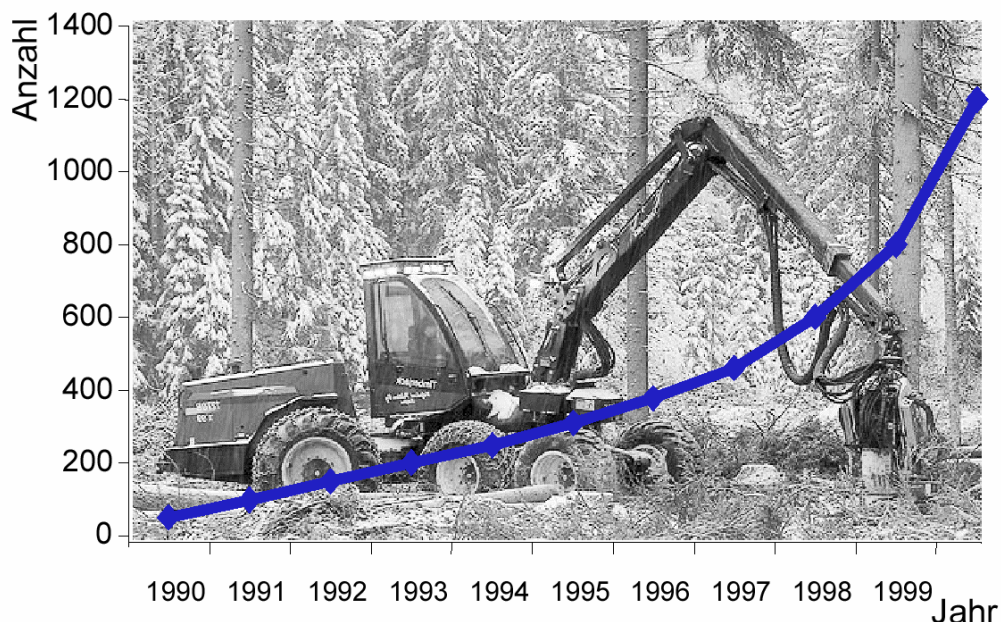


Abb. 1: Die Zahl der in Deutschland eingesetzten Harvester nahm in dem dargestellten Zeitraum von 1990 bis 2000 deutlich zu (HAMBERGER, 2001)

Die Anzahl der in Deutschland eingesetzten Harvester ist nicht exakt dokumentiert, doch liegen Schätzungen dazu vor, welche die Entwicklung der hier verfügbaren Systeme widerspiegeln (HAMBERGER, 2001, Abb. 1). Auch der

von FORBRIG (2000) dargelegte Anstieg des Mechanisierungsgrades um mehr als 30 % in der Zeit von 1988 bis 1995 belegt diese Tendenz.

3. Saisonale Verlagerung der Holzernteaktivitäten

Einschlag und Holzbringung waren zu Beginn des Betrachtungszeitraumes stark saisonal geprägt. Ausgenommen die schneereichen Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen, wurden die genannten Arbeiten fast ausnahmslos im Winter erledigt. Damit waren erforderliche Fahrbewegungen zum Holzrücken meist auf jene Zeit konzentriert, in der Bodenfröste eine mechanische Gefährdung der Böden ausschlossen.

Inzwischen wird ganzjährig eingeschlagen und auch gerückt. Somit unterliegen die Böden einer viel höheren Gefährdung.

4. Erschließen von bislang nicht oder nur bedingt befahrbar geltenden Flächen

Technische Entwicklungen haben jüngst dazu geführt, dass nun auch vermehrt in **Steillagen** Harvester und Forwarder ihr Einsatzgebiet finden. Ermöglicht wurde dies durch technische Weiterentwicklungen wie automatisch nivellierende Radaufhängungen, Tilteinrichtungen und die Einführung forsttauglicher Kettenfahrzeuge. Im Endeffekt bedeutet dies, dass Flächen, die bislang der motormanuellen Fällung in Kombination mit Seilbringungen vorbehalten waren, nun mit Harvester und Forwarder befahren werden (Abb. 2). Belegt wird diese Aussage durch die Zahl der im gebirgigen Österreich eingesetzten Harvester. So war man noch 1990 der Meinung, dass man „mit der geringen Anzahl von 7 Harvestern für alle Zukunft auskommen werde“ (PRÖLL 2002). Eine aktuelle Erhebung für das Jahr 2002 zählt aber bereits 192 österreichische Harvester (PRÖLL, 2002).



Abb. 2: Beispiel für einen auch im Steilgelände einsetzbaren Harvester (Foto: von Bodelschwingh)

Ebenso gehören **Weichböden und Nassstandorte** zu jenen Flächen, die früher nicht, neuerdings von raupengestützten Fahrzeugen befahren werden.

5. Tendenz zur Verbreitung schwererer Maschinen

FORBRIG (2000) stellte für die Landesforstverwaltungen der Länder Baden-Württemberg und Hessen Zahlenreihen über den Maschinenbestand für den Zeitraum von 1988 bis 1995 vor. Daraus kann man entnehmen, dass der Anteil der Schlepper mit weniger als 60 kW Motorleistung, also jene Geräte die auch geringere Gesamtmassen aufweisen, zurückgeht, während der Anteil schwerer Geräte (über 60 kW Motorleistung) deutlich zunimmt (vergleiche auch HAMBERGER, 2001). Diese Tendenz setzt allerdings schon früher ein, so gibt LÖFFLER, 1988 für die „häufigsten Schleppertypen in der Landwirtschaft der BRD“ einen Anstieg der reinen Schleppermasse von 1400 kg im Jahr 1958 auf 3570 kg in 1983 an (siehe Abb. 3).

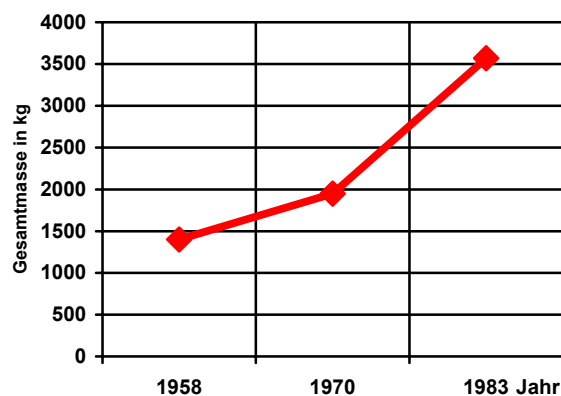


Abb. 3: Gewichtszunahme bei landwirtschaftlichen Schleppern, Zahlen nach LÖFFLER (1988)

Aussagen zur Gewichtsentwicklung bei anderen Gerätegattungen sind nur bedingt möglich. Doch scheint auch hier ein Trend zu bestehen, dass der Anteil der schweren Geräte eher zunimmt als abnimmt. Als Indiz hierfür kann man die in jüngster Zeit vermehrt angebotenen Starkholzharvester, zum Teil mit Kranreichweiten von bis zu 15 Metern, oder auch Forwarder mit einer Ladekapazität von über zwölf Tonnen nehmen. Ebenso stützt diese These der Gewichtszunahme das von PAUSCH (2002) beobachtete Ansteigen der von Harvestern aufgearbeiteten BHDs. Dies liegt darin begründet, dass größere Aufarbeitungsdurchmesser üblicherweise mit höherer Motorleistung und somit auch höherem Maschinengewicht einhergehen. Für Österreich werden ähnliche Aussagen zur zukünftigen Gewichtsentwicklung getroffen (PRÖLL, 2001), welche sich in der aktuellen Erhebung (PRÖLL, 2002) zu bestätigen scheinen.

Die aufgezeigte Entwicklung wird übrigens auch an landwirtschaftlichen Maschinen beobachtet (GYSI, 2000).

Alle fünf Punkte zusammengefasst belegen, dass die Belastung des Bodens durch Befahrung seit den 50er Jahren gewaltig zugenommen hat. Im Wesentlichen ist dies auf die erhöhte Befahrungshäufigkeit zurückzuführen (siehe Punkt 1, 2 und 4), zum Teil auf die Verlagerung der Einschlag- und Bringungstätigkeit sowie auf die Zunahme der Gerätegewichte.

Auf Grund der zurzeit gegebenen Verhältnisse in der deutschen Forstwirtschaft kann man auch für die Zukunft von keiner Änderung für diese Entwicklungen ausgehen, sondern muss eher mit einer Verschärfung der Befahrungssituation (siehe auch

Punkt 5) rechnen. Diese soeben dargelegte Situation stellt im Prinzip keine neue Erkenntnis dar, sie wurde bereits vor der letzten großen Mechanisierungswelle zu Beginn der 90er Jahre z.B. von WEIGER 1988 richtig vorhergesehen.

1.2 Rahmenbedingungen

Neben dieser rein forsttechnisch orientierten Betrachtung ist zur Darlegung der Situation auch die Erläuterung der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen nötig, da deren Einfluss auf die forstliche Bewirtschaftung im Betrachtungszeitraum sowohl direkt wie indirekt zugenommen hat.

Das wachsende Interesse der Bevölkerung am Erhalt und Schutz der Umwelt kann an den verschiedensten Dingen dargelegt werden. Als Beleg hierfür sei an dieser Stelle auf Interessensverbände zum Natur- und Umweltschutz (Tabelle 1) und die eigenständigen Umweltbehörden und Ministerien (Tabelle 2) hingewiesen. Das gestiegene Verantwortungsbewusstsein hat zur Folge, dass vermehrt auch die Aktivitäten der Förster im Wald mit kritischem Blick begutachtet werden. Als Ergebnis dieser Situation haben sich politische Prozesse etabliert, welche Richtlinien und Gesetze entstehen lassen, die sich unmittelbar auf die forstliche Handlungsfreiheit auswirken.

Tabelle 1: Gründungsjahr von Umweltinteressensverbänden (Auswahl) [siehe auch UMWELTGESCH]

Gründungsjahr	Name der Organisation / Kommentar
1961	Stiftung World Wide Fund for Nature, heute World Wildlife Fund (WWF) Ihr Ziel ist der Schutz und die nachhaltige Nutzung der biologischen Vielfalt durch das Bewahren der Lebensräume und der Arten, sowie Veränderungen von Konsumverhalten. (SCOTT, SIR PETER)
1968	Club of Rome Zur Diskussion der sich abzeichnenden Weltprobleme wird der "Club of Rome" gegründet, vor allem auf Initiative von Aurelio Peccei und unter Mitarbeit von Alexander King, Dennis Gabor, bald auch von Hasan Ozbekhan.
1971	Greenpeace Das Ziel ist der Erhalt von biologischer Vielfalt und der Schutz vor Umweltverschmutzung und Klimaveränderungen. Zur Durchsetzung dieser Ziele werden Kampagnen zu den Themen Klimaschutz, Überfischung und Verschmutzung der Weltmeere, Schutz und nachhaltige Nutzung der Tropischen Regenwälder, Treibnetzfischerei und den kommerziellen Walfang organisiert (LEIPOLD).
1971	FRIENDS OF THE EARTH INTERNATIONAL (FoEI) FoEI hat 57 nationale Nichtregierungsorganisationen als Partner. Die deutsche Partnerorganisation ist der BUND. Das Ziel dieser Vereinigung ist der Schutz und die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. Schwerpunktthemen sind die Tropischen Regenwälder, der Schutz der Weltmeere und die Klimaveränderung.

1975	BUND Gründung des „Bund für Natur – und Umweltschutz Deutschland“ (BNUD) durch Horst Stern, Prof. Bernhard Grzimek, Dr. Herbert Gruhl und weitere 19 Gründungsmitglieder in Marktheidenfeld. 1977 Umbenennung des Verbandes in Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) [BUND].
1982	Robin Wood Gegründet wurde Robin Wood von einem Dutzend Umweltschützern. Themen des Vereines sind: saurerer Regen, die Zerstörung der Tropenwälder, Energieverschwendung, Müllflut und eine vernünftige Verkehrspolitik. [ROBIN-WOOD]

Der Rahmen für das unmittelbare Handeln wird durch etliche Konventionen vorgegeben. Eine erwähnenswerte ist die auf dem „Erdgipfel“ 1992 in Rio de Janeiro verabschiedete Übereinkunft. Sie umfasst insgesamt fünf Vereinbarungspakete, die alle den Schutz der Umwelt und die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung zum Inhalt haben. Einer dieser fünf Punkte, die Agenda 21, ist Basis für die Entwicklung nationaler Nachhaltigkeitsstrategien (AGENDA 21). Diese wurde auch in Deutschland inzwischen Bestandteil politischen Handelns (BUNDESPRESSEAMT 2001). Ein weiterer, allerdings juristisch nicht bindender Part der Rio-Vereinbarung ist die Darlegung über Waldbewirtschaftung (Agenda 21-2).

Während diese, im globalen Kontext erstellten Richtlinien von eher allgemeiner Natur sind, wurden auf Nachfolgekonferenzen regionalisierte und deutlich konkretisierte Kriterien und Indikatoren für die nachhaltige Bewirtschaftung zusammengestellt. 1993 kamen solche Einigungen in Montreal zwischen 14 außereuropäischen Ländern der gemäßigten und borealen Zone zustande, in Helsinki einigten sich die Europäer.

Tabelle 2: Einrichtungsjahr einiger umweltbezogener Behörden und Ministerien

Jahr	Behörde, Ministerium
1967	NATUROPA Informations- - und Dokumentationszentrum für Naturschutz Naturopa ist ein Organ des Europarates (Mitgliedsstaaten des Europarates sind auch Mitglieder von Naturopa). Ziel ist es, die Öffentlichkeitsarbeit in den Bereichen Umwelt - und Naturschutz auf europäischer Ebene zu verbessern. [NATUROPA]
1970	In Bayern: Umweltministerium Das eigenständige Ministerium ist weltweit das erste seiner Art. [UMWELT BAY]
1974	Auf Bundesebene: Umweltbundesamt Im Geschäftsbereich des Bundesinnenministeriums wird eine selbständige Bundesoberbehörde unter der Bezeichnung "Umweltbundesamt" errichtet.
1976	Auf Bundesebene: Umweltministerium [UMWELT BUND]
1987	In Baden-Württemberg: Umweltministerium [UMWELT BW]

Es lassen sich nun zwei Normenebenen unterscheiden, auf die sich der dargelegte Wertewandel auswirkt: Unmittelbar bindend sind von Bundes- bzw. Landesregierung oder EU-Parlament erlassene Richtlinien und Gesetze (siehe Kapitel 1.2.1).

Zertifikate, als das zweite Produkt, haben noch nicht den bindenden Charakter wie Gesetze. Zwar sind Forstbetriebe noch frei, sich für oder gegen eine Zertifizierung zu entscheiden, ebenso können sie auch das gewünschte Zertifikat frei wählen. Doch darf nicht übersehen werden, dass die Diskussion über die Zertifizierung ein der Forstwirtschaft von außen auferlegter Vorgang ist und dass es ein Versuch der Öffentlichkeit ist, „mehr Einfluss auf die Waldbesitzer zu gewinnen“ (ERLER, 2000).

1.2.1 Gesetze und Richtlinien

Die Zunahme an Regelungen in umweltrelevanten Dingen belegt die steigende Bedeutung, die der Gesetzgeber dem Thema Umweltschutz entgegenbringt (Vergleiche hierzu auch UMWELT BUND).

Entsprechend seiner gesellschaftlichen Bedeutung ist der Umweltschutz seit 1994 auch als Staatsziel im Artikel 20a Grundgesetz verfassungsrechtlich verankert:

“Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung.“

1.2.1.1 Bodenschutzgesetz

Nachdem die Bundesregierung 1985 die Bodenschutzkonzeption vorgelegt hatte, wurde der Bodenschutz in über fünfzig Normen des Bundesrechts verankert. Das Schutzgut „Boden“ wurde damit z.B. im Bundesnaturschutzgesetz oder auch im Bundesimmissionsschutzgesetz berücksichtigt. Allerdings fehlten noch konkrete Standards, die eine effektive Umsetzung des Bodenschutzes ermöglicht hätten. Da weitergehende Bodenbeeinträchtigungen zu befürchten waren, legte der Bundesgesetzgeber ein eigenständiges, auf das Medium Boden ausgerichtetes Gesetz vor. Nach langen Diskussionen wurde das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 (Bundesgesetzblatt I, Seite 502) verabschiedet und trat am 1. März 1999 in Kraft. Das Gesetz verpflichtet jeden, sich so zu verhalten, dass keine schädlichen Bodenveränderungen verursacht werden. (aus: PRESSESTELLE DER LANDESREGIERUNG SCHLESWIG-HOLSTEIN, 2001)

Die Bundesländer müssen den effizienten Vollzug dieses Rahmengesetzes des Bundes sicherstellen. Einige Bestimmungen des Bundesgesetzes setzen voraus, dass es landesrechtliche Regelungen gibt. Gleichzeitig muss der Spielraum, den das Bundes-Bodenschutzgesetz den Ländern lässt, gefüllt werden. Deshalb wurden von den Länderparlamenten entsprechende Gesetze verabschiedet. Exemplarisch seien hier genannt die Länder Bayern (Bayerisches Bodenschutzgesetz, BayBodSchG, erlassen am 23.2.1999), Niedersachsen (Niedersächsische Bodenschutzgesetz, NBodSchG, erlassen am 19.2.1999) und Nordrhein-Westfalen (Landesbodenschutzgesetz, LBodSchG, erlassen am 9.5.2000) stellvertretend für jene Länder, die bereits eine entsprechende Landesregelung verabschiedet haben. Eine Sonderstellung nimmt Baden-Württemberg ein, das unabhängig von der

Bundesvorgabe als erstes Land eine gesetzliche Regelung schuf (Bodenschutzgesetz des Landes Baden-Württemberg, BodSchGBW, erlassen am 24.6.1991).

Die neuen gesetzlichen Bestimmungen gehen über die reine Thematik „*Altlasten*“ weit hinaus. Der Boden wird zu einem Schutzgut. Neben Altlasten werden erstmalig auch sogenannte "*Schädliche Bodenveränderungen*" im Gesetz aufgenommen. Schutzziel des Gesetzes ist es insbesondere Vorsorge zu treffen, dass schädliche Bodenveränderungen auch zukünftig nicht entstehen. Außerdem soll die Bodenfunktion gesichert bzw. wiederhergestellt werden und schließlich soll Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen getroffen werden.

Das BBodSchG wendet sich vorrangig mit den Mitteln des Ordnungsrechts an diejenigen, die den Boden nutzen oder im Rahmen wirtschaftlicher Tätigkeit auf den Boden einwirken. Damit gehören auch Forstbetriebe prinzipiell zu jenen, die von diesem Gesetz unmittelbar angesprochen werden.

Einschränkend muss man aber auf existierende Interpretationen des Gesetzes hinweisen, wo davon gesprochen wird, dass „die Forstwirtschaft nur in Randbereichen betroffen ist“ (GAUER, 1999). Demnach läge der Schwerpunkt des Gesetzes scheinbar doch im stofflichen bzw. im Bereich der Altlasten (JONECK, 1997). Ebenso ist zwar für die landwirtschaftliche Bodennutzung im § 17 des BBodSchG die Konkretisierung der „guten fachlichen Praxis“ enthalten, nicht aber für die Forstwirtschaft (siehe hierzu auch GIESEN, 2003).

Diesen Einschränkungen steht aber z.B. entgegen, dass sowohl im BBodSchG in § 3 Absatz 1 Ziffer 6 für den Anwendungsbereich sehr wohl der Forst eingeschlossen wird, und auch die Landesgesetzgebung, z.B. im BayBodSchG unter Artikel 13 (Ausgleichsleistungen bei Beschränkung der land- und forstwirtschaftlichen Bodennutzung) ausdrücklich auch der Forst aufgenommen ist und somit sehr wohl forstliche Relevanz gegeben ist.

Unabhängig von der Interpretation bleibt aber auch hier festzuhalten, dass mit dem Erscheinen des BBodSchG ein weiteres Gut, der Boden, von Rechts wegen geschützt wird.

Die Aktualität der Problematik lässt sich auch aus dem Umweltgutachten 2000 (BEHRENDT ET AL. 2000) ablesen, welches die „Regelung der physikalischen Schadeinwirkung“ auf Böden und die „Vermeidung von Bodenverdichtung“ eindeutig in das Blickfeld rückt.

1.2.1.2 FFH-Richtlinie

Die Richtlinie 92/43/EWG zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie wildlebenden Tiere und Pflanzen, oft auch als FFH-Richtlinie bezeichnet, wurde 1992 von der Europäischen Kommission verabschiedet (EU-RICHTLINIE 92/43). FFH steht für Flora, Fauna, Habitat. Die FFH-Gebiete bilden künftig mit Vogelschutzgebieten das europäische Schutzgebietssystem "Natura 2000". Als ein europaweites Netz unterscheidet sich "Natura 2000" von früheren Schutzkonzepten, deren Schwerpunkt der Schutz kleinerer und einzelner Gebiete war, während hier nun ein Verbundsystem entstehen soll.

Eine Nutzung durch Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft bleibt in ausgewiesenen Schutzgebieten möglich. Entscheidend ist, dass sich die Nutzungen künftig nicht nachteilig auf Lebensraum und Artenbestand auswirken. Insbesondere die in Artikel 6, Absatz 2 genannten Maßnahmen zur Vermeidung von Verschlechterungen der natürlichen Lebensräume (EU-RICHTLINIE 92/43) sollen dies verhindern. Entsprechend dieser Maßgabe können sich dadurch Einschränkungen für die Bewirtschaftung ergeben.

Der hohe Anteil an Waldflächen an den insgesamt in Natura-2000 eingebrachten Flächen macht den Einfluss deutlich, den diese Richtlinie für die Forstwirtschaft haben kann. In Bayern liegen 60 % der gemeldeten FFH-Flächen im Wald, derzeit sind dies immerhin beachtliche 426 000 ha (MILLER, 2001).

Der Einfluss nichtamtlicher Naturschutzorganisationen im gesamten FFH-Prozeß erscheint ungewöhnlich hoch. Bereits bei der Flächenauswahl können zusätzlich zu den von den Ländern gemeldeten Gebieten auch durch Natur- und Umweltschutzverbände weitere Areale direkt der EU Kommission gemeldet werden (so genannte „Schattenlisten“). Dies geschah z.B. in Nordrhein-Westfalen (NATURSCHUTZVERBÄNDE NRW, 1999). Da die Flächenauswahl allein nach „festgelegten Kriterien und wissenschaftlichen Informationen“ (EU-RICHTLINIE 92/43) erfolgt, können diese Meldungen der Umweltschutzverbände ebenfalls mit einer Schutzgebietsausweisung rechnen. Die kritische Würdigung der amtlichen Meldeliste durch Umweltschutzorganisationen (z.B. EU-Beschwerde wegen unvollständiger Gebietsvorschläge nach der FFH-Richtlinie 92/43/EWG durch baden-württembergische Naturschutzverbände; LNV-BW, 2001) zeigt ebenfalls, mit welchem großem Interesse der nichtamtliche Umweltschutz die Vorgänge um die FFH-Richtlinie begleitet.

Damit belegen die Vorgänge um die FFH-Richtlinie zweierlei:

- Die Zahl der Reglementierungen, die direkt auf die Forstbetriebe wirken, nimmt zu.
- Die Öffentlichkeit gewinnt auf das unmittelbare, forstliche Handeln immer mehr an Einfluss.

1.2.2 Zertifikate

In der Umsetzung haben sich inzwischen für die tägliche Arbeit verschiedene Zertifikate etabliert. Derzeit existieren davon ein Ansatz mit globalem Anspruch, drei für die nördliche Hemisphäre und zwei weitere Ansätze für die Tropen (FSC, 2001 b). Im Folgenden sind nur die für die Nordhemisphäre relevanten Siegel genannt, wovon für Europa nur zwei von Bedeutung sind.

a) ISO 14001

Ein nicht ausschließlich auf Forstbetriebe zugeschnittenes Zertifikat ist das Umweltmanagementsystem **ISO 14001**. Es ist auf Industrieunternehmen zugeschnitten und soll der Einschätzung und Verbesserung von Umweltsystemen dienen (KLINS, 2001). Kanadier und Australier haben erfolglos versucht, diese Normen auf die Waldbewirtschaftung anzuwenden. Deshalb wurde von Kanada eine neue, auf der ISO-Richtlinie aufbauende und kompatible, eigene forstliche Norm, das

CSA-Siegel (Canadian Standard Association, CAN/CSA Z809) vorgelegt. Für Mitteleuropa hat es kaum größere Bedeutung erlangt.

b) Forest Stewardship Council, FSC

Mit globalem Anspruch auf Gültigkeit tritt der Weltforstrat mit seinem **FSC-Siegel** (Forest Stewardship Council) auf. Nationale Anpassungen sichern dabei, dass regionale Aspekte ausreichend berücksichtigt werden. Die von der deutschen FSC Arbeitsgruppe am 13. April 1999 verabschiedeten "Richtlinien nachhaltiger Forstwirtschaft" (Teil 1) und die am 6. November 2000 verabschiedeten "Durchführungsbestimmungen" (Teil 2) sind vom FSC International am 28. November 2001 - nach erfolgreicher Umsetzung von Vorbedingungen - als Deutscher FSC - Standard anerkannt worden (FSC DEUTSCHLAND).

c) Paneuropäisches Nachhaltigkeitszertifikat (PEFC)

Das paneuropäische Nachhaltigkeitszertifikat (PEFC) ist zunächst auf Europa gerichtet und soll neben dem Nachweis und der Förderung einer nachhaltigen Forstwirtschaft insbesondere die Berücksichtigung der Kleinstrukturierung der europäischen Waldbesitzverteilung gewährleisten (DFZR 2000; KLINS, 2000).

Beide Zertifizierungssysteme, FSC wie PEFC, treffen in ihren Durchführungsbestimmungen bzw. Indikatorenlisten unter anderem auch Aussagen zur Befahrung von Waldstandorten, bzw. zum Schutz des Bodens, z.B.:

„Durch die Wahl geeigneter Arbeitsgeräte und Ausrüstung (z.B. Breitreifen, Niederdruckreifen, Gleisketten, etc.) sowie des geeigneten Zeitpunktes wird das schonende Befahren der Rückegassen und die schonende Holzbringung garantiert. ...“ (FSC, 2001b),

- oder -

beim „Einsatz von Pflege-, Ernte- und Transportverfahren, sollen die Baum- und/oder Bodenschäden auf ein Mindestmaß reduziert werden“ (Ausschnitt der PEFC-Indikatoren, DFZR o.J., siehe auch Anlage 1).

1.2.3 Zusammenfassung und Folgerung

Vor diesem Hintergrund wird das Konfliktfeld, in dem sich die Forsttechnik derzeit befindet sehr deutlich:

- Eine massive Zunahme der Belastung des Waldbodens durch Fahrbewegungen kann zu dauerhaften Schäden am Boden und in der Folge auch am Bestand führen (siehe auch Kapitel 2.).
- Auf der anderen Seite engen immer mehr und weitergehende Reglementierungen und der Einfluss der Öffentlichkeit mögliche Freiheitsgrade in der Forsttechnik deutlich ein.

Um diesem Spannungsfeld zu entrinnen, wäre ein Instrument wünschenswert, das folgendes böte:

- **Für den Waldbesitzer** (und zwar aus der Sicht des Eigentümers des Waldbodens):
Es soll Sicherheit für die forsttechnische Einsatzplanung liefern, damit das Schadrisko bei der Befahrung minimiert wird.

Außerdem sollte das Instrument zur Dokumentation und als Nachweis gegenüber externen Stellen dienen können, dass in diesem Forstbetrieb tatsächlich bodenschonend gearbeitet wird.

- ***Für den Maschineneigentümer:***

Das Instrument sollte die bodenschonende Tauglichkeit seiner Geräte einsatzspezifisch liefern können. Für Ersatz- oder Neuinvestitionen sollte ihm eine Aussage zur Verfügung stehen, wie die geänderte bzw. neue Maschine hinsichtlich der Bodenschonung zu beurteilen ist.

- ***Für die Öffentlichkeit:***

Es sollte belegt werden, dass mit der Ressource Boden schonend umgegangen wird und dass bei einem entsprechend geführten Einsatz keine nachhaltigen, schädlichen Veränderungen auftreten.

Solch ein Instrument soll in der vorliegenden Arbeit entwickelt und vorgestellt werden.

2 Wirkungspfad „Maschine — Boden — Baum“

Um die Wirkungsweise der Interaktion zwischen Fahrzeug und Boden besser zu verstehen, sollen zunächst die verschiedenen Wirkungspfade dargelegt werden. Ausdrücklich ausgenommen von dieser Betrachtung sind die direkten Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Baum, bzw. Reifen oder Gleisketten und Wurzel (in Abb. 4 mit grauen Pfeilen dargestellt). Zu den beiden letztgenannten Wechselbeziehungen liegen umfangreiche Forschungsergebnisse vor, auf die hier verwiesen werden kann. Exemplarisch seien hier Arbeiten von MENG (1978), SAUTER und BUSMANN (1994), Korten (1999) und PAUSCH (2002) für den Bereich der Baumschädigungen genannt. Im Bereich der direkten Wurzelschäden hat z.B. KREMER, 2000, geforscht.

Anschließend an die Darstellung der von der Maschine ausgehenden Wirkungskette werden in Kapitel 2.6 jene Einflussfaktoren genannt, welche die Bodenfestigkeit bestimmen. Mit diesem Wissen wird dann die Interpretation der in Kapitel 2.7 zusammengetragenen, bereits existierenden Bodenschutzkonzepte möglich.

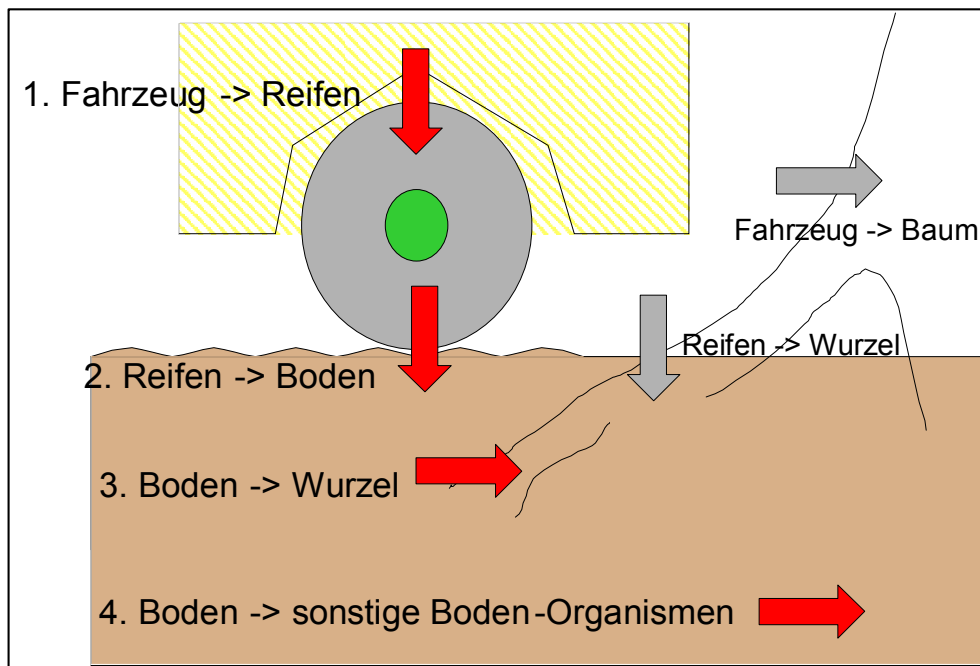


Abb. 4: Schematischer Überblick der Wirkungspfade an einem Radfahrzeug

2.1 Pfad Fahrzeug → Reifen

Die zwischen Fahrzeug und Reifen auftretenden Kräfte lassen sich in statische und dynamische Kräfte trennen. Zumindest die Zusammenhänge für die auftretenden *statischen Kräfte* stellen sich recht einfach dar. Die Gesamtmasse des Fahrzeuges wirkt als Normalkraft auf sämtliche Räder. Die Verteilung der Kraft ist dabei zwischen den Rädern eines Fahrzeuges seltenst homogen, da bereits die auf die Achsen wirkenden Lasten meist unterschiedlich sind. Neben der Größe der Gesamtmasse und der Achslastverteilung ist schließlich die Zahl der die Kraft aufnehmenden Kontaktpunkte, also die Radzahl bzw. Zahl der Gleisketten wichtig.

Zusammenfassend lässt sich für die statischen Kräfte zwischen Fahrzeug und Reifen folgende Faktorenliste erstellen:

- Fahrzeugmasse
- Verteilung der Masse (zwischen den Achsen, zwischen der rechten und linken Fahrzeughälfte)
- Zahl der Reifen bzw. Gleisketten

Dynamische Kräfte zuständig für Vortrieb und Abbremsen des Fahrzeuges wirken ebenfalls auf das System Rad-Reifen. Das vom Motor ausgehende Drehmoment wird an die Antriebsräder weitergeleitet (im Allgemeinen positive Beschleunigung). Negative Beschleunigungskräfte werden von den gebremsten Rädern übertragen. Weitere dynamische Kraftkomponenten entstehen aus Vibrationen und Schwingungen des Gefährtes oder aus Verwindungen des Fahrzeugschassis. Sie können sich ebenfalls auf die Räder übertragen. Ausgelöst werden sie z.B. von den Bewegungsabläufen der Maschine, Bodenunebenheiten oder durch Bewegungen der bearbeiteten Bäume.

2.2 Pfad Reifen bzw. Kette → Boden

Die entscheidende Kenngröße für die statisch auf den Boden übertragene Kraft ist der Bodendruck. Dies gilt für Rad- wie Kettensysteme gleichermaßen:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \quad \text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Die Höhe und Verteilung des Bodendruckes im Kontaktbereich von Reifen zu Boden ist somit von der unter 2.1 beschriebenen Kraft und zusätzlich von der Kontaktfläche abhängig. Wegen des in Bezug auf die Kontaktfläche unterschiedlichen Verhaltens von Rad- und Kettenelementen sollen diese separat dargestellt werden.

2.2.1 Reifen

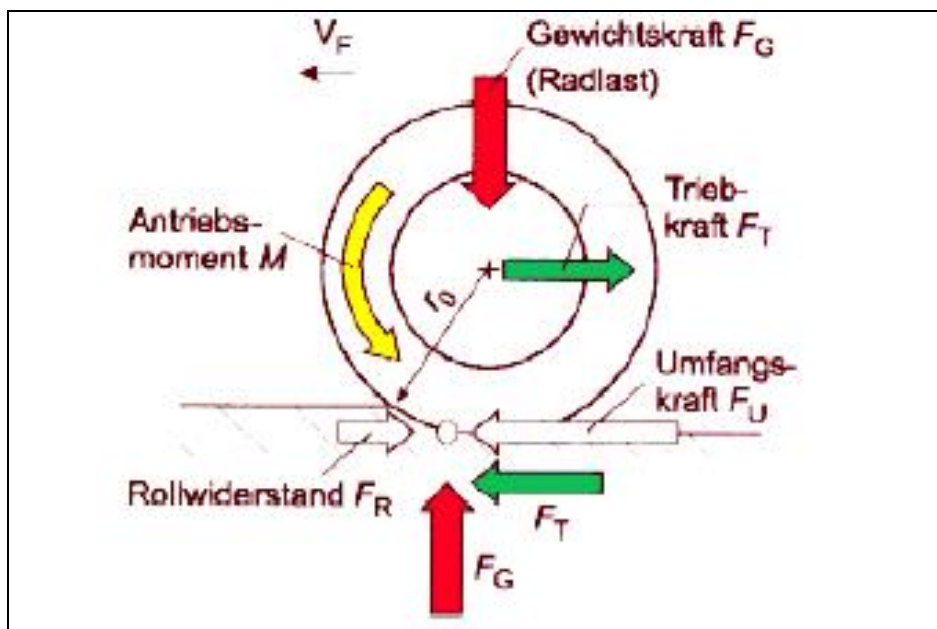


Abb. 5: Die an einem angetriebenen Rad auftretenden Kräfte
(nach STEINKAMPF, 1999)

Alle heute üblichen, luftbefüllten Gummireifen zeigen ein ausgeprägtes Verformungsverhalten. Dies führt dazu, dass sich die Größe und Form der Kontaktfläche in Abhängigkeit von den auf einen Reifen wirkenden Kräften (siehe

Abb. 5), den konstruktiven Elementen des Reifens und dem Verhalten des Untergrundes ändert.

Für harte Untergründe existieren Näherungsformeln, mit denen ein Abschätzen des mittleren Bodendruckes möglich wird. Eingangsp Parameter sind den Reifen beschreibende Größen und die einwirkende Gewichtskraft F_G .

Auch für nachgiebige Böden existieren Modelle. Hier sollten allerdings zusätzlich zu Reifenparametern Bodenkenngößen eingehen, um brauchbare Schätzwerte für die Kontaktfläche zu erhalten. Trotz etlicher Vereinfachungen (die Breite des Reifens wird oft als Breite der Kontaktfläche angenommen) einerseits und hohen Aufwandes für die Ermittlung der Kontaktlänge, zeigen Messungen, „dass die bisherigen Modelle zur Simulation der Reifenkontur die reale Verformung des Reifens unzureichend berücksichtigen“ (SCHLOTTER, KUTZBACH, 2001).

Für die Wirkung auf den Boden ist die Kenntnis des mittleren, rechnerischen Kontaktflächendruckes allein nicht hilfreich, da der an einem Punkt maximal auftretende Druck zum einen vom Mittelwert abweichen kann und zum anderen die Größe einer eventuellen Bodenveränderung vor allem von diesem auftretenden Maximalwert abhängt (siehe Abb. 6 und Abb. 7).

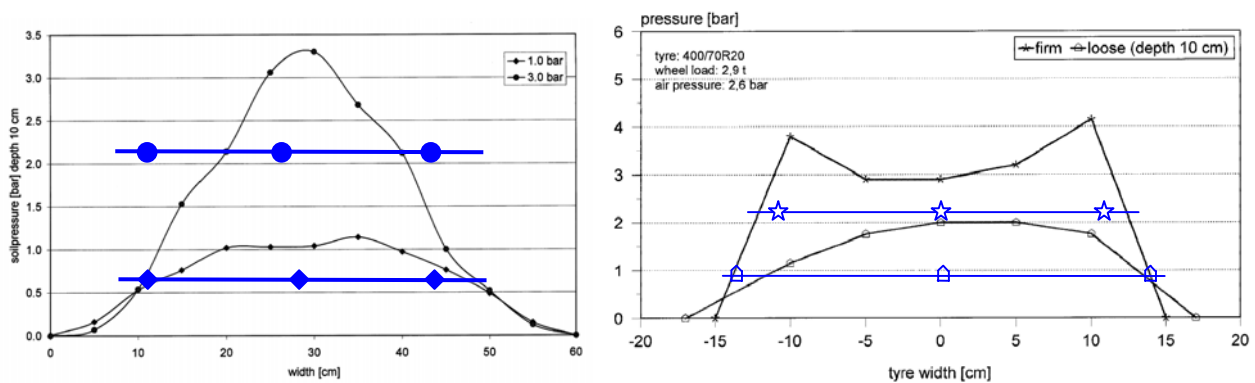


Abb. 6 (links): In einer Tiefe von 10 cm gemessener Bodendruck, gleicher Reifen aber variierender Reifenfülldruck (verändert nach WEIßBACH, 2001).

Abb. 7 (rechts): Vergleich des Kontaktflächendruckes bei festem und lockerem Untergrund (verändert nach WEIßBACH & ISENSEE, 2000).

An beiden Grafiken wird verständlich, dass die real auftretenden Bodendrücke von einem rechnerisch hergeleiteten, konstanten mittleren Bodendruck (jeweils blaue Linien, gutachtlich ermittelt) abweichen.

2.2.2 Ketten

Der starre Aufbau der Laufbänder bei Kettenfahrwerken bewirkt, dass keine Veränderung der Kontaktflächen wie bei luftbefüllten Reifen auftritt. Doch auch hier gilt, dass der rechnerische, mittlere Bodendruck von den tatsächlich auftretenden Lastspitzen deutlich abweicht (siehe Abb. 8). Bei dehnbaren Gummilaufbändern treten dabei deutlich höhere Bodendrücke auf als bei Metallbändern, die den Druck etwas gleichmäßiger über die gesamte Laufflächenlänge verteilen (MARSILI, SERVADIO, 1996).

Rechenmodelle, die von einer gleichmäßigen Lastübertragung auf den Untergrund ausgehen, entsprechen folglich weniger der Realität als jene Kalkulationsschemata, die versuchen die Lastspitzen unter den Stützrollen zu ermitteln (HAARLAA, 2000). Diese Aussage gilt für harten wie weichen Untergrund gleichermaßen.

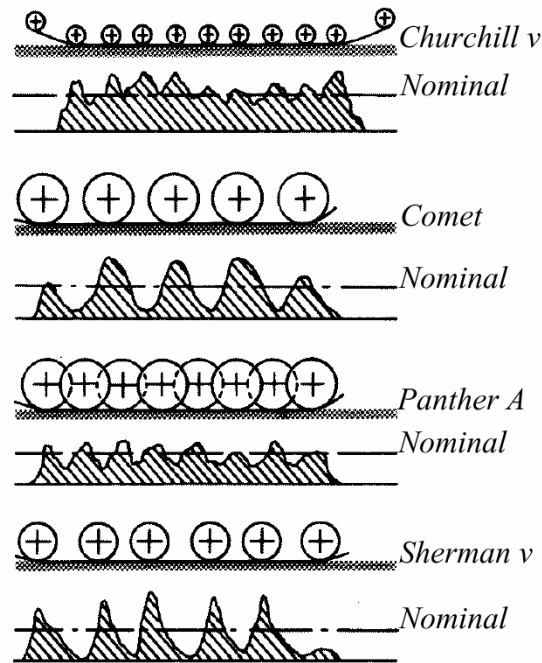


Abb. 8: Gemessene Druckverteilung in einer Bodentiefe von 23 cm bei verschiedenen Kettenfahrzeugen (WONG, 1993 zitiert nach THUVESEN, 1997)

2.2.3 Druckausbreitung im Boden

Der auf der Bodenoberfläche anliegende Druck wird durch den Kontakt der Bodenpartikel in die Tiefe des Bodenkörpers weitergeleitet, bis sich durch entgegenwirkende (Reibungs-)kräfte das Spannungsfeld allmählich abbaut. Daraus ergibt sich ein einer Zwiebel ähnlicher Aufbau von schalenförmig angeordneten Zonen vergleichbar hohen Druckes unterhalb der Druckkontaktstelle an der Bodenoberfläche, die „Druckzwiebel“ (vergleiche Abb. 9).

Über dieses Phänomen liegen sowohl Messergebnisse vor (z.B. in Sonderhoff 1988), wie auch Rechenmodelle, die zum Teil ausgehend von diversen Rad- und Bodenparametern, eine Prognose der Druckverteilung im Boden versuchen (z.B. GYSI, 2001, O’SULLIVAN ET AL., 1999, O’SULLIVAN UND SIMOTA, 1995).

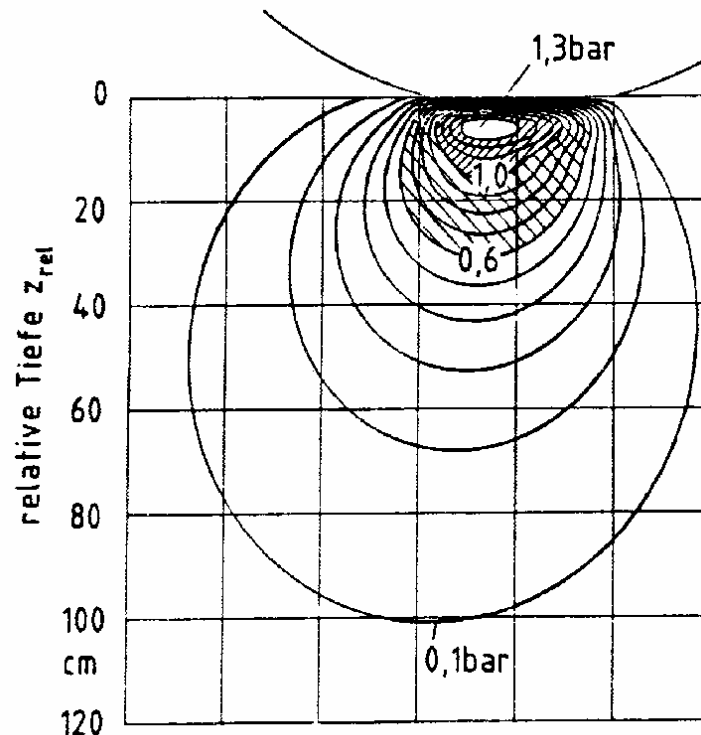


Abb. 9: Druckzwiesel unter einem Reifen, der sich von links nach rechts bewegt (BOLLING, 1987)

Die Auswirkungen der auf und in den Boden wirkenden Kräfte sind einerseits von der Größe des Druckes, andererseits von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig.

Eine Verlagerung von Bodenpartikeln, eine Zerstörung von Aggregatstrukturen, aber auch ein Herausquetschen von Bodenwasser, können auftreten. Daraus ergibt sich z.B. eine Veränderung der Dichtewerte (siehe hierzu auch HORN UND ROSTEK, 2000). In der Folge treten zumeist gravierende Veränderungen am Porenraum (Gesamtporenvolumen, Porengrößenverteilung, Porenkontinuität (siehe z.B. JÉGOU ET AL. 2002)) und an den Permeabilitätskennwerten für Gase (Gasaustauschverhalten, intrinsische Luftpermeabilität) sowie Wasser (Wasserleitfähigkeit) auf. Aber auch thermische Bodenkennwerte (thermische Leitfähigkeit, Wärmekapazität) können sich ändern (siehe hierzu auch MARSHALL und HOLMES, 1988, sowie HANKS & ASHCROFT, 1980).

2.3 Pfad Boden → Wurzel bzw. Pflanze

Bodenphysikalische Veränderungen finden in der Rhizosphäre statt und wirken sich damit über das Wurzelwachstum auf das gesamte Pflanzenwachstum aus. Die Zahl der hierzu verfügbaren Untersuchungen erscheint recht hoch. Sie betreffen sowohl landwirtschaftlich bedeutsame Kulturen als auch forstlich relevante Baumarten.

Der Pfad der Einflussnahme auf die Pflanze läuft aber auch über eine unter Umständen veränderte Bodenchemie, bzw. beeinflusste Bodenorganismen. Beide Effekte sollen hier kurz erläutert werden.

Bodenverdichtung führt in der Regel zu einer verminderten Durchwurzelung der verdichteten Bodenpartien. Dieser Sachverhalt wurde für die verschiedensten landwirtschaftlichen Kulturpflanzen bestätigt. Gute Übersichten hierzu liefern z.B. WHALLEY ET AL., 1995, O'SULLIVAN & SIMOTA, 1995 und YOUNG, 1998. Für

Forstpflanzen gilt die getroffene Aussage gleichermaßen. KREMER, 1998 liefert hier eine Übersicht.

Die verringerte Durchwurzelung verdichteter Böden geht auf ein schwächeres Längenwachstum der Wurzeln in verdichteten Böden zurück (siehe hierzu die Zusammenstellung in WHALLEY ET AL., 1995). Interessant scheinen in diesem Zusammenhang die Beobachtungen von BARLEY, 1963, ABDALLA ET AL., 1969 und RUSSELL & GOSS, 1974 (alle zitiert nach WHALLEY ET AL., 1995), dass bereits geringe Druckerhöhungen von knapp 50 kPa eine signifikante, verminderte Wurzelreaktion hervorrufen.

Eine Störung der Gaspermeabilität kann ebenfalls als Grund für eine Verringerung der Durchwurzelungen gesehen werden, da in der Regel eine Verdichtung zu eher anaeroben Bodenbedingungen und damit für die Wurzelatmung ungünstigen Verhältnissen führen kann. HILDEBRAND ET AL. (2000), GAERTIG ET AL. (1999, 2000 und 2002) beschreiben dies für einen Anstieg der CO₂-Konzentration in der Bodenluft unter Fahrspuren in einem Eichenbestand.

Die Nährstoffverfügbarkeit sowie deren Aufnahme wird ebenfalls durch Verdichtungseffekte beeinflusst (ARVIDSSON, 1999).

Die Konsequenz einer herabgesetzten Durchwurzelung, eines gestörten Bodengasaustausches und einer verminderten Nährstoffaufnahme ist in den überwiegenden Fällen eine verringerte Wachstumsleistung der betroffenen Pflanze. Zuwachsrückgänge wurden an den verschiedensten landwirtschaftlichen Kulturen wie auch Forstpflanzen beschrieben. Landwirtschaftliche Beispiele liefern JORAJURIA ET AL. (1997), ARVIDSSON (1999), HÅKANSSON & REEDER (1994), MCKYES ET AL. (1979), RAGHAVAN ET AL. (1979) und NEGI ET AL. (1981) um einige wenige zu nennen. Die negativen Effekte auf Gehölzpflanzen beschreiben unter anderen KOZLOWSKI (1999), WÄSTERLUND (1988), EPPINGER ET AL. (2002) und KREMER (1999).

Allerdings ist ebenfalls festzuhalten, dass nicht automatisch jede Bodenverdichtung mit einer Wachstumsreaktion der Bäume beantwortet wird (KREMER, 1999).

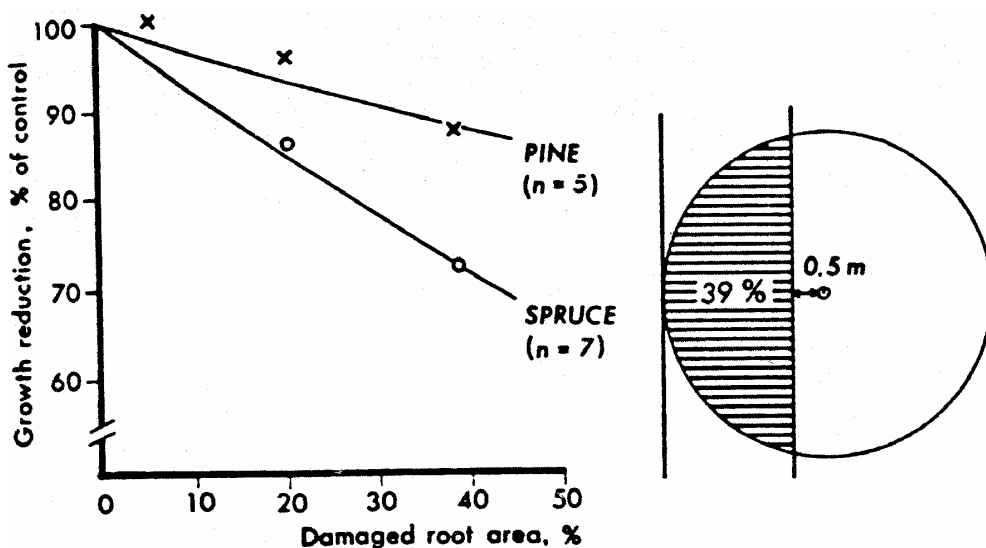


Abb. 10: Wachstumsverluste, dargestellt für Kiefer und Fichte bei ansteigendem Anteil an betroffener Durchwurzelungsfläche. Die angegebenen Werte entstammen Literaturangaben. Abb. nach WÄSTERLUND (1988)

2.4 Pfad Boden → sonst. Organismen und Bodenchemie

Der Boden ist Lebensraum für etliche Mikroorganismen, wie Viren, Bakterien, Pilze und Grünalgen; die Fauna reicht von einzelligen Protozoen, über Nematoden, bis zu kleinen Wirbeltieren (Bodenfauna siehe Abb. 11).

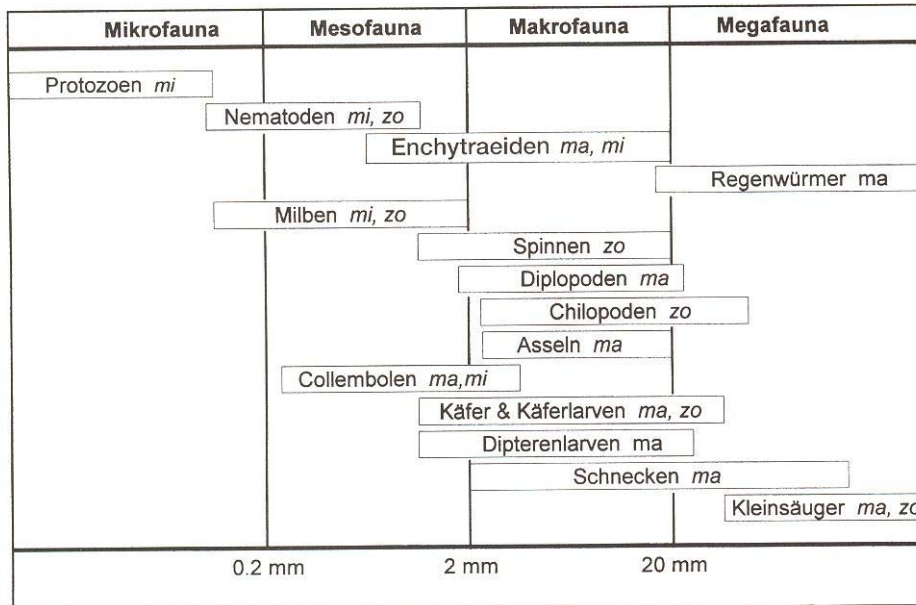


Abb. 11: Größenklassen und Größenspektren der wichtigsten Bodentiergruppen mit Angabe der vorwiegenden Nahrung (*mi*: mikrophytophag; *ma*: makrophytophag), (SCHARDT, 2003).

Aus der Tierwelt haben nach WHALLEY ET AL. (1995) Erdwürmer die größte Bedeutung für die „physikalische Bodenfruchtbarkeit“. Eine Bodenverdichtung wirkt sich erwiesenermaßen nachteilig auf die Makrofauna aus (siehe z.B. in RADFORD ET AL., 2001; MARSHALL, 2000; JORDAN ET AL. 1999). Dies ist auch in Hinsicht auf eine Regeneration ungünstig, da Erdwürmer einen wichtigen Beitrag zur Rehabilitation leisten können (LARINK & SCHRADER, 2000).

Eine Bodenverdichtung wirkt aber auch auf mikrobielle Populationen (IKEDA ET AL. 1997, JENSEN ET AL., 1996), allerdings scheint eine generelle Bewertung hier derzeit nur bedingt möglich. Grundsätzlich scheinen Mikroorganismen einen positiven Einfluss auf das Gehölzwachstum zu haben (SETÄLÄ ET AL., 2000). Zu beachten gilt, dass die Beeinflussung im mikrobiellen Bereich weniger direkt über eine Beeinflussung des Lebensraumes (über einen verringerten, adäquaten Porenraum), als viel mehr indirekt von statten geht, z.B. über die mit der Verdichtung einhergehende Veränderung des Bodengas- bzw. Wasserhaushaltes (aerobe oder anaerobe Bedingungen), oder über eine in verdichteten Böden erhöhte Wurzelexudation (IKEDA ET AL., 1997).

Bodenverdichtung führt auch zu einer Veränderung des Bodenchemismus. Dies ergibt sich im Wesentlichen aus Veränderungen des Wasser- bzw. Gashaushaltes. Nachgewiesen ist die durch Bodenverdichtung bedingte Zunahme der Denitrifikation (O’SULLIVAN & SIMOTA, 1995), was zu einer erhöhten Emission des Treibhausgases N₂O führt. Nachteilig ist außerdem eine Absenkung der Effizienz, mit der Pflanzen Stickstoff nutzen, was im Übrigen zu einem erhöhten Düngemittelbedarf führen kann (siehe hierzu auch SOANE, OUWERKERK, 1995).

2.5 Regeneration der Bodenverdichtung

Die in den vorigen Kapiteln dargelegten Effekte zeigen zunächst auf, dass und in welche Richtung befahrungsbedingte Veränderungen gehen können. Um die Bedeutung einschätzen zu können, ist aber auch die Zeit zu betrachten, die bis zu einer möglichen Regeneration der Bodenverdichtung verstreicht. Auch hierzu liegen etliche Untersuchungen vor. Sie belegen übereinstimmend, dass die aufgezeigten Veränderungen, sofern überhaupt, dann nur in sehr langen Zeiten sich zurückzubilden. KREMER (1999) weist darauf hin, dass der Begriff der „Regeneration“ zudem in der Literatur unterschiedlich genutzt wird. Manche Autoren sprechen demnach bereits von Regeneration, wenn einzelne Kenngrößen, wie z.B. der Luftporenraum im oberflächennahen Bereich wiederhergestellt ist, während er von einer Regeneration erst spricht, wenn sich die „hochsensiblen“ Parameter (Leitfähigkeitswerte für Luft und Wasser) aus dem „kritischen“ Bereich hin zum „beeinträchtigten“ Bereich bewegen“.

CROKE ET AL. (2001) konnten fünf Jahren nach einer befahrungsbedingten Bodenverdichtung keine Regeneration feststellen. BRAIS (2001) findet sechs Jahre nach der Skidder-Befahrung einer Rückegasse noch immer deutlich erhöhte Dichtewerte. Auf Grund seiner Untersuchungen von bis zu 35 Jahre alten Rückegassen stellt KREMER für den mitteleuropäischen Raum fest, dass eine Regeneration „kein verlässlicher Faktor für die Wiederherstellung der Struktur und der funktionalen Eigenschaften der Waldböden“ ist. Selbst Zeiträume von deutlich über 100 Jahren reichten nicht aus, um zwischen 1864 und 1871 entstandene Siedler-Trecks in Nordamerika in wichtigen bodenphysikalischen Kennwerten (Bodendichte, Eindringwiderstand, Luftpermeabilität, Infiltrationsrate für Wasser, ...) an die ungestörten Verhältnisse anzugleichen (SHARRATT ET AL., 1998). HORN UND ROSTEK (2000) sprechen gar davon, dass „Unterboden - Verdichtung als irreversibler Prozess anzusehen ist, der weder durch Frost und Auftauen, noch durch Befeuchten und Austrocknen oder durch biologische Prozesse an die ursprünglichen Standortsbedingungen angeglichen werden kann“.¹

Selbst wenn man der letztgenannten Meinung nicht folgt, so wird für den Forstmann klar, dass der Zeitraum, der üblicherweise zwischen den Maschineneinsätzen verstreicht, kaum ausreicht, um mit nennenswerter Regeneration rechnen zu können.

Schließlich soll nicht unerwähnt bleiben, dass im Ökosystem „Wald“ auch natürliche Bodenverdichtungen auftreten können. Ursache hierfür können zum Beispiel geworfene Bäume, waldlebende Tiere, oder im Gebirge Schnee-Lawinen sein. Entscheidend ist dabei, dass es sich im Gegensatz zu der hier diskutierten befahrungsbedingten Bodenverdichtung, um einen zeitlich wie räumlich gesehen völlig anderen Charakter der Bodenverdichtung handelt.

2.6 Übersicht der Einflussfaktoren

Die entscheidenden Größen, die nun die natürliche Tragfähigkeit eines Bodens bis zu einem vorgegebenen Auflastwert maßgeblich beeinflussen sind

- die Bodenart, einschließlich Skelettanteil
- der Humusgehalt

¹ Übersetzung aus dem Englischen (HORN UND ROSTEK (2000), S. 53): „Subsoil compaction has to be considered as an irreversible process which neither by freezing and thawing, wetting and drying nor by biological processes can be changed to the original site conditions.“

- der Bodenwassergehalt und
- die Hangneigung.

Nach DIETZ ET AL. (1984) ist die Bodenfestigkeit „der Widerstand, den die Bodenteilchen einer äußeren Lasteinwirkung entgegensetzen.“ Sie stützt sich auf zwei Komponenten: die Haft- und die Reibungsfestigkeit, welche zusammen die Scherfestigkeit ergeben. „Die Ausprägung der Scherparameter Kohäsion (Haftfestigkeit) und Reibungswinkel (bestimmt die Reibungsfestigkeit) wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst: die Kohäsion vor allem vom *Bodenwassergehalt*, bzw. von der Konsistenz des Bodens, von der *Korngröße* und von den mineralogischen Eigenschaften, die Reibungsfestigkeit in erster Linie von der Lagerungsdichte, von der Kornform und ebenfalls vom *Wassergehalt*.“ (DIETZ ET AL., 1984).

Der Einfluss des Humusgehaltes lässt sich an Abb. 12 ablesen. Hier ist zu entnehmen, dass bei humusreichem Boden es bei gleichen Auflasten zu größeren Porenziffern² und zu einer intensiveren Abnahme der Porenziffer mit größer werdender Auflast kommt.

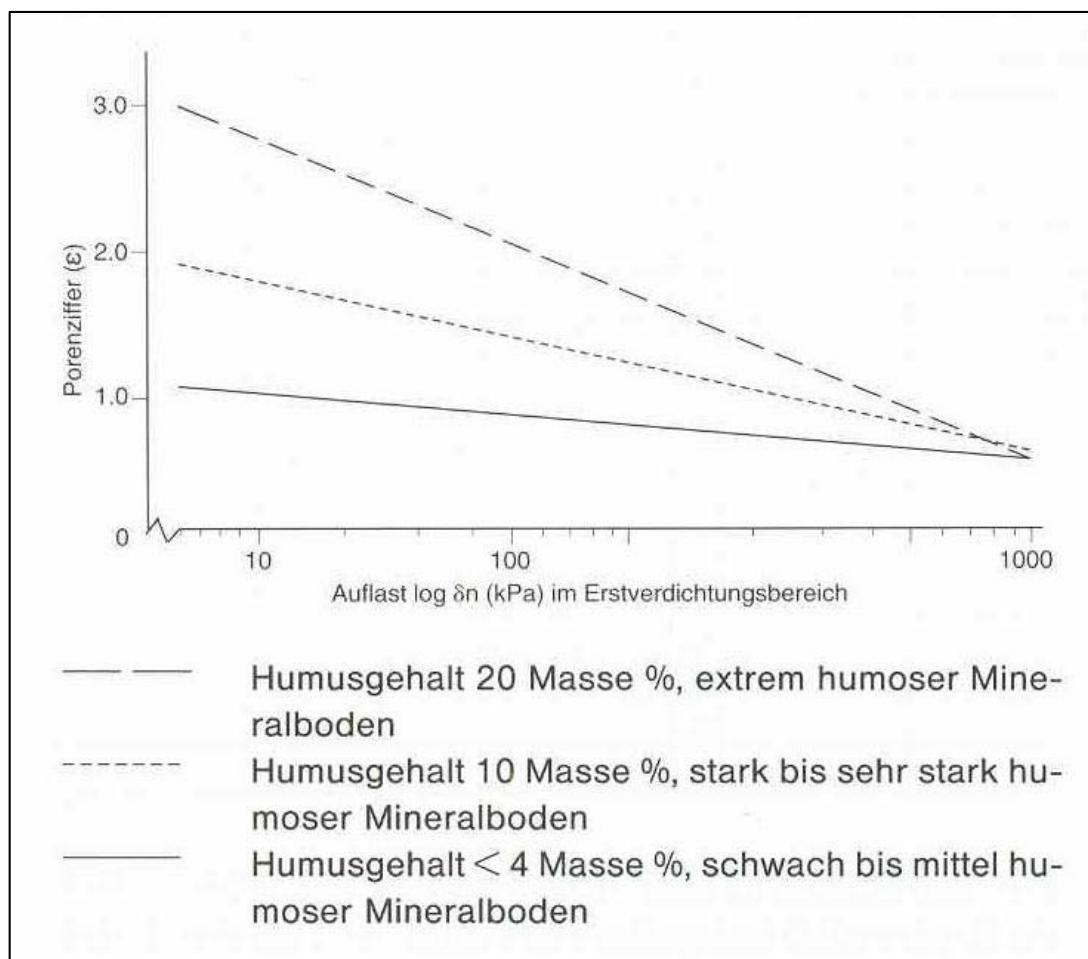


Abb. 12: Auflastabhängige Änderung der Porenziffer im Erstverdichtungsbereich für Tone und tonige Lehme (Tongehalt > 35%) bei verschiedenen Gehalten an organischer Substanz (DVWK, 1997)

² Porenziffer: Anteil der Poren auf den Volumenanteil der Festsubstanz

Die Bedeutung der *Hangneigung* ergibt sich aus zwei Gründen: Die neigungsbedingte Veränderung der Achslastverteilung der Fahrzeuge, sowie der höhere (Rad)-Schlupf bewirken einen höheren Kräfteintrag auf den Untergrund. Außerdem setzen die Normalkräfte nicht im idealen rechten Winkel auf den Boden auf, was talseitig im ungünstigsten Fall zu Bodenabscherungen führen kann.

2.7 Bisherige Bodenschutzkonzepte und deren Würdigung

Zusammenfassend lässt sich aus dem in diesem Kapitel bislang Dargelegten festhalten, dass eine Befahrung eine große Gefahr für Boden und Bestand darstellen, weil schädigende Effekte entstehen können (siehe Kap. 2.3 und 2.4). Verstärkend wirkt der Umstand, dass eine Regeneration des Bodens von Verdichtung nicht in absehbaren Zeiträumen stattfindet (Kap. 2.5); somit werden verschiedene Verdichtungs Vorgänge quasi aufsummiert. Hält man sich zudem die in Kapitel 1.1 getroffenen Aussagen vor Augen,

- dass wir derzeit eine massive Zunahme von Fahrbewegungen (Ansteigen der Gerätezahl, Ausweitung des Arbeitsspektrums),
- bei tendenziell ansteigenden Radlasten (Zunahme der Gerätegewichte),
- auf sich immer mehr ausweitenden Flächen (Ausweitung des Arbeitsspektrums und der Einsatzgrenzen),
- vermehrt in einer ungünstigen Jahreszeit (keine Beschränkung auf den reinen Wintereinschlag, vermehrte Just-in-time Lieferung unabhängig von Witterungsbedingungen)

beobachten, so wird verständlich, dass Konzepte zum Bodenschutz ihre Berechtigung haben. Ebenso wird hiermit deutlich, dass die Sorge um den Schutz des Bodens von Seiten des Gesetzgebers, der Umweltverbände und auch der Forstleute selbst (z.B. STRATMANN, 2001³) durchaus berechtigt sind.

Deshalb ist nachvollziehbar, dass von verschiedenen Stellen Konzepte vorgeschlagen wurden, welche das Ziel haben, die Belastungssituation betroffener Böden zu entschärfen. Diese sind im Folgenden kurz skizziert, anschließend in tabellarischer Form zusammengefasst (Tabelle 5) und dort auch gutachtlich bewertet. Dabei wurden bewusst auch jene Vorschläge mit aufgenommen, die primär für den nicht-forstlichen Einsatz gedacht sind. Es sei darauf hingewiesen, dass nicht der Anspruch erhoben wird, alle verfügbaren Richtlinien vorzustellen.

2.7.1 Bodenschutzrichtlinie des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern (1997)

Ziel dieser Schweizer Richtlinie ist es, „den Bau von Rohrleitungen auf bodenschonende Weise zu ermöglichen“ (BEW, 1997). Die erste Fassung wurde im Jahr 1993 erlassen (BEW, 1993). Die hier vorzustellende, aktuelle Vorlage trat im Jahr 1997 in Kraft.

Einsatzbezogen wird für jede Baumaschine und dem von ihr ausgehenden Bodendruck in Abhängigkeit von der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens im betroffenen Bauabschnitt über ihre Einsatzmöglichkeit entschieden. In die Ermittlung der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens gehen folgende Parameter ein:

³ STRATMANN sagt u.a.: „Die Beachtung des Bodenschutzes ist weiter zu verstärken. Die Begrenzung der Bodenverdichtung und des Nährstoffentzuges somit die Vermeidung von Erosion haben höchste Priorität.“

- Skelettanteil
- Ton- und Schluffanteil
- Vorbelastung des Bodens
- Humusgehalt
- Lagerungsdichte und
- Saugspannung.

Als entscheidende Kenngröße werden Wasser- und Tongehalt herausgehoben. Das Resultat ist eine Zuordnung der betroffenen Böden zu einer von sechs möglichen **Empfindlichkeitsklassen**.

Für die Belastung durch die Maschinen werden deren Gesamtgewicht und die Bodenpressung als Steuergrößen herangezogen. Darüber hinaus sind die Witterungsverhältnisse, die Evapotranspiration, die lokale Bodenbeschaffenheit und das Bauverfahren zu berücksichtigen. Die Korrektheit des Modells wurde durch wissenschaftliche Begleituntersuchungen im Wesentlichen bestätigt (siehe hierzu KULLI ET AL., 1997, bzw. BERLI ET AL. 1998, 1999a, 1999b).

Vorteile	Nachteile
Basiert auf Richtwerten	Aufwändige und z.T. permanente Messungen: - Der Saugspannung mittels Tensiometern an allen Bauabschnitten - Der Vorbelastung mittels Drucksetzungskurve (Ödometerversuch)
Wissenschaftlich abgesichert	
Flexibel gegenüber einsetzbaren Maschinen	
	Nur bedingte Eignung für bereifte Fahrzeuge. (Der Schwerpunkt liegt konzeptbedingt bei Kettenfahrzeugen.)
	Maschinen mit gleicher Bodenpressung, aber unterschiedlicher Gesamtmasse werden verschieden bewertet.
	Nicht für Waldböden konzipiert

2.7.2 Beurteilungshinweise zur Bodenstruktur in Waldböden (GAERTIG ET AL., 2000)

GAERTIG ET AL. (2000) stellen einen Schlüssel zur Beurteilung der forstlichen Befahrungssituation anhand von Feldanspracheparametern vor. Hier werden anhand der Gefügeform, der Ausprägungsform von Rostflecken und der Größe von Bleichzonen bestehende Verformungsschäden beurteilt. Insgesamt werden sechs Schadensklassen (von keinem bis zu extremem Schaden) ausgewiesen. Die Feldansprachemethode eignet sich für Lössstandorte oder lehmige Standorte.

Vorteile	Nachteile
Feldmethode, ohne apparativen Aufwand	Keine Schadprävention möglich
Wissenschaftlich abgesichert	
Für Waldstandorte geeignet	
Bezieht ökologische Parameter ein	

2.7.3 Grenzwerte für sichere Achslasten bei der Zuckerrohrernte (KANALI ET AL., 1996)

Um der Gefahr der Bodenschädigung bei der Zuckerrohrernte entgegen zu wirken, ermittelten KANALI ET AL. (1996) in einer Versuchsserie mit variierender Achslast, variierendem Reifenfülldruck und verschiedenen Bodenfeuchtwerten Achslast-Grenzwerte für die Zuckerrohrregion Mumias in Kenia.

Vorteile	Nachteile
Basiert auf Richtwerten	Als Beurteilungswert zur Grenzwertermittlung geht nur die Lagerungsdichte ein. Weitere, ökologisch bedeutsame Bodenkennwerte werden nicht herangezogen.
Wissenschaftlich abgesichert	
Vom Ansatz flexibel gegenüber einsetzbaren Maschinen	
	Übertragbarkeit auf andere Standorte (fast) unmöglich, da keine Untersuchung für variierende Bodenparameter vorliegen.
	Basiert auf mittleren Kontaktflächendrücken. Damit ist die Übertragbarkeit auf andere Reifen-Geräte-Kombinationen nur bedingt möglich.
	Etwas umständliche Handhabung, da mittlere Bodendruckwerte als Grenzwert für das einzusetzende Fahrzeug erst abgeleitet werden müssen.
	Nicht für Waldböden konzipiert

2.7.4 TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung (DISERENS und SPIESS, 2004)

Basierend auf etlichen Feldversuchen wurden von DISERENS und SPIESS die mathematischen Zusammenhänge für die Ermittlung der Kontaktflächen von Reifen- und Raupenfahrwerken für die Berechnung der Druckausbreitung im Boden abgeleitet. Sie wurden in ein Modell integriert, das als Excel-Anwendung „TASC“

verbreitet wird. Es ist für den Einsatz von Großmaschinen im landwirtschaftlichen Ackerbau gedacht. Derzeit werden von der Anwendung bindige Bodentypen berücksichtigt. DISERENS und SPIESS verfolgen damit als „Hauptziel ... präventiven Schutz der Ackerböden gegen schwere reversible und irreversible Schadverdichtung“ zu erreichen.

Vorteile	Nachteile
<p>Basiert auf wissenschaftlichen Untersuchungen</p> <p>Fahrzeug- sowie reifenindividuell</p>	<p>Bei Reifen mit einem Durchmesser von weniger als 130 cm werden Reifenfülldruck und Radlast nicht zur Ermittlung der Kontaktfläche herangezogen.</p>
<p>Die Ausgangssituation des Bodens wird anhand der Oberbodenfestigkeit berücksichtigt.</p>	<p>Derzeit werden nur bindige Ackerböden (sandiger Lehm bis lehmiger Ton) berücksichtigt.</p>
<p>Nutzerfreundlicher Ansatz</p>	<p>Die Ermittlung der Oberbodenfestigkeit erfolgt in vom Nutzer anzuschätzenden Stufen (fest, halbfest, weich), d.h. das System basiert in diesem Punkt nicht auf Messwerten.</p> <p>Zur Herleitung des Kontaktdruckes werden keine Zonen unterschiedlichen Druckes innerhalb der Kontaktfläche genutzt, nur ein gemittelter Kontaktflächendruck geht in die Berechnung ein</p> <p>Als Zielgröße werden nur die Lagerungsdichte und keine weiteren bodenbiologisch relevanten Parameter verwendet.</p> <p>Für den landwirtschaftlichen Einsatz konzipiert</p>

2.7.5 Entscheidungsunterstützungssystem zur Beurteilung von Verdichtung in landwirtschaftlichen Böden (CANILLAS UND SALOKHE, 2002)

Bei Laboruntersuchungen an einer Bodenrinne beobachten CANILLAS UND SALOKHE (2002) die Veränderung der Lagerungsdichte, bedingt durch unterschiedliche Bodenkennwerte (Bodenfeuchte, Cone-Index, Lagerungsdichte), Reifenparameter (Breite, Durchmesser, Fülldruck) und die Stellgrößen Überfahrzahl, Radlast und Fahrgeschwindigkeit. Die als signifikant herausgefundenen Parameter Achslast, Zahl an Überfahrten, Reifenfülldruck, Bodenfeuchte, Breiten-Durchmesser Verhältnis der Reifen sowie Ausgangsbodendichte und Anfangs-Cone-Index werden genutzt, um die Veränderung der Bodendichte vorherzusagen. Basierend auf Literaturangaben werden den sich ergebenden Dichtewerten Faktoren zur Vorhersage des Ertragsrückganges zugeordnet. Alle Zusammenhänge sind in einem Computerprogramm („Entscheidungsunterstützungssystem“) so abgelegt, dass ein Nutzer nach Eingabe der unabhängigen Variablen sowohl die veränderte Lagerungsdichte als auch den Einfluss auf den Ertrag errechnet bekommt.

Vorteile	Nachteile
<p>Basiert auf wissenschaftlichen Untersuchungen</p> <p>Nutzerfreundlicher Ansatz</p>	<p>Als Beurteilungswert geht nur die Lagerungsdichte ein. Weitere, ökologisch bedeutsame Bodenkennwerte werden nicht untersucht.</p> <p>Einige Folgerungen erscheinen fragwürdig (z.B. Zuordnung von Ertragsminderung zu Bodendichtewerten).</p> <p>Orientiert sich rein an landwirtschaftlichen Einsatzfällen, somit für den forstlichen Einsatz nicht übertragbar.</p>

2.7.6 Vereinfachte Abschätzung der Bodendichte, (O’SULLIVAN ET AL., 1999)

Es existieren zahlreiche Modelle zur Vorhersage der Bodendichte (O’SULLIVAN ET AL., 1995). Dazu gehören z.B. die Modelle von KIRBY, 1989, CHI ET AL. 1993, [beide zitiert nach O’SULLIVAN ET AL., 1995] und GYSI, 2001. Hier soll stellvertretend das Schema von O’SULLIVAN ET AL. (1999) vorgestellt werden. Es errechnet die Trockenlagerungsdichte unter einer Radspur. Dazu bezieht es die folgenden Komponenten in das Modell ein:

1. ein Modell für die vom Fahrzeug ausgehenden Kräfte,
2. eine Methode, welche die Kraftverteilung im Boden ermittelt und
3. einen Ansatz, welcher die Kraftwirkungen auf die Veränderung des Bodenvolumens herleitet.

Das erste Modul ermittelt bzw. schätzt die Kontaktfläche eines Reifens in Abhängigkeit von Reifenbreite und Durchmesser, Radlast, Bauart (Diagonal- oder Radialbauweise) und Fülldruck für „harten“ sowie „weichen“ Untergrund.

Aus der Kontaktflächengröße, der darauf wirkenden Kraft und der Boden Härte werden die im Boden wirkenden Spannungen für verschiedene Tiefenstufen abgeleitet.

Zuletzt werden aus den errechneten Spannungen unter Berücksichtigung der Bodenfeuchte Prognosen für die Bodendichte errechnet. Die vorgestellte Berechnung ist für die Bodenarten sandiger Lehm (sL) und toniger Lehm (tL) parametrisiert.

Vorteile	Nachteile
<p>Einfache Bedienung (Tabellenkalkulationsprogramm)</p> <p>Berücksichtigt eine maschinenindividuelle Konfiguration</p>	<p>Als Beurteilungswert wird die Lagerungsdichte errechnet.</p> <p>Einsatzempfehlungen sind mit der prognostizierten Dichte nicht verbunden.</p> <p>Begrenzung auf derzeit zwei Bodenarten (sL, tL)</p>

2.7.7 Schadbeurteilungskonzept nach STOKES (1994)

Das von STOKES 1994 vorgeschlagene Schadensbeurteilungskonzept trennt anhand der Spurausprägungen die Bodenschäden in die Kategorien: „immer schädlich“ und „manchmal schädlich“. Neben den oberflächlichen Abmessungen der Fahrspuren nach Länge und Breite, werden dabei auch deren Tiefe zur Beurteilung herangezogen.

Vorteile	Nachteile
Einfache, sofortige Beurteilung	Keine Schadprävention möglich
Akzeptanz durch Praktiker	Kein Bezug zu Boden- und Fahrzeugparametern
Speziell für den Forsteinsatz konzipiert	

2.7.8 Gefährdungsklassifikation nach LÖFFLER (1982) / MÜLLER (1987)

Ausgehend von der „forsttechnischen Geländeklassifikation“ (LÖFFLER, 1979) entwickelte LÖFFLER bereits 1982 erste Überlegungen zur Verdichtungsempfindlichkeit von Waldböden. Er schlägt zusammen mit MÜLLER (1987) eine Einteilung der Böden in fünf Empfindlichkeitsklassen vor. Die verwendeten Klassifizierungsmerkmale umfassen folgende Parameter:

- Bodengruppe
- Trockendichte
- Infiltrationsrate
- Aktueller Bodenwassergehalt
- Luftporenvolumen
- Bodenfestigkeit als CI-Wert

Bei der Einteilung in die Klassen werden folgende Gefährdungsaspekte berücksichtigt:

Biologische Befahrbarkeit:

- Oberbodenversiegelung
- Unterschreiten eines ausreichenden, wirksamen Luftporenvolumens
- Wurzelzerstörungen

Technische Befahrbarkeit:

- Gefahr der Fahrzeugimmobilität

Für jede Empfindlichkeitsklasse werden Bewirtschaftungsempfehlungen ausgegeben (z.B. Empfindlichkeitsklasse 3: Ganzjährig niedrige Achslasten [Fahrzeugtyp, Beladung] und Benutzung von Breitreifen. Keine flächige Befahrung bei höherer Bodenfeuchte [Tau- und Nässeperioden]).

Es wird vorgeschlagen, bestehende Standortskarten zu verwenden, die um einen Zuordnungsschlüssel erweitert werden, wodurch jede Standortseinheit einer Empfindlichkeitsklasse zugeordnet wird.

Vorteile	Nachteile
Berücksichtigung physiologischer Parameter	Risikoermittlung letztlich nur gutachtlich
Basiert auf wissenschaftlichen Grundlagen	Handlungsempfehlungen unterliegen weiten Interpretationsspielräumen („breite Reifen“, „niedrige Achslasten“)
Versucht bestehende Informationsquellen zu nutzen (Standortskarte)	Es besteht kein eindeutiger Bezug zum aktuellen Bodenwassergehalt.
Pragmatische Empfehlungen	Der Bodendruck, und damit die Variabilität der Maschinenkonfigurationen bleiben unberücksichtigt.
Forsttauglich	

2.7.9 Risikoabschätzung für Böden auf Bodenveränderungen durch die Holzernte (McNABB, 1993)

McNABB verbindet in seiner Risikoabschätzung die Elemente Bodenfeuchte, Bodentextur und Geländemorphologie. Je Beurteilungsgröße werden drei mögliche Klassen zur Auswahl angeboten und mit Zahlen von eins bis drei kodiert.

Beurteilungsgröße	Faktor		
	1	2	3
Boden	grob	fein	organisch
Bodenfeuchte	trocken	feucht	nass
Morphologie	konvex	konkav	> 30 % Hangneigung

Das Gesamtmaß des Risikos ergibt sich aus dem Produkt der drei Einwertungen.

Risiko extremer Gleisbildung	Ergebnisbereich
Gering	1 – 4
Mittel	5 – 11
Hoch	12 – 27

Folgende Beurteilung ergibt sich:

Vorteile	Nachteile
Einfache, sofortige Beurteilung	Beurteilungsgrößen haben interpretierbare Grenzen (z.B. Bodenzustand „feucht“)
Für den Forsteinsatz konzipiert	Nur sehr grobe Einschätzung des Risikos
Akzeptanz	Kein Bezug zum Bodendruck und damit zu den eingesetzten Maschinen
	Schadabwundungspotential gering

2.7.10 Konzept der Landesforstverwaltung Niedersachsen (NLF, 1992)

In einem wertenden Vergleich der Bodenschutzkonzepte sämtlicher bundesdeutscher Forstverwaltungen von MATTHIES (2000) schneidet die Regelung Niedersachsens zum Forstmaschineneinsatz am besten ab. Deshalb soll diese niedersächsische Vorschrift hier stellvertretend erwähnt werden, dies in der Kenntnis, damit die günstigste Richtlinie dargestellt zu haben.

Das Merkblatt weist vier Gefährdungsstufen für das Risiko von Bodenschäden auf (NLF, 1992). Als Klassifizierungselemente werden Wasserhaushalt, Bodenart und Lagerungsverhältnisse (Substrat) herangezogen. In jeder Gefährdungsstufe werden Empfehlungen für den Maschineneinsatz bei der Holzernte, der Waldkalkung, der Bodenvorbereitung und der Schlagabraumbeseitigung gegeben (z.B.: „Gefährdungsstufe II [mäßig] für die Holzernte: Bei ungünstiger Witterung und Nässe Fahrbewegungen ausschließlich auf Rückelinien. Verwendung von Breitreifen. Bei maschineller Holzernte in Nässeperioden Reisigablage auf Rückegasse.“). Auch der Maschineneinsatz am Hang wird berücksichtigt.

Vorteile	Nachteile
Einfache, sofortige Beurteilung durch Forstfachpersonal möglich	Keine Berücksichtigung der Bodendrucke und somit keine Berücksichtigung der Maschine und deren Konfiguration
Für den Forsteinsatz konzipiert	Die Beurteilungsgrößen bieten einen weiten Interpretationsspielraum (z.B. „ungünstige Witterung“, „Breitreifen“).
	Plastische Kennwerte werden nur indirekt berücksichtigt.

2.7.11 Managementstrategie für Holzerntemaßnahmen in süd-afrikanischen Plantagenwäldern (SMITH, 1999)

In seinem Handbuch stellt SMITH (1999) klar strukturiert Auswirkungen von Holzerntemaßnahmen auf den Boden dar. Um in den südafrikanischen Plantagenwäldern negative Auswirkungen zu vermeiden, werden auch Beurteilungshinweise gegeben. Hierzu werden verfahrensbezogene, gutachtliche Bewertungen von Holzerntemaschinen für die von ihnen ausgehende Bodenverdichtung, Bodenstörung und betroffene Fläche vorgenommen. Hierbei wird eine siebenstufige Ordinalskala genutzt. Alle drei Größen werden dann zu einem „Impaktwert“ aggregiert.

	Bodenverdichtung	Bodenstörung	Betroffene Fläche (%)	Impakt-Beurteilung
Forwarder	Sehr hoch (7)	Niedrig (2)	25	14

Berechnung nach folgendem Schema:

$$\begin{aligned} &\text{Gewichtungsfaktoren für Klasse} && 7: 1.0 \\ & && 2: 0.1 \\ &(1.0 * 0.5 + 0.1 * 0.5) * 25 = 13.75 && \sim 14 \end{aligned}$$

Die Impaktbeurteilung lässt sich dann mit einer sechsstufigen Bodenrisikobewertung verschneiden, wo Einsatzempfehlungen hinterlegt sind. Es scheint, dass für alle wichtigen Forstböden Südafrikas diese Bodenklassifizierung vorliegt.

Verfahren			Impaktwert	Bodenrisikostufen					
Fällen	Laden	Rücken		Sommer					
Manuell	Kran	Forwarder	13	1	2	3	4	5	6

Handlungsempfehlungen:

Blau: Hohes Risiko, Durchführung der Maßnahme nicht empfohlen – Verlegen der Maßnahme auf anderen Standort oder in andere Jahreszeit

Gelb: Mittleres Risiko, Vorsicht geboten – falls möglich Maßnahme auf anderen Standort verlegen oder in andere Jahreszeit verschieben

Quelle: SMITH, 1999

Durch die aufgezeigte Verschneidung sollen dem Forstbetrieb Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Vorteile	Nachteile
<p>Beurteilung durch Forstfachpersonal möglich</p> <p>Für den Forsteinsatz konzipiert</p> <p>Gewichtung von Bodenverdichtung, Bodenstörung und betroffener Fläche kann variiert werden, ohne das Gesamtkonzept ändern zu müssen</p>	<p>Die Verdichtbarkeit des Bodens, und keine weiteren ökologischen Parameter werden zur Bodenbeurteilung herangezogen.</p> <p>Der Einfluss der Bodenfeuchte wird nur in zwei Stufen registriert.</p> <p>Die Einwertung der Maschinen und Verfahren erfolgt nur gutachtlich in sieben Stufen.</p> <p>Verquickung von Maschinen, Verfahren und betroffener Fläche</p> <p>Der Einfluss variierender Bereifung und veränderter Reifenfülldrücke spiegelt sich nicht in der Risikoeinwertung nieder.</p>

2.7.12 Zusammenfassung der genannten Konzepte

Zusammenfassend soll zunächst eine Übersicht der bodenphysikalischen Beurteilungsparameter gegeben werden, die in die verschiedenen Konzepte Eingang gefunden haben (Tabelle 3). Zusätzlich sind in Tabelle 4 alle auftretenden Zielgrößen der Bewertung, die Richtgrößen, zusammengetragen. Ergänzend hierzu werden als drittes die aufgezählten Konzepte anhand einiger wichtiger, beurteilender Größen wertend gruppiert (Tabelle 5), was trotz der sehr unterschiedlichen Ausrichtungen gut möglich ist.

Stellt man alle, je in einem Konzept erwähnten Parameter zusammen, so ergibt sich eine umfangreiche Liste, die sich in Boden-, Fahrzeug- und Reifenparameter aufteilen lässt. Dabei fällt auf, dass die Parametergruppen „Textur“ (Skelettanteil und Bodenart), „Wasserhaushalt“ (Saugspannung, Bodenfeuchte und Wassergehalt) und „Lagerungsverhältnisse“ (Lagerungsdichte, Cone-Index und Vorbelastung) mehrfach als Beurteilungsgrößen Eingang finden. Demgegenüber stehen etliche Einzelnennungen wie Humusgehalt, Luftporenvolumen, Fahrspur, Geländemorphologie usw.

Tabelle 3: Überblick der gefundenen Parameter

Boden- und Geländeparameter	Fahrzeug- und Einsatzparameter
Skelettanteil (2.7.1)	Gesamtgewicht (2.7.1)
Bodenart (2.7.1, 2.7.8, 2.7.9, 2.7.10)	Achslast (2.7.5)
Gefügeform (2.7.2)	Radlast (2.7.6, 2.7.4)
	Maschine (2.7.11)
Humusgehalt (2.7.1)	
	Bodenpressung (2.7.1)
Saugspannung (2.7.1)	
Bodenfeuchte (2.7.5, 2.7.6, 2.7.8, 2.7.9)	Fahrspur (2.7.7)
Wasserhaushalt (2.7.10)	Zahl der Überfahrten (2.7.5)
	Verfahren (2.7.11)
Lagerungsdichte (2.7.1, 2.7.8)	Größe der betroffenen Fläche (2.7.11)
Lagerungsverhältnisse (2.7.10)	
Cone-Index (2.7.5, 2.7.8)	
Vorbelastung (2.7.1)	
Oberbodenfestigkeit (2.7.4)	
Bodenverdichtungsempfindlichkeit (2.7.11)	
Redoximorphie-Erscheinungen (2.7.2)	
Luftporenvolumen (2.7.8)	
Infiltrationsrate (2.7.8)	
Geländemorphologie (2.7.9)	

Reifenparameter
Reifenfülldruck (2.7.4, 2.7.5, 2.7.6)
Dimensionsangaben (z.B. Breite, Durchmesser, ...) (2.7.4, 2.7.5, 2.7.6)
Bauart (2.7.4, 2.7.6)

Weniger häufig fand die Gruppe der Fahrzeug- bzw. Einsatzparameter Eingang in die Beurteilungssysteme. Gleiches gilt für die Gruppe der Reifenparameter.

Zur Beurteilung der Befahrungssituation werden verschiedene Größen herangezogen (siehe Tabelle 4). Dabei überrascht die Unterschiedlichkeit der verwendeten Zielgrößen. Nicht übersehen werden darf allerdings, dass etliche Konzepte sich mit einer Bewertung in einer dimensionslosen Skala, welche das Gefährdungspotential widerspiegeln, zufrieden geben. Dazu sind die Vorschläge von Gaertig et al. (2.7.2), Stokes (2.7.7), Löffler (2.7.8), McNabb (2.7.9), der niedersächsischen Landesforstverwaltung (2.7.10) und jener von Smith (2.7.11) zu zählen.

Tabelle 4: Übersicht der Zielgrößen für die Beurteilung der Befahrungssituation

Kapitel	Beurteilungsgrößen
2.7.1	Saugspannung
2.7.2	Sechs Schadklassen
2.7.3	Achslastgrenzwerte bei verschiedenen Bodenfeuchtwerten
2.7.4	Die Aussage, ob eine Bodengefährdung vorliegt oder nicht, orientiert sich am Überschreiten der Druckspannung auf Höhe der Auflockerungstiefe. Ab einer effektiven Lagerungsdichte von über $1,7 \text{ g/cm}^3$ wird eine Schadverdichtung des Bodens unterstellt.
2.7.5	Veränderte Bodendichte nach einer möglichen Befahrung
2.7.6	Trockenlagerungsdichte

2.7.7	Kategorisierung der Bodenschäden
2.7.8	Bodenempfindlichkeitsklassen mit dazugehörigen Bewirtschaftungsempfehlungen
2.7.9	Risikostufen
2.7.10	Gefährdungsstufen und Empfehlungen für den Maschineneinsatz
2.7.11	Drei Risikostufen

Der **Anspruch auf Schadprävention** ist unterschiedlich stark ausgeprägt. Gaertig et al. (2.7.2) und Stokes (2.7.7) klassifizieren die auftretenden Schadbilder. Damit ist bestenfalls erst **nach** einer Überfahrt die Einwertung der aktuellen Gefährdungssituation möglich. Konsequenzen für das weitere Handeln lassen sich erst ab diesem Zeitpunkt ziehen. Auch der Ansatz von O’Sullivan et al. (2.7.6), die Veränderung der Bodendichte zu prognostizieren, ist nur bedingt zur Schadprävention geeignet. Der Nutzer bleibt bei der Beurteilung des errechneten Dichtewertes auf sich gestellt.

Die eindeutig **landwirtschaftlich**, zum Teil sogar auf bestimmte Anbaufrüchte, fixierte **Betrachtungsweise** ist für eine direkte Übertragung auf forstliche Verhältnisse natürlich von Nachteil. Zu den nicht unmittelbar übertragbaren Ansätzen zählen jene von Kanali et al. (2.7.3), Canillas und Salokhe (2.7.5) sowie von O’Sullivan et al. (2.7.6). Ebenso wenig ist die Bodenschutzrichtlinie des Bundesamtes für Energiewirtschaft (2.7.1) zur direkten Übertragung geeignet.

Die **Präzision der getroffenen Aussage** unterscheidet die Konzepte recht deutlich. Eine einfach differenzierte Wertung geben z.B. Stokes (2.7.7) und McNabb (2.7.9). Auch die niedersächsische Landesforstverwaltung (2.7.10) liegt mit ihrer vierklassigen Einteilung und den weite Interpretationsspielräume bietenden Kriterien am unteren Präzisionsniveau. Völlig anders sieht es bei O’Sullivan et al. (2.7.6), Canillas und Salokhe (2.7.5) sowie Kanali et al. (2.7.3), aus, welche eine stufenlose Zielgröße (Bodendichte, bzw. Zuwachswerte) ableiten. Im Mittelbereich liegt der Vorschlag von Smith (2.7.11), der schrittweise aus mehreren Eingangsgrößen drei Risikoklassen ermittelt.

Außerdem ist von Interesse, in wie weit wichtige **ökophysiologische Parameter** in die Bewertung Eingang finden. Unbeachtet bleiben sie bei Stokes (2.7.7), McNabb (2.7.9), O’Sullivan et al. (2.7.6), Canillas und Salokhe (2.7.5) und Kanali et al. (2.7.3). Ganz ausgeprägt werden sie bei Gaertig et al. (2.7.2) und Löffler & Müller (2.7.8) berücksichtigt.

Gerade für die Akzeptanz durch die Praktiker ist eine **einfache Handhabung** wichtig. Hier zeichnen sich besonders die Vorschläge von Gaertig et al. (2.7.2), Stokes (2.7.7), McNabb (2.7.9) aber auch jene von O’Sullivan et al. (2.7.6), Canillas und Salokhe (2.7.5) aus.

Schließlich kann danach differenziert werden, ob die vorgestellten Modelle auf verschiedene **Drücke**, d.h. unterschiedliche **Maschinenkonfigurationen** Rücksicht nehmen. Überraschenderweise zählen hierzu längst nicht alle Modelle. Das Bundesamt für Energiewirtschaft (2.7.1), Kanali et al. (2.7.3), Canillas und Salokhe (2.7.5) sowie O’Sullivan et al. (2.7.6) beachten diese Einflussgröße. Bei Smith (2.7.11) finden sie zwar Erwähnung, werden aber nur in groben Klassen eingewertet (z.B. Risikobeurteilung zur Bodenverdichtung durch Maschinen: Loite, Raupenharvester sehr gering; Schlepper mittel; Forwarder sehr hoch).

Tabelle 5: Bewertender Überblick der vorgestellten Bodenschutzkonzepte

Leere Felder: Keine eindeutige Aussage möglich

Die Spalte „Präzision der Aussage“ bezieht sich auf die mögliche Schadprävention.

Konzept	Für Forstein-satz konzipiert	Maschinen- individuell	Ökophysiolog. Bodenparameter	Einfache Handhabung	Schad- prävention	Präzision der Aussage
2.7.1 BEW	nein	ja	ja	nein	ja	gut
2.7.2 GAERTIG ET AL.	ja		ja	ja	nein	
2.7.3 KANALI ET AL.	nein	ja	nein	nein	ja	gut
2.7.4 DISERENS & SPIESS	nein	ja	nein	ja	ja	gut
2.7.5 CANILLAS & SALOKHE	nein	ja	nein	ja	ja	gut
2.7.6 O'SULLIVAN ET AL.	nein	ja	nein	ja	ja	gut
2.7.7 STOKES	ja		nein	Ja	nein	
2.7.8 LÖFFLER / MÜLLER	ja	nein	ja	nein	z.T.	mittel
2.7.9 MCNABB	ja	nein	nein	ja	z.T.	gering
2.7.10 NLF	ja	nein	z.T.	ja	z.T.	gering
2.7.11 SMITH	ja	z.T.	nein	ja	z.T.	mittel

Der Überblick lässt das Resultat der bewertenden Zusammenstellung klar zu Tage treten: keines der genannten Konzepte kann sämtliche aufgestellten Forderungen erfüllen. Kompromisse an der Forderungsliste einzugehen ist nicht zielführend, da alle Elemente dieser Liste für einen auch in der Praxis akzeptierten Vorschlag, der inhaltlich auch wissenschaftlich abgesichert ist, unverzichtbar sind.

Die Notwendigkeit eines neuen Vorschlages, der sowohl

- forsttauglich,
- geeignet zur Schadprävention,
- maschinenindividuell,
- präzise in der Aussage,
- ökophysiologische Parameter berücksichtigend und zudem
- einfach in der Handhabung

ist, lässt sich damit zweifelsfrei belegen. Dieser Vorschlag wird im folgenden Kapitel 3 vorgestellt.

3 Lösungsansatz

Im gewählten Lösungsansatz sind mehrere Elemente zu integrieren, welche alle in den folgenden Kapiteln dargelegt werden. Die Herleitung von Belastungsgrenzen unter realen Befahrungssituationen bezieht auftretende, dynamische Kräfte ein. Diese werden in Kapitel 3.1 ebenso beschrieben wie die Verbindung der dynamischen zu den an Forstmaschinen auftretenden statischen Kräften. Den statischen Kräften ist unter Punkt 3.2 ein separates Kapitel gewidmet, wo unter Punkt 3.2.1 zunächst der Einfluss von Konstruktionselementen der Maschine auf die statischen Kräfte skizziert ist. Der Einfluss der Reifen auf die statischen Kräfte ist in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Hier wird zunächst ein formaler Zusammenhang zur Herleitung der Kontaktfläche entwickelt, anschließend einer zur direkten Berechnung des Kontaktflächendruckes unter Reifen.

Das Grundprinzip des Lösungsansatzes lässt sich anschaulich verdeutlichen. Jeder natürlich gelagerte Boden hat eine gewisse Eigenstabilität, d.h. er kann Belastungen bis zu einem bestimmten Grad reversibel tragen. Wird diese bodenindividuelle Lastgrenze überschritten, treten irreversible Strukturveränderungen auf. Deren Ausmaß determiniert, ob es sich um einen Schaden im ökologischen Sinne handelt oder nicht. Dieser Übergang kann als Lastgrenze gesehen werden.

Wird nun für jedes zum Einsatz vorgesehene Fahrzeug die von ihm ausgehende Belastung ermittelt, so kann vor einem Einsatz vorhergesagt werden, ob diese kritische Belastungsschwelle überschritten werden wird oder nicht. Damit wäre also ein klar prognostisches System geschaffen, das als Planungsinstrument hilft, Bodenschäden zu vermeiden. Der Wert dieses Planungswerkzeuges ist gerade deshalb so hoch anzusehen, da für die Planung zwei Freiheitsgrade als Stellgrößen existieren.

1. Die selbst von einem festgelegten Fahrzeug ausgehende Belastung ist entgegen ersten Vermutungen i.d.R. nicht fix. In gewissen Grenzen kann sie durch Veränderung von Reifenparametern variiert und somit der Belastungsschwelle des Bodens angepasst werden (siehe hierzu Kapitel 3.2.2).
2. Auch die Eigenstabilität natürlich gelagerter Böden ist nicht konstant. Mit der witterungsabhängigen Schwankung der Bodenfeuchte verlagert sich die Belastungsschwelle (siehe hierzu Kapitel 3.1).

Damit wird deutlich, dass dem soeben grob skizzierten Instrument in der Planung tatsächlich ein hoher Nutzen beizumessen ist, da sehr wohl variable Stellgrößen für die letztlich Einsatzorganisation existieren.

Etwas formalistisch lässt sich das dargelegte Grundprinzip des Lösungsansatzes folgendermaßen formulieren:

Es gilt folgende Bedingung einzuhalten:

$$\text{Lastgrenze}_{\text{Boden}} \geq \text{Belastung}_{\text{Fahrzeug}}$$

Der Schlüssel zum Erfolg für den Entwurf eines den Anforderungen gerecht werdenden Systems liegt in der geschickten Auswahl der zu verwendenden Beurteilungsparameter für die Eigenstabilität des Bodens und für die vom Fahrzeug ausgehende Belastung.

3.1 Boden

So überzeugend der Lösungsweg ist, umso problematischer erscheint er bei einer genaueren Betrachtung zu sein, da nun die Frage nach der Definition der Belastungsschwelle des Bodens auftaucht. Doch kann hier auf die Untersuchungen von KREMER (1998) verwiesen werden, der für die Bestimmung dieser Grenze eine Liste mit ökophysiologisch wichtigen Bodenparametern vorlegt. Er schlägt zur Beurteilung folgende Parameter mit den im Folgenden angegebenen Grenzen vor:

Tabelle 6: Ökosystemare Beurteilungsklassifikation nach KREMER, 1998

	unbeeinträchtigt	beeinträchtigt	kritisch
Luftporenvolumen (%)	> 10	10 – 6	< 6
Luftleitfähigkeit (μm^2)	> 200	200 – 50	< 50
Scheinbarer Diffusionskoeffizient	> 0,08	0,08 – 0,02	< 0,02
Porenquotient	> 15	15 – 8	< 8

Mit dieser Liste wird es möglich, eine Grenze der Bodenbelastung so zu ermitteln, dass die vom Boden aufgenommene Kraft die Werte für diese sensitiven Parameter nicht in den kritischen Bereich verschiebt. Die sich daraus ergebende Unterteilung in einen kritischen und einen unbeeinträchtigten plus beeinträchtigten Bereich ergibt die Definition der im Folgenden als „Unbedenklichkeitsgrenze“ bezeichneten Trennung (siehe z.B. Abb. 14).

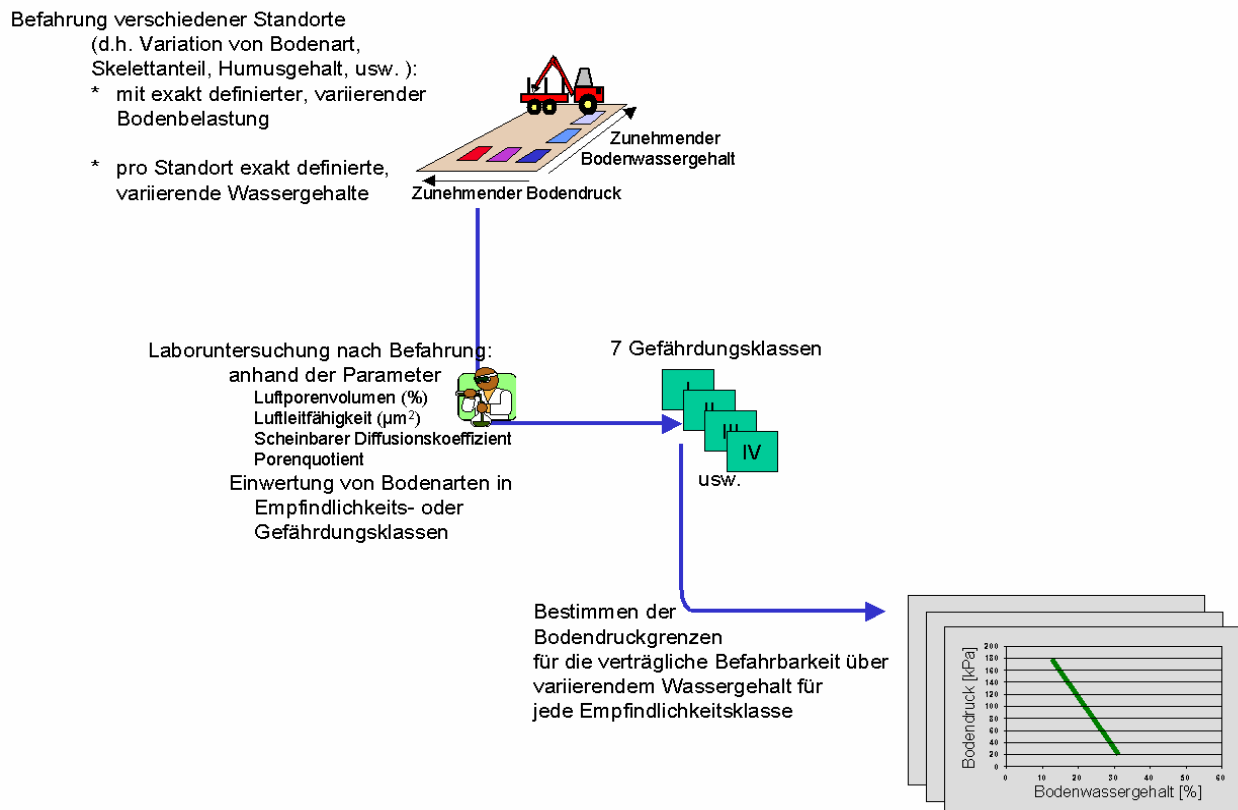


Abb. 13: Schematisierter Versuchsaufbau und Auswertungsweg des Befahrungsversuches

Diese Unbedenklichkeitsgrenze wurde im Rahmen mehrerer Befahrungsversuche für verschiedenste Standorte ermittelt (schematischer Versuchsplan in Abb. 13). Hierzu wurde bei unterschiedlich eingestellten Bodenwassergehalten und variierendem Bodendruck mit einem Forwarder jede Versuchsfläche viermal befahren. Nach der Befahrung wurden die gewonnenen Bodenproben im Labor untersucht. Anhand von Bodenkennwerten wurden die Proben der verschiedenen Standorte gruppiert. Für die Gruppierung konnte dabei auf umfangreiches Datenmaterial aus etlichen Untersuchungen (KREMER ET AL. 1998, MATTHIES ET AL. 1999, MATTHIES ET AL. 2003, MATTHIES ET AL. 2000) zurückgegriffen werden. Über 250 Böden, repräsentativ für rund 70 % der mitteleuropäischen Böden deckten nahezu die gesamte Bandbreite gängiger Bodenarten ab. Anhand der plastischen Werte (Atterberg'sche Grenzen, also Fließgrenze und Ausrollgrenze, bzw. Plastizitätsindex) erfolgte eine Verknüpfung zur Bodenart. Die Bodenart hat für die spätere flächige Umsetzung die Bedeutung, dass es sich hierbei um eine für fast alle Waldflächen verfügbare Information handelt. Sie kann den Werken zur Standorterkundung oder aus Bodenkarten entnommen werden. Als letzter Schritt wurden die Bodenarten entsprechend den Kennwerten insgesamt 7 Klassen (einschließlich Feucht- und Nassböden) zugeordnet. Für jede ausgeschiedene Klasse wurde dann die Grenze für die verträgliche Befahrbarkeit unter Anwendung der in Tabelle 6 genannten Parameter ermittelt (siehe Abb. 14). Das Ergebnis dieser Auswertung ist eine Grenzbelastungskurve für jede ausgeschiedene Bodenklasse. Exemplarisch ist in Abb. 15 für eine Bodenklasse dieser Graph dargestellt. Der ohne kritische Bodenschädigung befahrbare Bereich ist grün hinterlegt.

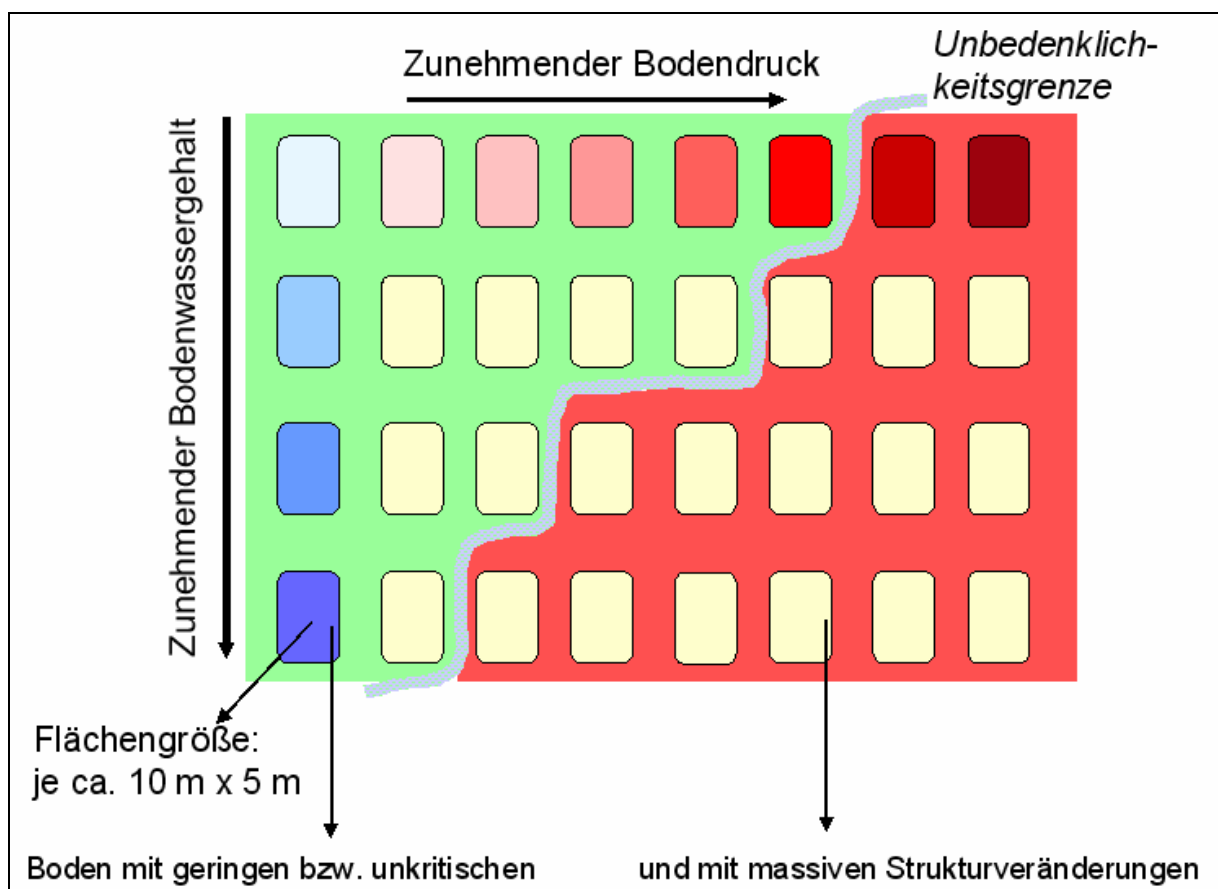


Abb. 14: Schemadarstellung der Unbedenklichkeitsgrenze im Versuchsfeld

Erkennbar wird folgendes:

- Bei Bodenfeuchtwerten unterhalb der Ausrollgrenze ist ein Maschineneinsatz unabhängig von der zu erwartenden Bodenbelastung immer möglich.
- Bei einer Bodenfeuchtigkeit, die über der Fließgrenze liegt, wird ein Maschineneinsatz grundsätzlich ausgeschlossen.
- In dem Bereich von der Ausrollgrenze bis zur Fließgrenze nimmt der maximal tolerierbare Bodendruck im vorliegenden Modell kontinuierlich linear ab.

Die ausgeschiedenen Bodenklassen unterscheiden sich in ihren Ausroll- und Fließgrenzen, folglich haben die Grenzbelastungskurven sowohl unterschiedliche Neigungen als auch eine differierende Lage im Koordinatensystem.

Weitere Einzelheiten zum Befahrungsversuch sind in den Projektberichten von MATTHIES ET AL. 1999 und MATTHIES, 2000a zu finden.

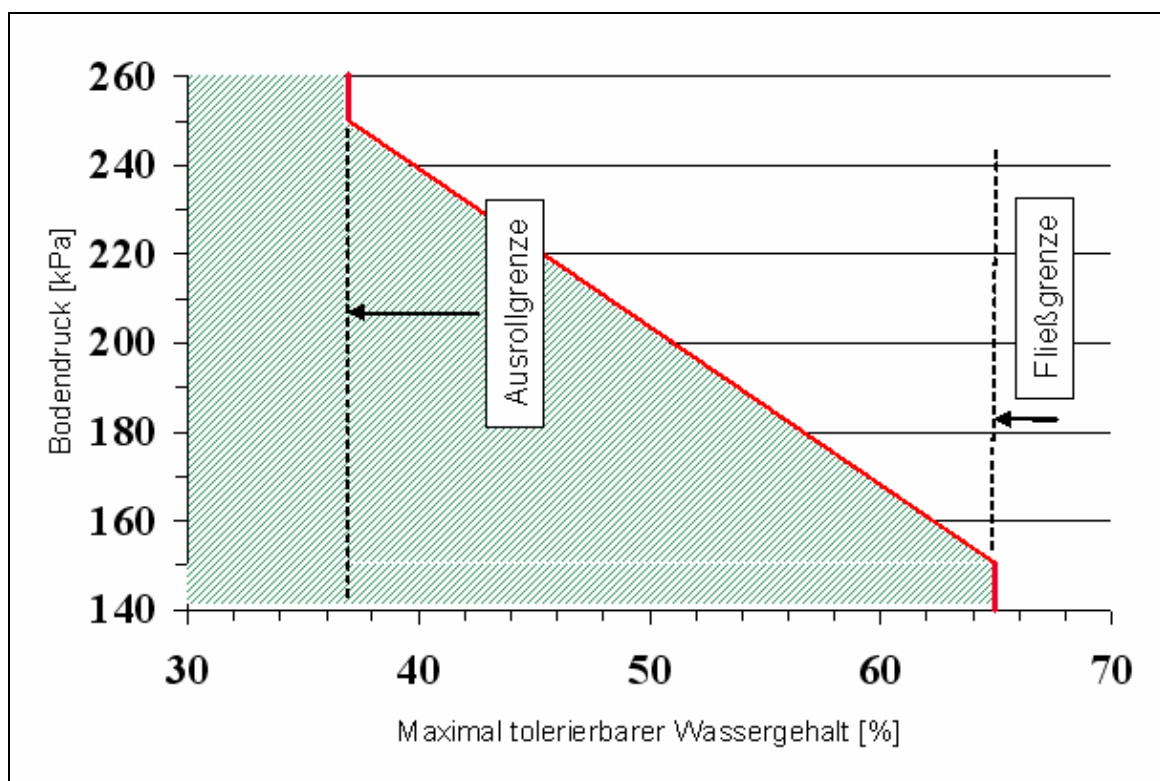


Abb. 15: Exemplarische Grenzbelastungskurve für eine Bodenklasse

3.2 Statische Kräfte

Bei dem unter Kapitel 3.1 dargestellten Versuch werden sowohl dynamische wie auch statische Kräfte auf den Boden übertragen. Die Versuchsanordnung wurde dabei so gewählt, dass typische, forstliche Verhältnisse während der Befahrung vorlagen. Allerdings war die Zahl der auftretenden, statischen Kraftvarianten begrenzt. Um eine Zuordnung von anderen Maschinen, bzw. auch anderen Bereifungen mit weiteren statischen und folglich auch anderen dynamischen Kräften berücksichtigen zu können, ist eine separate Betrachtung der statischen Kraftkomponente nötig.

Dabei wird zweierlei unterstellt:

- Es besteht eine systematische Beziehung zwischen den auftretenden statischen und dynamischen Kräften. Die Relation dieser Kräfte liegt im Bereich von maximal etwa 1:3.

- Die während der Befahrungsversuche aufgetretenen, aber nicht gemessenen, dynamischen Kräfte liegen bei anderen forstlichen Einsätzen mit Maschinen mit gleichem oder geringerem Gesamtgewicht in einer ähnlichen (bzw. geringeren) Größenordnung wie während des Versuches.

Für die Richtigkeit dieser Annahmen sprechen folgende Gründe:

- Alle forstüblichen Maschinen sind in Bezug auf Achskonstruktion, Antrieb und Steuerung ähnlich konzipiert.
- Die im forstlichen Alltag von Forstmaschinen gefahrene Maximalgeschwindigkeit überschreitet in der Regel 5 km/h nicht.
- Die im Versuch abgedeckte Bandbreite der Maschinenmasse reicht von ca. 11 bis ca. 20 t (siehe MATTHIES ET AL. 1999). Mit der Obergrenze von 20 t ist damit ein sehr weites Massespektrum forstüblicher Maschinen abgedeckt. Fast sämtliche Schlepper, Forstspezialschlepper, viele Harvester, sowie Forwarder mit Ladekapazitäten bis 9 t überschreiten dieses Gewicht nicht. Somit fand der Versuch in jenem Bereich statt, in dem die meisten praxistypischen Maschinen vorzufinden sind. Wegen der hohen involvierten Massen sind auch die höchsten, für die genannten Maschinenkategorien zu erwartenden, dynamischen Kräfte abgedeckt.

Sieht man von speziellen Situationen ab, so ist die Annahme berechtigt, dass sich die entwickelnden dynamischen Kräfte bei den meisten forstüblichen Geräten damit in den durch den Feldversuch abgedeckten Grenzen bewegen.

3.2.1 Maschinen

Bereits im Kapitel 2.1 wurden die wichtigsten Größen genannt, die Einfluss auf die statischen Kräfte haben: Gesamtmasse, Achslastverteilung und Radzahl. Das heißt, dass bei Kenntnis dieser Parameter alle maschinenseitigen Stellgrößen zur Ermittlung der *statischen Gewichtskraft* vorliegen.

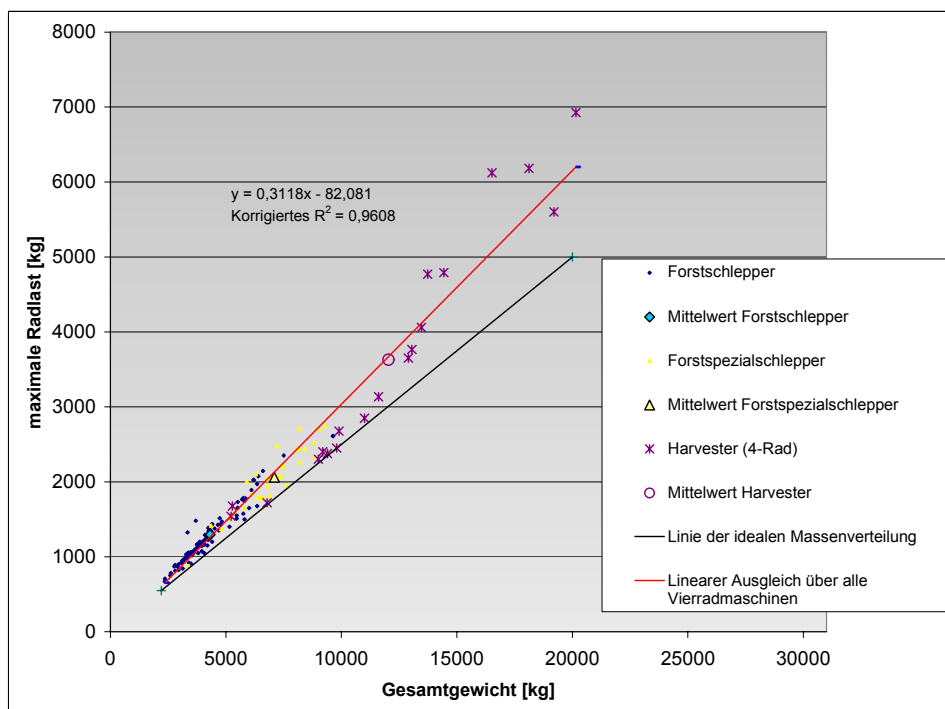


Abb. 16: Maximale Radlast über Gesamtmasse bei forstüblichen Vierradmaschinen

Anhand der im Informationssystem gespeicherten Daten für 4-Rad-Maschinen ist der ungünstige Effekt belegbar, der bei schweren und überschweren Maschinen zu besonders hohen statischen Kräften führt.

Dies liegt daran, dass nahezu immer Abweichungen von der idealen Massenverteilung⁴ auftreten. Ungleiche Achslastverteilungen führen bei höheren Gesamtmassen zu immer höheren, maximalen Radlasten. Dieser Sachverhalt wird durch das Auseinanderlaufen der rechnerischen Ideallinie und der die tatsächliche Radlastverteilung beschreibenden Trendgeraden in Abb. 16 deutlich.

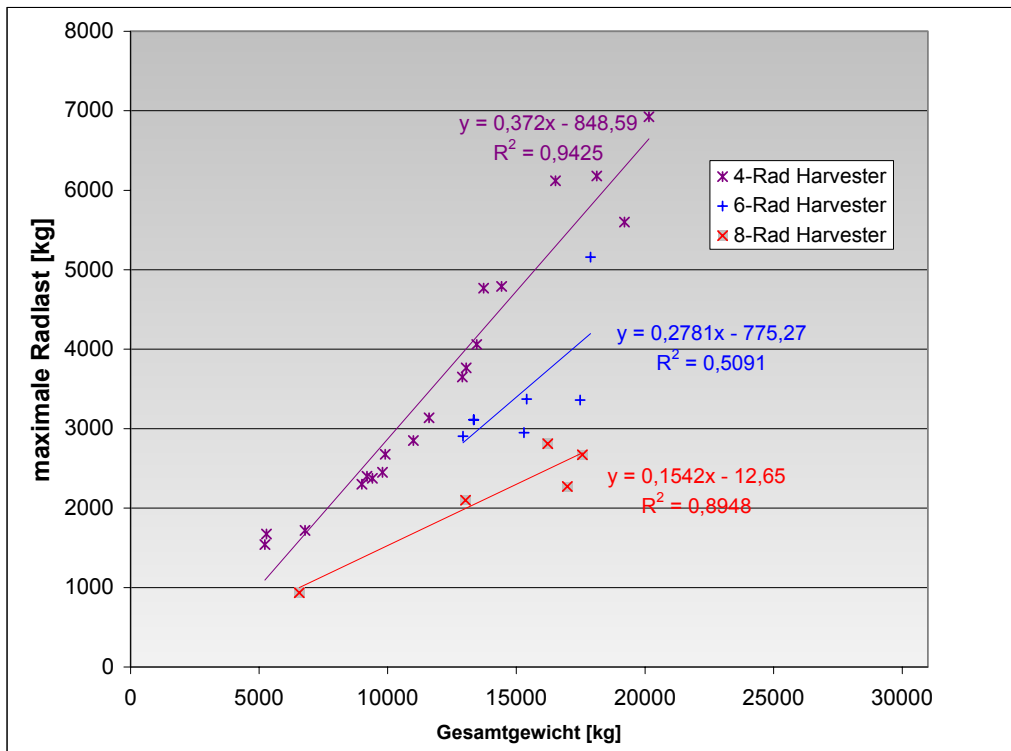


Abb. 17: Vergleich der maximalen Radlast bei Harvestern mit vier, sechs und acht Rädern⁵

Die Gegenüberstellung von 4-, 6- und 8-Radmaschinen in Abb. 17 zeigt den günstigen, die maximale Reifenlast senkenden Effekt zusätzlicher Räder.

3.2.2 Reifen

Von besonderer Bedeutung für die Ermittlung der von Maschinen ausgehenden Bodenbelastung ist der Reifen. Deshalb verdient dieses Thema etwas eingehender behandelt zu werden.

Eine erste Analyse der üblichen Herangehensweisen zur Ermittlung eines Bodendruckes ergab, dass im Regelfall der Druck gemäß Gleichung 1 (Kapitel 2.2) über Kontaktfläche und Radlast hergeleitet wird. Am weitesten verbreitet scheint

⁴ Bei einer 4-Radmaschine liegt die kleinst-mögliche, und damit hier als „ideale“ bezeichnete Masse pro Rad bei 1/4 der Gesamtmaschinenmasse.

⁵ Um eine Vergleichbarkeit zur Linie der idealen Gewichtsverteilung zu erhalten, wurden in die Grafik lineare Trendlinien eingezeichnet. Dies geschah unabhängig davon, ob mit anderen Ausgleichsformen bessere Anpassungsgüten erzielbar gewesen wären.

hierfür die sogenannte „WES“ - oder auch „SkogForsk“ - Formel zu sein (z.B. GERDSEN und GRAUPNER, 1998; MELLGREN, 1980; REINHARDT, 1995⁶):

$$\text{Kontaktfläche} = \text{Breite} * \text{Radius}$$

Abwandlungen sind ebenfalls in der Literatur zu finden, z.B. bei SALM und HÄUSLER, 1997:

$$\text{Kontaktfläche} = \frac{\text{Breite} * \text{Durchmesse } r}{4} = \frac{\text{Breite} * \text{Radius}}{2}$$

Da in dieser Formel der Reifenfülldruck keine Auswirkung auf den errechneten Bodendruck hat, (was aber in zahlreichen Praxisuntersuchungen belegt ist, z.B. BLOCH ET AL. 1992, BACKHAUS 1993; BACKHAUS 1994), kann sie nur als erste Näherung angesehen werden.

Weitergehende Untersuchungen zur Ermittlung von Reifenkontaktflächen decken fast ausschließlich landwirtschaftliche Reifen ab (z.B. SCHWANGHARDT, 1991, HALLONGBORG, 1996, GYSI, 1999). Deshalb schien eine eigene Versuchsserie mit aktuellen, forstüblichen Reifen sinnvoll.

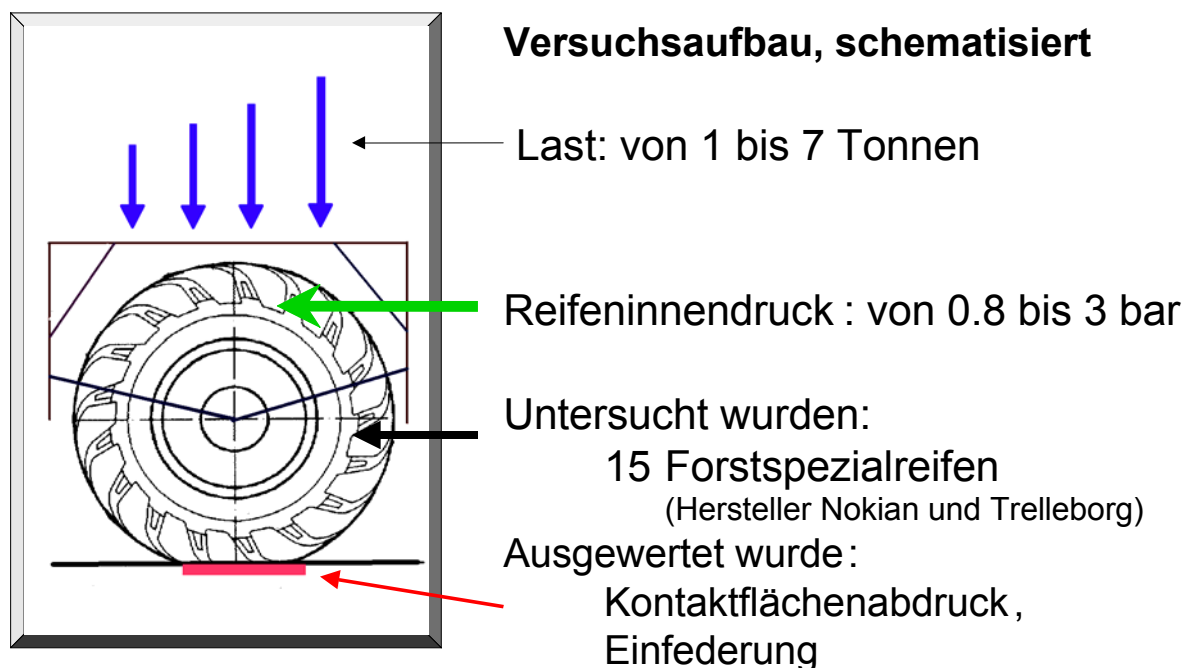


Abb. 18: Schematisierter Versuchsaufbau der Reifenuntersuchung

Dazu wurden 15 verschiedene Forstspezialreifen (Tabelle 7) bei variierendem Anpressdruck von 1 bis 7 Tonnen und unterschiedlichem Reifenfülldruck von 0,8 bis 3,0 bar gegen eine Stahlplatte gepresst (siehe Abb. 18). Bei den Reifen handelte es sich um fabrikneue Reifen, welchen vor Durchführung der Messreihe durch

⁶ REINHARDT gibt für die Aufstandsfläche eine physikalisch nicht nachvollziehbare Quotientenbildung von $\frac{\text{Durchmesse } r \text{ [cm]}}{2 * \text{Breite [cm]}}$ an. Gemeint sein kann jedoch nur die oben genannte Formel.

wiederholtes Be- und Entlasten die anfängliche Steifigkeit genommen wurde. Der Fülldruck wurde bei einer Radlast von 1 Tonne eingestellt. Die mit Druckerschwärze auf der Lauffläche eingefärbten Reifen wurden pro Versuchsserie mehrfach, jeweils um einige Grad weitergedreht, auf den Untergrund gedrückt, wo ein Papierbogen die Kontaktflächenabdrücke aufzeichnete (Abb. 19). Die dunkel gefärbten Abdrücke wurden mittels eines Digitalisiertablets planimetriert (Einzelheiten hierzu bei DÖLLERER, 1999).

Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Reifen

Reifenbezeichnung	Hersteller	Interne Bezeichnung	Breite [mm]	Durchmesser [mm]	PR / LI	Reifentyp
TR Forest 540/60 R 26.5	Nokian	N1	530	1321	LI 145 A8 / 142 B	radial
TR Forest 600/65 R 38	Nokian	N2	591	1745	LI 159 A8 / 156 B	radial
TRS L - 2 600/65 - 34	Nokian	N3	600	1644	14	diagonal
TR - Forest 500/65 R 28	Nokian	N4	492	1345	LI 144 A8/ 141 B	radial
TRS LS - 2 600/55 - 26.5	Nokian	N5	600	1333	12	diagonal
ELS 600/50 - 22.5	Nokian	N6	600	1150	12	diagonal
ELS L-2 700/45 – 22.5	Nokian	N7	700	1170	16	diagonal
TRS L-2 700/50 – 26.5	Nokian	N8	700	1333	12	diagonal
TWIN 423 600/50 - 22.5 12 PR	Trelleborg	T1	600	1170	12	diagonal
TWIN 423 MarkII 700/50-26.5 20 PR	Trelleborg	T2	700	1350	20	diagonal
TWIN 423 MarkII 700/50-26.5 16 PR	Trelleborg	T3	700	1350	16	diagonal
TWIN 423 MarkII 700/40-22.5 12 PR	Trelleborg	T4	700	1170	12	diagonal
TWIN 423 600/55 - 26.5 16 PR	Trelleborg	T5	600	1350	16	diagonal
TWIN 423 800/45 - 30.5 20 PR	Trelleborg	T6	800	1500	20	diagonal
TWIN 424 700/55-34 14 PR	Trelleborg	T7	700	1650	14	diagonal

Weitere Angaben zum Versuchsaufbau sind in ZIESAK und MATTHIES, 2001 nachzulesen. In ZIESAK und MATTHIES, 2001 finden sich auch Auswertungen zum Verhalten der Aufstandsweite, der Aufstandslänge, des Längen/Breiten-Verhältnisses, der Einfederung wie auch der Aufstandsfläche. Die Art der Flächenermittlung wird von DÖLLERER 1999 beschrieben.

Hier soll zunächst nur die Modellierung der Kontaktfläche im Ergebnis dargelegt werden, gefolgt von der hier wichtigeren Herleitung des Bodendruckes. Die angewandte Rechenmethodik ist in beiden Fällen identisch.

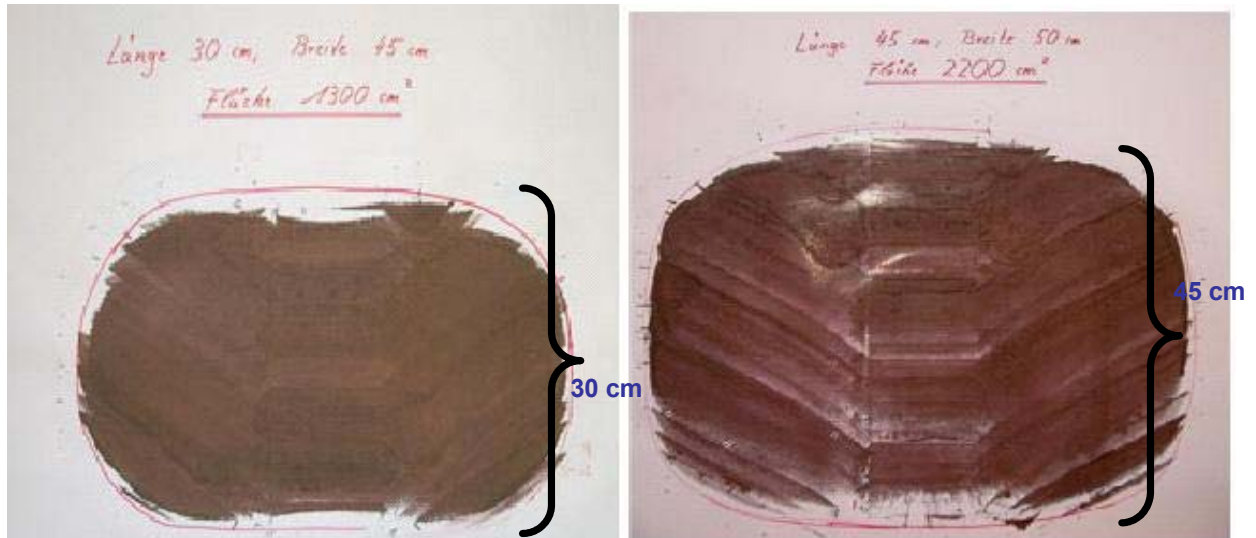


Abb. 19: Beispielabdrücke der Reifenuntersuchung, Foto: Matthies

3.2.2.1 Berechnung der Reifenkontaktfläche

Ein reifenindividuelles Prognosemodell zur Ableitung der Kontaktfläche in Abhängigkeit von charakteristischen Reifenparametern hat Vor- und Nachteile. Einer äußerst guten Nachbildung der realen Messergebnisse steht bei der individuellen Methode einerseits der erhöhte Rechenaufwand, andererseits der deutlich begrenzte Einsatzbereich des funktionalen Zusammenhanges des Testkollektivs gegenüber.

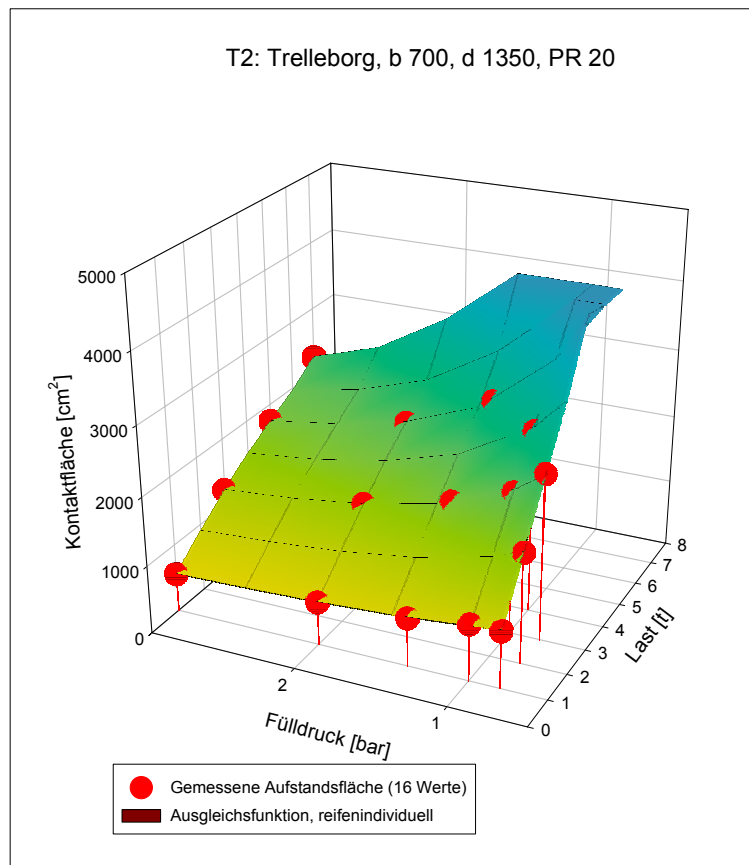


Abb. 20: Reifenindividuelle Anpassung der Kontaktfläche

In Abb. 20 wird für den Trelleborg Reifen „TWIN 423 MarkII 700/50-26.5 20 PR“ (T2) die individuelle Anpassung dargestellt. Die 16 roten Kugeln stellen die Messwerte für diesen Reifen dar. Um auch knapp unterhalb der Fläche liegende Messwerte darzustellen, wurde ein großer Kugeldurchmesser gewählt. Die bunt eingefärbte Ausgleichsfläche basiert auf exakt diesem Wertekollektiv. Im Bereich hoher Lasten und niedriger Fülldrücke wurde die Ausgleichsfläche manuell gekappt (dunkelblau gefärbter Bereich), um den oberen Wertebereich der Ordinate im Vergleich zu Abb. 21 nicht zu überschreiten.

Die auf Basis aller Reifen ermittelte, allgemeine Ausgleichsfunktion (Abb. 21) scheint auf den ersten Blick identisch zu sein. Erst die Residualanalyse zeigt die Unterschiede.

Bei der individuell gefitteten Kurve sind die Residuen über das gesamte Messfeld homogen verteilt, die absolute Abweichung ist äußerst gering (siehe Abb. 22, rote Punkte). Die mittlere absolute Abweichung liegt unter 14 cm^2 . Das entspricht einer prozentualen Abweichung beim dargestellten Reifen von weniger als 1 Prozent. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung liegt über 99,95 Prozent (weitere Werte siehe Anlage 2).

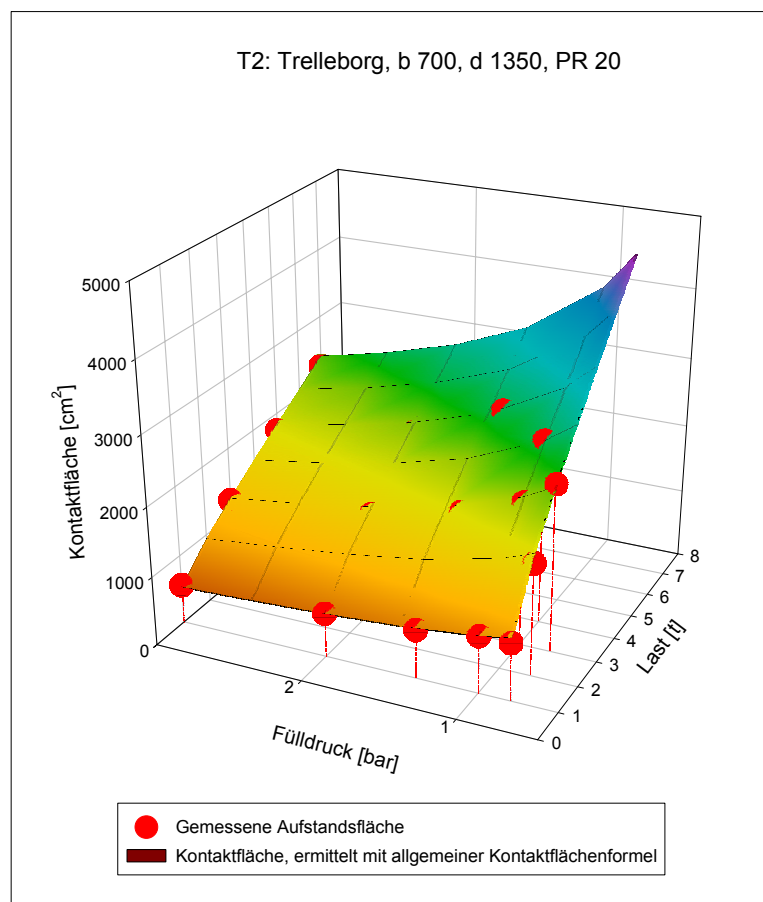


Abb. 21: Generelle Reifenflächenfunktion

Für die allgemein gültige Anpassung (blaue Punkte in Abb. 22) liegt die mittlere absolute Abweichung bei unter 60 cm^2 , was einem Prozentwert von etwa 4 entspricht. Das Bestimmtheitsmaß dieser Anpassung liegt beim gesamten Reifenkollektiv (nicht der hier dargestellte Reifen T2) immer noch bei beachtlichen 96 Prozent.

Wägt man die Vor- und Nachteile der beiden Vorgehensweisen gegeneinander ab, so erscheint die generalisierte Berechnung der Kontaktfläche deutlich vorteilhafter: Die Möglichkeit, mit einem einzigen Formelzusammenhang alle denkbaren Reifen innerhalb des Gültigkeitsbereiches beschreiben zu können, überwiegt die mit diesem Ansatz erkaufte Nachteile bei weitem. Der Nachteil einer höheren Abweichung der Vorhersagewerte von den Messwerten ist bei genauer Betrachtung vergleichsweise klein. Wegen der wiederholten Reifenabdrücke pro Messung auf dem Kontaktpapier (siehe Abb. 19) ergibt sich nämlich bei der Ermittlung der Kontaktfläche ein interpretationsfähiger Randstreifen von bis zu 5 mm Breite. Bei einem Perimeter von 100 cm Länge ergibt sich somit eine „Interpretationsfläche“ von bis zu 50 cm².

Diese Zahl liegt bereits sehr nah am Wert für die durchschnittlichen, absoluten Residuen des hier analysierten Reifens T2.

Für die Interpretation des im Folgenden gezeigten funktionalen Zusammenhanges ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass als Zielgröße die Kontaktfläche in cm² errechnet wird. Eine physikalische Deutung der additiven Terme ist nicht möglich.

Weitere Angaben zur Herleitung sind Anlage 3 zu entnehmen.

$$\begin{aligned}
 A = & 282,6070 + 3,7690 * B + \\
 & 2,3680 * D + \\
 & - 257,3250 * PR + \\
 & - 229,1180 * I + \\
 & 180,6300 * L + \\
 & - 2,8950 * B * D + \\
 & - 793,9350 / L + \\
 & 7,4620 * PR^2 + \\
 & 173,3180 * (I/L) + \\
 & 271,5940 * (L/I)
 \end{aligned}$$

A	Kontaktfläche	[cm ²]
B	Reifennominalbreite	[mm]
D	Reifendurchmesser	[mm]
PR	PR-Zahl	
I	Innendruck	[bar]
L	Radlast	[t]

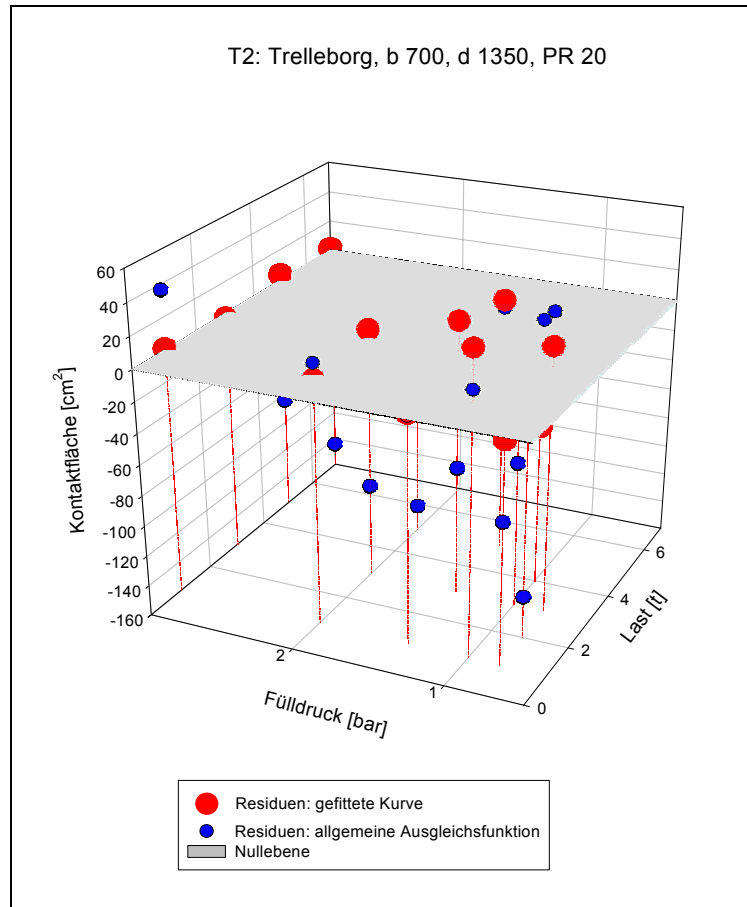


Abb. 22: Residuenvergleich der beiden Kontaktflächenanpassungen

3.2.2.2 Berechnung des Kontaktflächendrucks

Viel wichtiger als die Kontaktfläche ist für die Belastungsermittlung die Herleitung des statischen Bodendruckes. Nicht näher untersucht werden soll die Druckberechnung nach Gleichung 1 aus Kapitel 2.2, in welcher der Nenner auf der Flächenberechnung nach Kapitel 3.2.2.1 aufbaut.

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Bei dieser Vorgehensweise würde unterstellt, dass über die gesamte Kontaktfläche ein homogener Spannungsabbau stattfindet. Dass dem so nicht ist, lässt sich direkt aus entsprechenden Messbildern ablesen (siehe Abb. 23, weitere Abb. z.B. in DLZ, 2001).

Als Beurteilungsgröße ist allerdings auch der auftretende, absolute Maximaldruck weniger geeignet; in Abb. 23 ist dies die dunkelrot gefärbte Zone. Diese Lastspitzen sind für die untersuchten Rad-Lastkombinationen kaum repräsentativ. Auch wirken diese Flächen nur äußerst kurz während einer Überfahrt auf den Boden ein. Stattdessen wird der mittlere Maximaldruck herangezogen. In der Grafik entspricht dies in etwa dem gelb, orange und rot gefärbten Bereich, wofür sich ein mittlerer Kontaktflächendruck ableiten lässt.

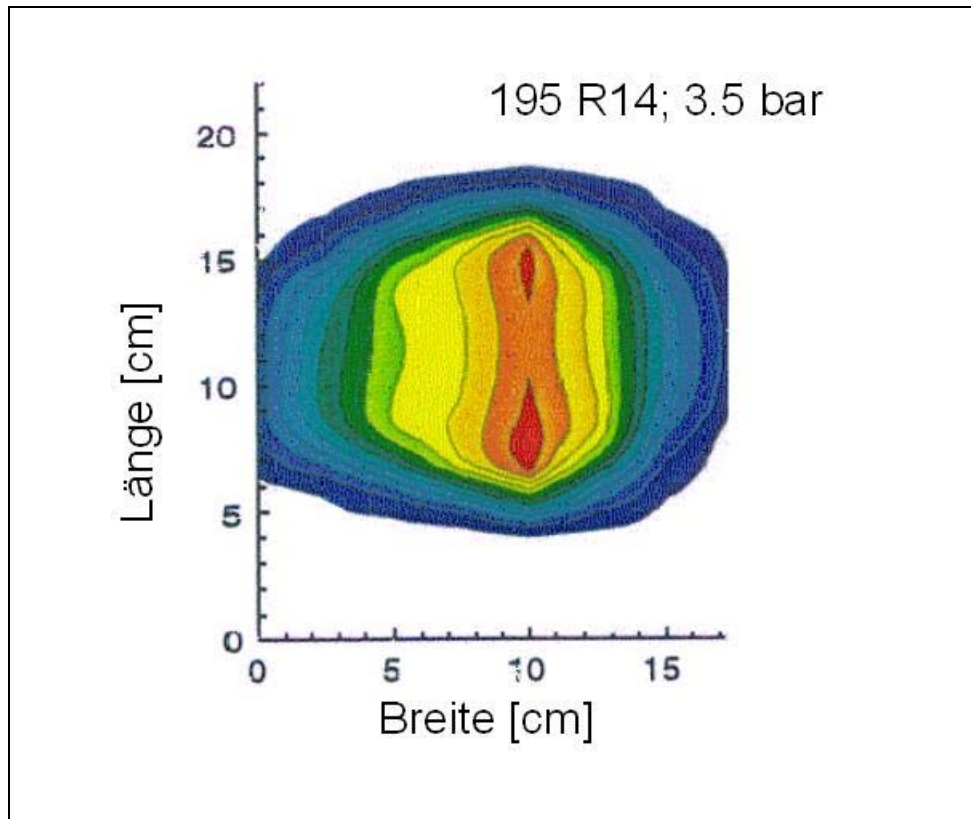


Abb. 23: Radlastverteilung in einer Reifenaufstandsfläche (CALDERA und SOMMER, 1997)

Da sich aus den erstellten Kontaktabdrucken (Abb. 19) aber überhaupt keine Möglichkeit der direkten Druckablesung ergibt, ist es notwendig anhand eines Modells den ungleichen Druckabbau im Kontaktflächenbereich näherungsweise zu beschreiben. Dazu wurde eine Idee von ABEELS (1992) aufgegriffen, der ein Lastwinkelmodell entwickelt hat. Demnach liegt direkt unterhalb der Radnabe, bestimmt durch den so genannten Lastwinkel, die Zone mit dem höchsten Kontaktflächendruck (siehe Abb. 24). Dieser Bereich erstreckt sich über die gesamte Reifenbreite.

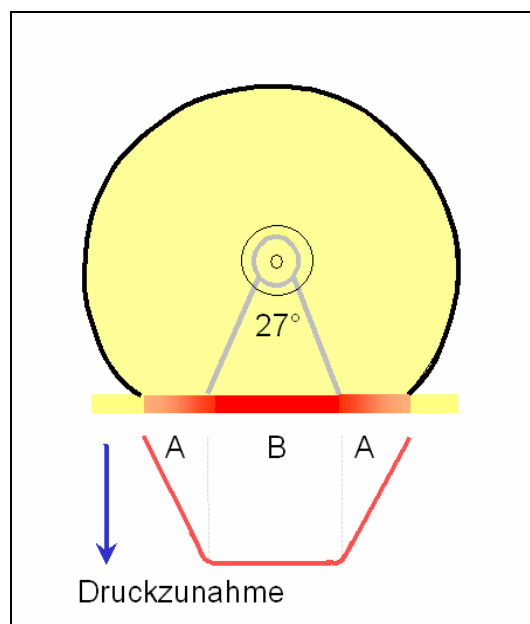


Abb. 24: Lastwinkelmodell, nach ABEELS, 1992

Über die Größe des Lastwinkels existieren keine eindeutigen Aussagen. Da zudem bei unterschiedlichen Reifendurchmessern und Aufstandslängen sich jeweils verschieden große Zonen „B“ ergäben (siehe Abb. 24), wurde dieser Ansatz abgewandelt. Und zwar wurde die Länge der Zone „B“ auf einheitlich 18 cm festgelegt, was im gemessenen Reifenkollektiv der insgesamt kürzesten Aufstandslänge entspricht (siehe Abb. 25 a). Durch dieses Vorgehen wird erreicht, dass ein sehr einfach zu handhabendes Druckberechnungsmodell entsteht, das aus den Abmessungen der Kontaktflächen einen Bodendruck abschätzt. Es wird dadurch auch sichergestellt, dass der in der Praxis belegte, positive Effekt breiterer Reifen in einer maximal vertretbaren Weise Eingang in das Modell findet. Alle Aufstandslängen von mehr als 18 cm Länge für Zone „B“ würden den Breitreifeneffekt in der Berechnung reduzieren, Längen unter 18 cm würden ihn erhöhen. Somit stellt der gewählte Zahlenwert von 18 cm einen vertretbaren Kompromiss für diese Druckherleitung dar. Die Form der mittleren Maximaldruckzone wurde für die Ableitung der Zahlenwerte als rechteckig unterstellt (siehe Abb. 25a). Die in der Realität zu erwartende Form würde jener aus Abb. 25b entsprechen. Die Abweichung zwischen den beiden Zielgrößen, dem mittleren Druck in Zone B, wird als zu gering unterstellt, als dass dies separate Annahmen für die Breite des in Abb. 25b neu entstandenen Übergangstreifens zwischen Zone B und seitlicher Reifenkante rechtfertigen würde. Mit dem dargelegten Modellansatz wird es nun möglich, jedem Kontaktflächenabdruck nach Abb. 19 einen Wert für den zu erwartenden, mittleren maximalen Bodendruck zuzuordnen. Dies ist Voraussetzung für die gewünschte Herleitung der generalisierten Bodendruckberechnung.

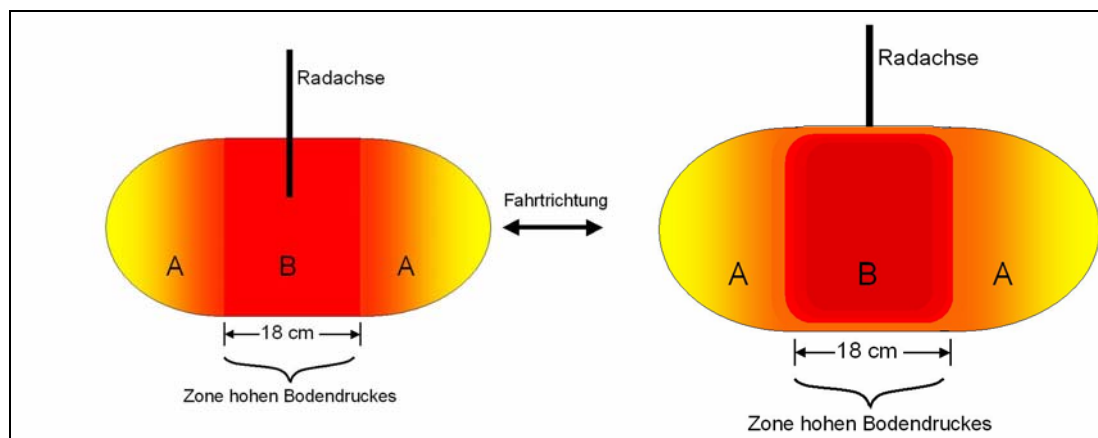


Abb. 25 a und b: Druckzonenmodell

Wie bei der Ermittlung der Kontaktflächenableitung, so sind auch bei der Druckermittlung zum einen reifenindividuelle Anpassungen, zum anderen gültige Vorhersagen für das gesamte Reifenkollektiv entwickelbar. Da der Weg der Herleitung für beide Fälle identisch ist, soll dieser nur am Beispiel der reifenindividuellen Ableitung dargelegt werden. Wegen der universellen Verwendbarkeit des gesamthaften Ansatzes wird wie bei der Kontaktflächenermittlung diesem der Vorzug gegeben.

Ziel der Berechnung ist eine möglichst gute mathematische Abbildung des Reifenverhaltens im Untersuchungsbereich. Eine mathematisch brauchbare Annäherung ist mit Hilfe der Kurvenanpassung zu erhalten.

Dazu wird aus einer hohen Anzahl an errechneten Anpassungskurven, gutachtlich jene ausgewählt, die

- eine möglichst gute Anpassung der Kurve an die Messwerte bietet, und zugleich
- einen Kurvenverlauf bietet, der auch dem physikalisch zu erwartenden Reifenverhalten am ehesten entspricht.

Bei der **reifenindividuellen Anpassung** ist die Zahl der in die Berechnung eingehenden Dimensionen begrenzt:

$$\text{Druck} = f(\text{Radlast, Fülldruck})$$

Alle anderen, den Reifen charakterisierenden physikalischen Parameter bleiben konstant und brauchen somit nicht zur Herleitung herangezogen werden. Diese Begrenzung reduziert das Problem zum „3D-Fall“, d.h. der Sachverhalt lässt sich im dreidimensionalen Raum darstellen. Somit handelt es sich um eine Passflächenermittlung, wo gängige Software zur Lösung herangezogen werden kann. Die reifenindividuellen Anpassungen wurden mit dem Produkt „TableCurve 3D“ der Firma SPSS (siehe auch ANONYMUS, 1997) berechnet.

Insgesamt wurden für den hier beispielhaft herausgegriffenen Reifen „N5“, ein Nokian TRS LS-2 600/55 – 26,5 PR 12, mehrere hundert verschiedene Anpassungen ermittelt. Tabelle 8 enthält einen kleinen Ausschnitt der Ergebnisleistungen. Die Auswahl alleine nach der Rangziffer, also nach der Anpassungsgüte, führt allerdings noch nicht zu brauchbaren Ergebnissen. Zu prüfen ist, in wie weit die erzeugten Kontaktflächen einen physikalisch nachvollziehbaren Kurvenverlauf produzieren. Aus der Lage der Messpunkte **aller** Reifen, lässt sich folgende Gesetzmäßigkeit ableiten:

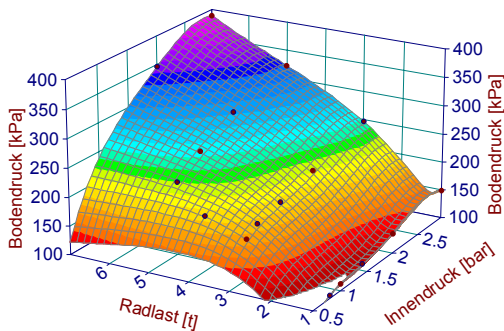
- eine kontinuierliche Zunahme des Kontaktflächendrucks bei zunehmender Radlast, ebenso wie
- eine kontinuierliche Zunahme des Kontaktflächendrucks bei ansteigendem Reifenfülldruck.
- Zusätzlich wird unterstellt, dass auch im Randbereich des Messfeldes sich diese beiden Verhaltensweisen fortsetzen und kein Randabfall oder ähnliches auftreten. Diese Forderung wird auch im kritischen Peripheriebereich stabile Ergebnisse gewährleisten.

Die ersten 19 errechneten Anpassungsgleichungen erfüllen diese drei Bedingungen nicht oder nur ungenügend. Typische Abweichungen sind für die Gleichungen vom Rang 1, 5 und 19 dargestellt. So verhält sich Gleichung 1 bei niedrigen Lasten und Fülldrücken unplausibel (Abb. 26 a), Gleichung 5 zeigt eine störende Wellenbewegung (Abb. 26 b). Gleichung 11 (Abb. 26 c), in abgeschwächter Form aber auch Gleichung 1 zeigen im Bereich hoher Lasten und niedriger Fülldrücke ein unerwünschtes Verhalten: mit höher werdenden Radlasten sinkt der errechnete Bodendruck ab. Als erste brauchbare Gleichung kann jene vom Rang 20 angesehen werden. Der Verlust an Anpassungsgüte beim Sprung von Rang 1 zu Platz 20 hält sich dabei noch in vertretbaren Grenzen (siehe hierzu die Residuen-Zusammenstellung für die Gleichungen vom Rang 1 und 20 in Anlage 4).

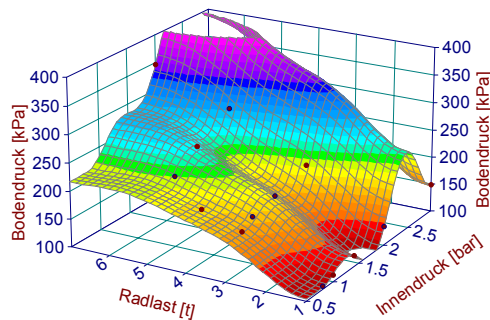
Tabelle 8: Ausschnitt der ermittelten Anpassungsgleichungen für Reifen N5

Rang	DOF adjusted r ²	Gleichung
1	0.9999525358	Chebyshev X, LnY Bivariate Polynomial Order 4
2	0.9999377346	Chebyshev X, Y Bivariate Polynomial Order 4
3	0.9998971276	Chebyshev LnX, LnY Bivariate Polynomial Order 4
4	0.9998784193	Chebyshev LnX, Y Bivariate Polynomial Order 4
5	0.9998476389	Cosine Series Bivariate Order 4
6	0.9998045323	Sigmoid Series Bivariate Order 4
7	0.9996947696	$z=(a+bx+cx^2+d\ln y+e(\ln y)^2+f(\ln y)^3)/(1+gx+h\ln y+i(\ln y)^2+j(\ln y)^3)$
8	0.9996947483	$z=(a+bx+cx^2+d\ln y+e(\ln y)^2+f(\ln y)^3)/(1+gx+h\ln y+i(\ln y)^2)$
9	0.9996691216	$z=(a+bx+cx^2+dx^3+e\ln y+f(\ln y)^2)/(1+gx+h\ln y+i(\ln y)^2+j(\ln y)^3)$
10	0.9996646221	$z=(a+bx+cx^2+d\ln y+e(\ln y)^2)/(1+fx+g\ln y+h(\ln y)^2+i(\ln y)^3)$
11	0.9996405925	$z=(a+bx+c\ln y+d(\ln y)^2+e(\ln y)^3)/(1+fx+gx^2+h\ln y+i(\ln y)^2)$
12	0.9996307766	$z=a+b/x+c\ln y+d/x^2+e(\ln y)^2+f(\ln y)/x+g/x^3+h(\ln y)^3+i(\ln y)^2/x+j(\ln y)$
13	0.9996197893	$z=(a+bx+c\ln y+d(\ln y)^2+e(\ln y)^3)/(1+fx+g\ln y+h(\ln y)^2+i(\ln y)^3)$
14	0.9996193167	$z=(a+bx+c\ln y+d(\ln y)^2+e(\ln y)^3)/(1+fx+g\ln y+h(\ln y)^2)$
15	0.9995917061	$z=(a+bx+cx^2+d\ln y+e(\ln y)^2+f(\ln y)^3)/(1+gx+hx^2+ix^3+j\ln y)$
16	0.9995813188	$z=a+b/x+cy+d/x^2+ey^2+fy/x+g/x^3+hy^3+iy^2/x+jy/x^2$
17	0.9995609089	$z=(a+bx+c\ln y+d(\ln y)^2)/(1+ex+f\ln y+g(\ln y)^2+h(\ln y)^3)$
18	0.9995605901	$z=(a+cx+e\ln y+gx^2+i(\ln y)^2+kx\ln y)/(1+bx+d\ln y+fx^2+h(\ln y)^2+jx\ln y)$
19	0.9995386269	Chebyshev X, Y Bivariate Polynomial Order 3
20	0.9995386269	$z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx+gx^3+hy^3+ixy^2+jx^2y$
...		
559	0.9724928594	$z=a+POWX(b,c)*POWY(1,c)$
560	0.9723468536	$z=POWX(a,b)*POWY(1,b)$
561	0.9721363646	$z=a+bx+c/y+d/y^2$
...		
573	0.8621219974	$z=a+b\ln x+c/y$
574	0.8595094407	$z=a+bx+c/y$
575	0.8499069434	$z=a+b/x+c/y$

Reifen: N5
Rank 1 Eqn 443 Chebyshev X, LnY Bivariate Polynomial Order 4
r²=0.99995254 DF Adj r²=0.99924057 FitStdErr=1.6411772 Fstat=3009.6443



Reifen: N5
Rank 5 Eqn 533 Cosine Series Bivariate Order 4
r²=0.99984764 DF Adj r²=0.99756222 FitStdErr=2.9404201 Fstat=937.47959



Reifen: N5
Rank 11 Eqn 1045 $z=(a+bx+c\ln y+d(\ln y)^2+e(\ln y)^3)/(1+fx+gx^2+h\ln y+i(\ln y)^2)$
r²=0.99964059 DF Adj r²=0.9991785 FitStdErr=2.2580627 Fstat=2781.3567
a=87.963205 b=30.854733 c=-36.410546 d=11.338003 e=-12.480438
f=0.067106146 g=0.00077603552 h=-0.65029834 i=0.056436375

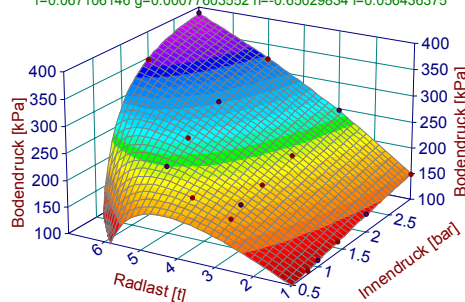


Abb. 26 a, b, c: Kontaktflächendruck über Radlast und Innendruck, Gleichungen von Rang 1, 5 und 11

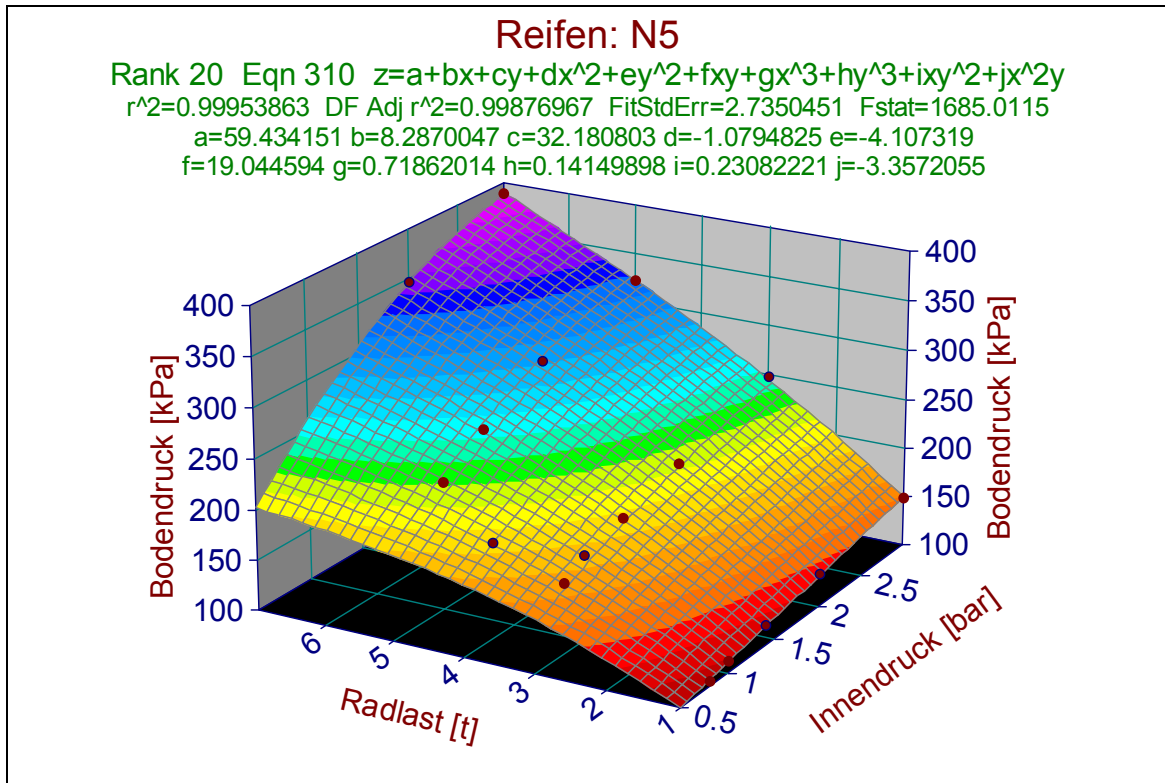


Abb. 27: Empfohlene Anpassungsgleichung für Reifen N5

Somit lautet die Berechnung des Kontaktflächendruckes für Reifen N5 wie folgt:

$$\begin{aligned}
 P &= 59,434151 && + \\
 &8,2870047 && * I && + \\
 &32,180803 && * L && - \\
 &1,0794825 && * I^2 && - \\
 &4,107319 && * L^2 && + \\
 &19,044594 && * I * L && + \\
 &0,71862014 && * I^3 && + \\
 &0,14149898 && * L^3 && + \\
 &0,23082221 && * I * L^2 && - \\
 &3,3572055 && * I^2 * L &&
 \end{aligned}$$

P Kontaktfläche [kPa]
 I Innendruck [bar]
 L Radlast [t]

Auf die Angabe weiterer, reifenindividueller Kontaktflächendruckgleichungen wird verzichtet, da der Einsatzbereich gegenüber der im folgenden dargestellten, generalisierten Berechnung deutlich eingegrenzt ist.

Die Herleitung der **allgemein gültigen Ableitung** erfolgt nach dem gleichen, soeben dargelegten Prinzip. Allerdings ist die Zahl der nun zu berücksichtigenden Parameter um einiges umfangreicher:

Druck = f(Radlast, Fülldruck, Reifenabmessung, Bauartparameter)

Zur Reifenabmessung zählen Größen wie *Reifenbreite*, *Durchmesser* bzw. *Radius* und *Karkassenhöhe*; Angaben zum ‚*ply-rating*‘ bzw. zum ‚*load-index*‘, aber auch das interne *Konstruktionsprinzip* (Radial- oder Diagonal-Bauweise) gehören zur Gruppe der ‚Bauart‘.

Nicht aufgenommen wurde das *Reifenalter*⁷. Hier ist zwar eine klare Beeinflussung zu erwarten. Allerdings wiesen alle Reifen des Messkollektives das gleiche Alter auf, deshalb war es unmöglich hierzu Aussagen zu treffen. Es handelt sich zudem um eine Größe, die sich in der Praxis für im Einsatz befindliche Maschinen kaum exakt belegbar ermitteln lässt⁸. Deshalb ist für den Einsatzzweck der Gleichung, Verwendung im zu erstellenden Informationssystem, dieser Verzicht vertretbar. Dies umso mehr, als für die im Messkollektiv vorliegenden neuen, damit eher steifen Reifen tendenziell höhere Bodendrücke errechnet werden und somit die Kalkulation eine konservative Abschätzung darstellt.

Zur Herleitung der allgemein gültigen Ableitung besteht wegen der hohen Zahl an Parametern aber nicht die Möglichkeit der direkten Berechnung mit Hilfe von 3D-Fitting-Produkten. Diese lässt sich aber „händisch“ nachbilden, indem zumindest für einfachere Polynome zunächst die nötigen, angepassten Hilfsvariablen (also z.B. x^2 , x^3 , $\ln(x)$, $x \cdot y$, usw.) gebildet werden. Anschließend lassen sich über eine Regressionsanalyse die Gleichungsparameter, sowie die die Anpassungsgüte beschreibenden Kennzahlen errechnen. Da sich in einem Schritt alle denkbaren Hilfsvariablen, - bei dem hier vorliegenden Fall existieren bereits mindestens sechs verschiedene unabhängige Basisvariablen -, nicht abprüfen lassen, ist eine iterative Vorgehensweise nötig. Hier werden nicht aufgenommene Hilfsvariablen durch neue, noch nicht getestete ersetzt. Damit können sukzessive sich in der Anpassungsgüte verbessernde Polynome errechnet werden. Die ermittelten Ergebnisgleichungen sind zudem auf physikalische Plausibilität des Kurvenverhaltens hin zu überprüfen.

Es wird klar, dass bei der aufgezeigten Vorgehensweise keine Gewähr dafür existiert, dass wirklich die allerbeste Gleichung gefunden wird. Es existieren zu viele, denkbare Faktorenkombinationen, um alles abzuprüfen. Anhand der Anpassungsgüte lässt sich aber belegen, dass die gefundene Gleichung brauchbare Eigenschaften aufweist und somit als universelle Berechnungsbasis dienen kann.

Die folgende Gleichung erreicht für den zugrunde liegenden Datensatz ein Bestimmtheitsmaß von über 97 Prozent (Korrigiertes R-Quadrat: 0,9756), was für annehmbare Prognoseresultate ausreichend sein sollte.

⁷ Exakt sollte man von „Betriebsstunden“, bzw. „Betriebsstunden im Einsatz“ sprechen.

⁸ EBEL und JACKE (2003) stellen in ihrer Marktanalyse für Forstreifen je nach Gerätekategorie unterschiedliche, maximale Nutzungsdauer der Reifen fest. Bei Harvestern kann diese die Maschinennutzungsdauer überschreiten, bei Forwardern ist sie in etwa identisch, und bei landwirtschaftlichen Schleppern mit Forstausrüstung unterschreitet sie die Gesamtnutzungsdauer der Maschine. Daraus wird ersichtlich, dass selbst im Falle eines pannenfreien Reifenlebens aus dem Betriebsstundenzähler einer Maschine nicht zweifelsfrei das exakte Reifenalter abgelesen werden kann.

$$\begin{aligned}
 P = & - 3947,041471 + \\
 & 44,34483145 * (L * PR * I * 10^4) / (B * D) + \\
 & 24,90661104 * \ln(L) + \\
 & - 42,38023623 / I + \\
 & - 0,000253275 * D^2 + \\
 & - 1149464,098 / B + \\
 & - 2911,823418 * \ln(B) + \\
 & 0,0018067 * D * B + \\
 & 1,587521056 * L * 10^6 / (B * D / 8) + \\
 & - 0,866828386 * L^2 + \\
 & - 7117,309961 / PR + \\
 & - 440,6092277 * \ln(PR) + \\
 & 1144390,758 / K + \\
 & 3845,015781 * \ln(K) + \\
 & - 0,719638939 * 10^{-6} * B * B * (D^2/4 - (D/2 - K)^2)
 \end{aligned}$$

mit

P	Kontaktfläche	[kPa]
I	Innendruck	[bar]
L	Radlast	[t]
B	Reifennominalbreite	[mm]
D	Reifendurchmesser	[mm]
K	Höhe der Karkasse	[mm]
PR	PR-Zahl	

Die Vorhersagegleichung verhält sich weitestgehend konform zu den erwarteten und in den Eingangsdaten gemessenen physikalischen Zusammenhängen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Gleichung nur auf Reifen angewandt wird, die in ihren Parametern denen des Messkollektives entsprechen. Dies heißt, dass folgender Gültigkeitsbereich bei Bodendruckberechnungen nicht überschritten werden darf:

Einsatzspektrum :	Forstspezialreifen
Fülldrücke :	0,8 – 3,5 bar
Breite :	500 – 749 mm
Durchmesser :	1150 – 1650 mm
PR-Zahl :	12 – 18
Breite :	750 – 800 mm
Durchmesser :	1300 – 1600 mm
PR-Zahl :	16 – 20

Die Lastwerte müssen grundsätzlich innerhalb der Tragfähigkeitsgrenzen der Reifen liegen.

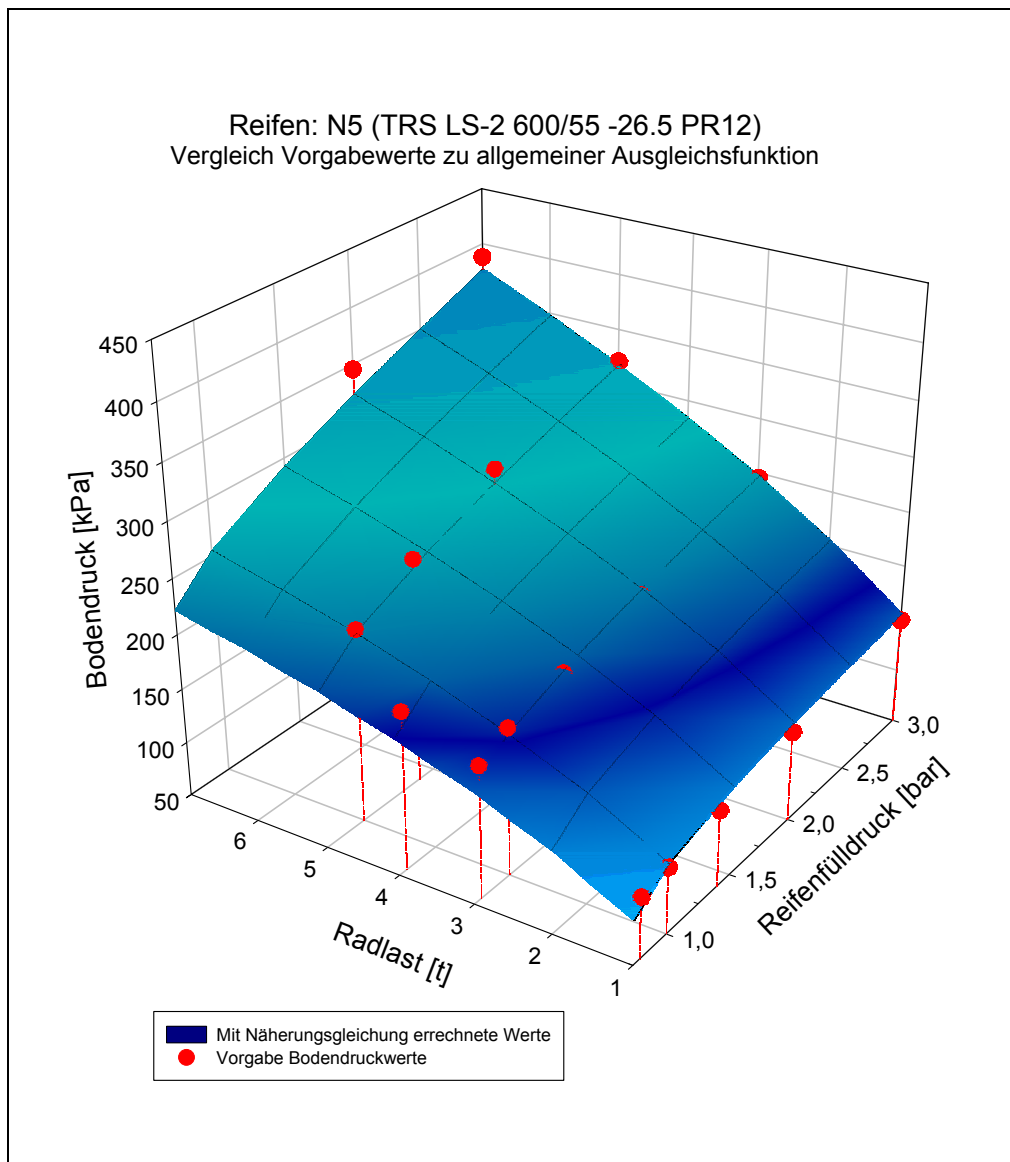


Abb. 28: Grafische Darstellung der Reifendruck-Vorhersagegleichung im Vergleich mit den Vorgabewerten für Reifen N5

Der Vergleich der Vorgabewerte mit von dieser Vorhersagegleichung errechneten Werten lässt sich bei einer reifenindividuellen Darstellung vornehmen. Dafür wird wiederum Reifen N5 herangezogen, welcher bereits für die Erläuterung der Zusammenhänge beim reifenindividuellen Fitting diente. Abb. 28 belegt die augenscheinlich gute Anpassung, sowie den homogenen Kurvenverlauf; Unstetigkeiten – so jene an der 1-bar-Linie – sind durch die für diese Grafik reduzierte Zahl an Stützpunkten bedingt.

Von Interesse ist zudem die Gegenüberstellung des generellen und reifenindividuellen Fitting-Ansatzes. Hier bietet der Residuen-Vergleich einen guten Einblick (Abb. 29). Wie zu erwarten, liegen die Abweichungen des generellen Ansatzes deutlich über jenen der reifenindividuellen Anpassung: die größte Abweichung der individuellen Anpassung liegt bei etwa 4 kPa, beim generellen Ausgleich hingegen über 22 kPa; der individuelle Ansatz zeichnet sich durch eine mittlere Absolutabweichung von knapp über 1 kPa aus, während der generelle Ansatz einen Wert von fast 7 kPa aufweist. Da die Vorteile einer allgemein

verwendbaren Vorhersagegleichung den Nachteil der etwas verringerten Aussagegenauigkeit bei weitem überwiegen, wird die Nutzung dieser Gleichung bevorzugt.

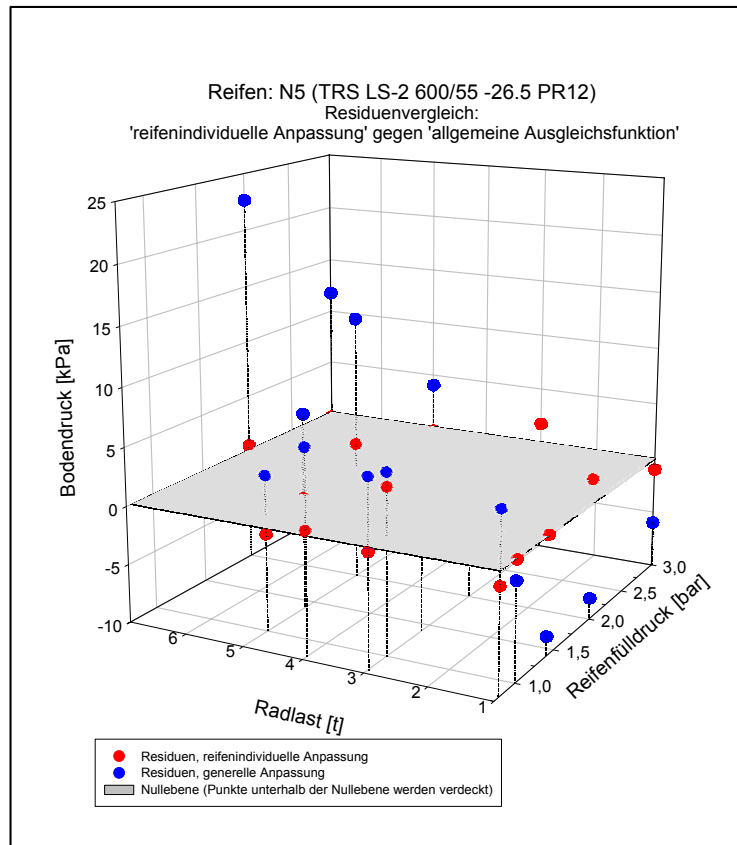


Abb. 29: Residuenvergleich für Reifen N5, reifenindividuelle Anpassung gegen generelle Anpassung

Das ausgewogene Verhalten der Gleichung bei einer Variation der **Reifenbreite** ist in Abb. 30 zu erkennen: ausgehend vom Reifen N5 mit einer Breite von 600 mm ist bei größeren Reifenbreiten (700 mm – grüne Fläche, 800 mm – rote Fläche) ein kontinuierliches Absinken des Bodendruckes zu erkennen. Bei einer Veränderung des **Durchmessers** (Abb. 31), wie auch bei modifizierten **PR-Werten** (Abb. 32) liegt ebenfalls ein konsistentes Verhalten der Gleichung vor. In allen Grafiken (Abb. 30, Abb. 31) ist der durchgehend logische Kurvenverlauf bei sich verändernden Radlasten und Reifenfülldrücken zu erkennen. Somit erfüllt die ermittelte Gleichung weitestgehend alle Forderungen nach einem plausiblen Kurvenverlauf, sie zeigt ein vertretbares Bestimmtheitsmaß und kann somit als generelle Bodendruck-Vorhersagegleichung herangezogen werden.

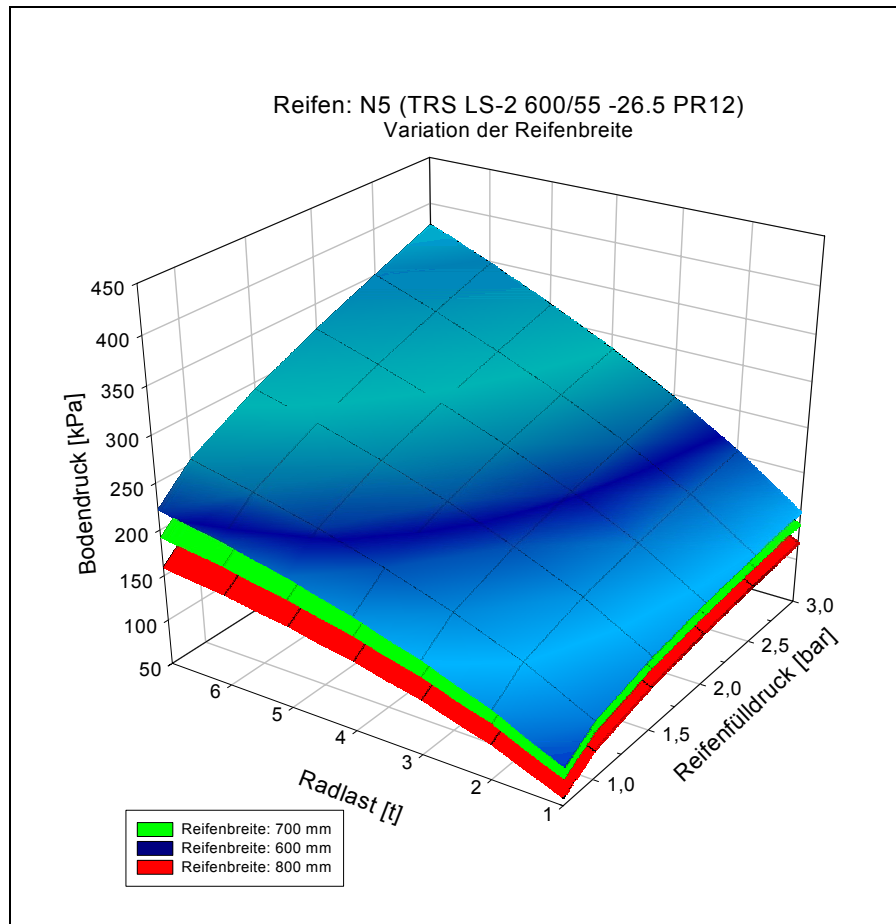


Abb. 30: Einfluss veränderter Reifenbreite auf den Bodendruck

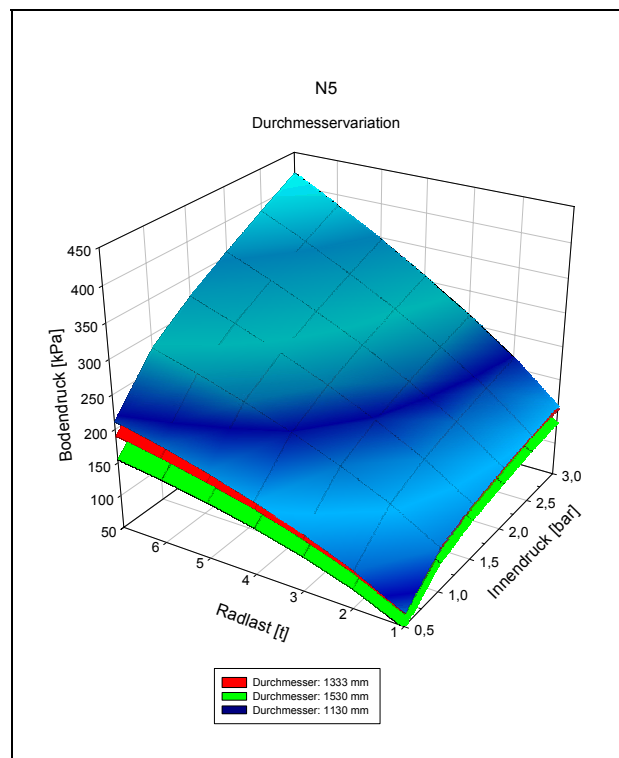


Abb. 31: Bodendruck bei variierendem Reifendurchmesser

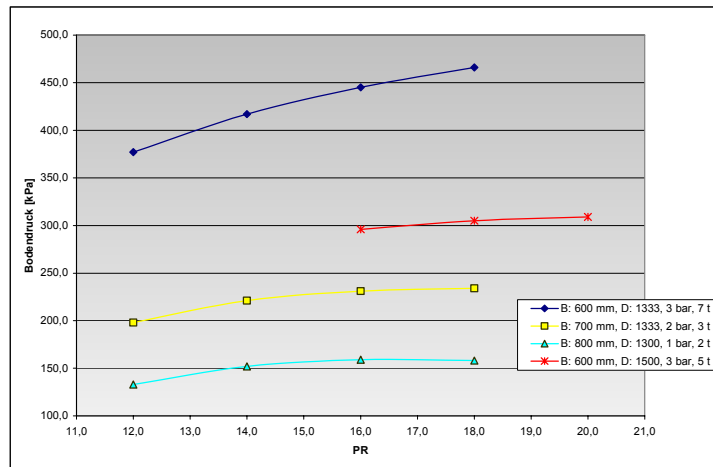


Abb. 32: Einfluss sich verändernder PR-Zahl bei unterschiedlich dimensionierten und belasteten Reifen

3.2.2.3 Beurteilung der Kontaktflächen- und Bodendruckherleitung

Für einen Vergleich der hier soeben vorgestellten Flächen- und Druckermittlung mit den vielen bestehenden, meist für landwirtschaftliche Reifen aufgestellten Berechnungsmethoden (siehe z.B. SCHWANGHART 1991, CREČENKO 1995, SHARMA und PANDEY 1996) kann auf die umfassende Evaluierung durch SAARILAHTI, 2002 verwiesen werden. Innerhalb des „ECOWOOD“-Projektes stellt er gängige Flächen- und Druckermittlungsverfahren zusammen und bewertet sie.

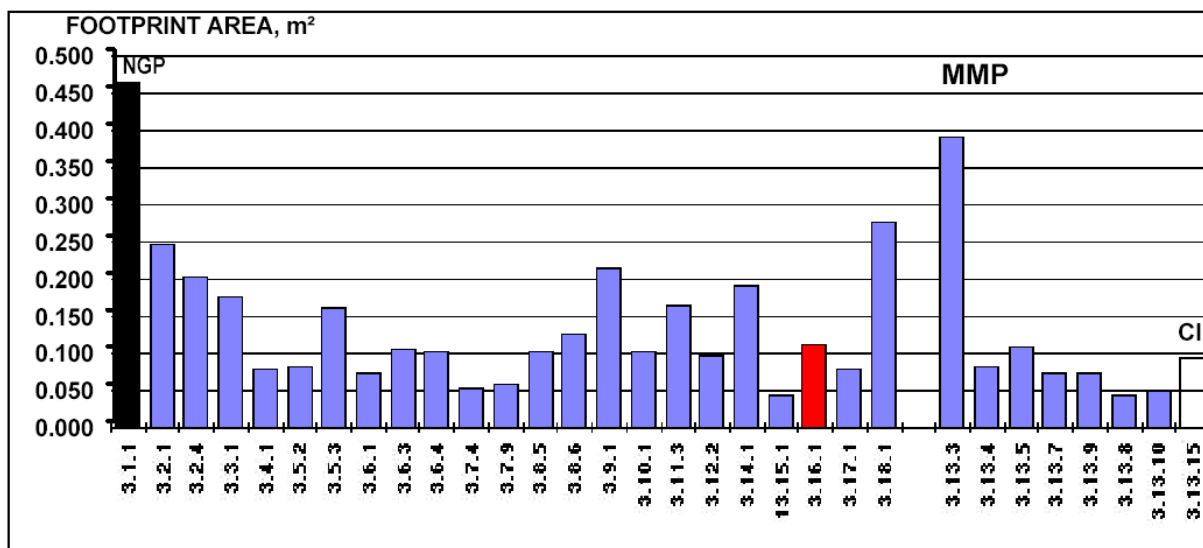


Abb. 33: Vergleich der errechneten Reifenkontaktfläche bei Anwendung verschiedener Berechnungsmethoden. In rot ist das auf Basis dieser Arbeit ermittelte Resultat markiert (verändert nach SAARILAHTI, 2002).

Der Vergleich der Flächenberechnung (Abb. 33), ebenso jener der Kontaktdrücke (Abb. 34) bringt zunächst nur wenig Aufschluss über die Güte der aufgestellten Berechnungswege. Die hohe Abweichung der Resultate untereinander (sowohl bei der Flächen- wie bei der Druckberechnung) mag überraschen, die Erkenntnis mit den eigenen Resultaten im Mittelfeld zu liegen ist ohne Belang.

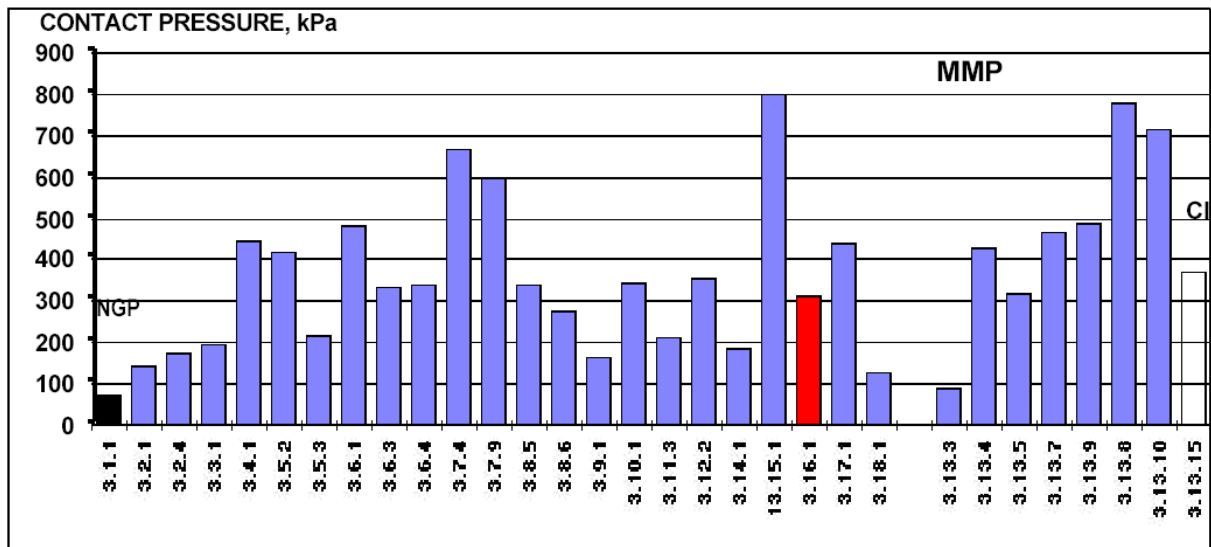


Abb. 34: Vergleich der Kontaktdrücke bei Verwendung verschiedener Berechnungsmethoden. Das auf Basis dieser Arbeit ermittelte Ergebnis ist rot markiert (verändert nach SAARILAHTI, 2002).

Sehr viel mehr Gewicht hat die Beurteilung der Berechnungsverfahren, die auf einer eingehenden Überprüfung der Einflussfaktoren beruht. Hier empfiehlt SAARILAHTI, dass zusammen mit einem weiteren Berechnungsmodell das hier aufgestellte Modell als „Referenzmodell“ zu verwenden⁹ bzw. dass sich damit brauchbare Schätzwerte für die Ermittlung des Kontaktflächendruckes ableiten lassen.

⁹ „This encourages to recommend these two models to be used as „reference models“ for comparing different machines fitted with different wheel configurations, as they seem to be the most logical models for forestry tyres found in literature.” (SAARILAHTI, 2002)

und

“Both ... models seem useful for estimating the tyre contact pressure under forest tractor tyres.” (SAARILAHTI, 2002)

4 Struktur des Informationssystems

Aus den Anforderungen des Endanwenders einerseits, aus der Struktur der zu verarbeitenden Informationsblöcke andererseits und schlussendlich aus den sich ergebenden Informationsströmen lässt sich recht logisch unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Entwicklungsinstrumente die Struktur des Informationssystems ableiten. Entsprechend diesem Aufbau wird zunächst aus Anwendersicht eine Liste der Anforderungen an das Programm aufgestellt, dann die Datenstruktur modelliert und der Informationsfluss dargestellt. Die zur Entwicklung verwendeten Instrumente und der Weg der Realisierung sind im dann folgenden Kapitel erläutert. Abschließend wird die Entwicklungsgeschichte stichpunktartig von der Ursprungsversion 1.0 zur hier vorgestellten Version 2.11 dargestellt. Der für das Informationssystem genutzte Namen lautet „ProFor“.

4.1 Anforderungsliste

Aus Sicht der Endanwender, des Auftraggebers und auch von der Warte des Betreuers aus ergeben sich recht umfangreiche Anforderungen an ein Softwareprodukt. Diese Ansprüche entscheiden in hohem Maße über die Akzeptanz und somit die tatsächliche Verwendung eines Programms. Durch das Einhalten der Anforderungen aller drei Personenkreise soll bereits bei der Produkterstellung sichergestellt werden, dass ein gebrauchstaugliches Endprodukt erstellt wird.

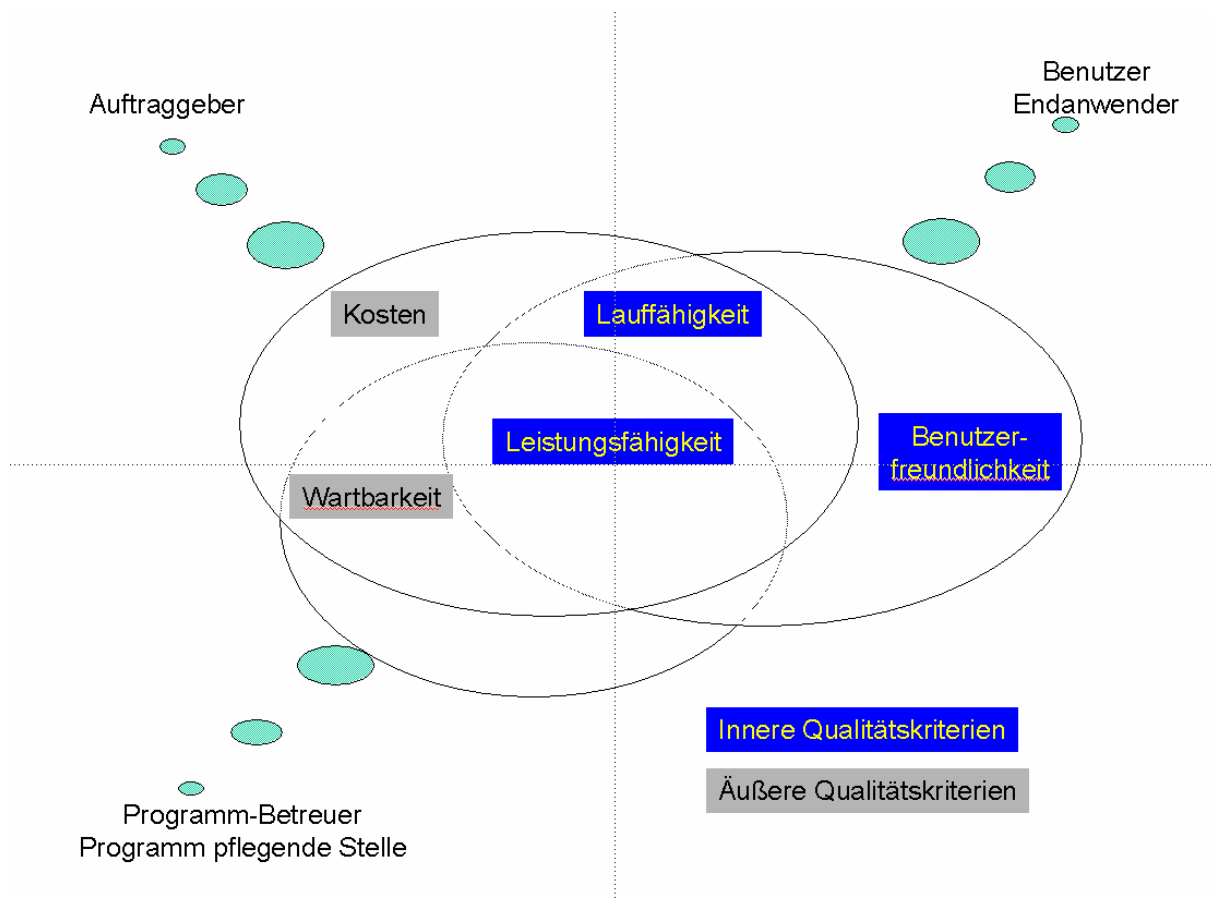


Abb. 35: Wichtige innere und äußere Software-Qualitätskriterien, verändert nach PAGEL und SIX (1994)

In Anlehnung an PAGEL und SIX (1994) ist in Abb. 35 die Liste der möglichen, übergeordneten Anforderungspunkte den drei Personenkreisen zugeordnet¹⁰. Auch wenn daraus ableitbar ist, dass manche Kriterien wegen einer Mehrfachzuordnung wichtiger scheinen (z.B. „Leistungsfähigkeit“), so sollen alle Anforderungen gleichwertig behandelt werden, um alle drei Gruppen in vollem Umfang zufrieden stellen zu können.

4.1.1 Lauffähigkeit

Hierunter sind jene Bedingungen zusammengetragen, die sich auf das Funktionieren des Programms auf verschiedenen Rechnern mit unter Umständen verschiedenen Betriebssystemen beziehen.

Folgende Bedingungen sollten erfüllt sein:

a) Wahl des Betriebssystems des Rechners

Das fertig erstellte Produkt sollte nach Möglichkeit auf möglichst vielen, aktuellen Betriebssystemen eingesetzt werden können (z.B. Microsoft Windows Betriebssystemfamilie mit Windows „XP“, Windows 2000, Windows NT 4.x, Windows ME, Windows 98 usw., Mac OS X, Linux). Varianten, wo ohne Neu-Kompilierung das Programm direkt auf andere Betriebssysteme übertragen werden kann, sind im Vorteil.

b) Einsatz auf mobilen Rechnern (Notebooks) und auf „Büro-Rechnern

Um auch im mobilen Einsatz auf Rechnern in Maschinen oder auf Notebooks brauchbar verwendet werden zu können, muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass die Größe der Displays bei mobilen Rechnern häufig deutlich kleiner ist als bei heute üblichen Büro-Rechnern. Um auf beiden Rechnertypen einsatzfähig zu sein, wird als Kompromiss eine Grenze für die Mindestgröße der Monitorauflösung festgelegt. Diese liegt bei einem Display von mindestens 640 x 480 Pixel, wo das Programm noch funktionieren soll, d.h. gänzlich zur Anzeige gebracht werden können muss.

c) Erhalt der Funktionsfähigkeit auch ohne Internetanbindung des Rechners

Auch ohne Internetanbindung des Rechners soll das Programm in allen wesentlichen Teilen funktionieren. Dies unterstützt ebenfalls die Einsatzfähigkeit auf mobilen Rechnern.

4.1.2 Benutzerfreundlichkeit

Hierunter fallen alle Merkmale, die „ein Softwareprodukt sowohl erfahrenen als auch unerfahrenen Benutzern eine komfortable Bedienung ermöglichen“ (PAGEL und SIX, 1994). Es hat sich bewährt dazu die Aspekte der Software-Ergonomie und das Vorhandensein zusätzlicher Elemente wie Hilfefunktion, Dokumentation usw. zu trennen.

¹⁰ Eine durchaus diskutierbare, andere Zuordnung der Kriterien soll hier nicht erörtert werden. So wäre z.B. bei einem nur leicht verlagerten Rollenverständnis von Endanwender und Auftraggeber die Verlagerung des Kostenaspektes in den gemeinsamen Schnittmengenbereich von Endanwender und Auftraggeber ebenso vertretbar. Wichtig in diesem Zusammenhang ist hier die generelle Darlegung der verschiedenen Kriterien unter Einbeziehung unterschiedlicher Sichtweisen.

4.1.2.1 Softwareergonomischer Kriterien

Als Basis der Beurteilung bietet sich die „Ergonomie-Norm“ ISO 9241, Teil 10 (ISO 9241-10, 1996) an, welche eine systematische Auflistung von Betrachtungsgrößen liefert:

1. Aufgabenangemessenheit
2. Selbstbeschreibungsfähigkeit
3. Steuerbarkeit
4. Erwartungskonformität
5. Fehlerrobustheit
6. Individualisierbarkeit
7. Erlernbarkeit
8. Übersichtlichkeit

Neben diesen, allgemein verständlichen Kriterien ist bei heutigen grafischen Benutzeroberflächen auch das Einhalten der oberflächenspezifischen Gestaltungsrichtlinien empfehlenswert. Für die Microsoft Windows Betriebssystem-Familie liefert der „Microsoft Windows Interface Application Design Guide“ (MICROSOFT, 1993) entsprechende Hinweise. Für Java Programme, die auf den „Java Foundation Classes“ (JFC) aufbauen, geben die „Java look and feel design guidelines“ (SUN, 1999) diese Hilfestellung. Etliche Nennungen der ISO-Normenliste werden durch das Einhalten dieser Gestaltungsrichtlinien fast automatisch erfüllt oder stark unterstützt, wie z.B. die *Erwartungskonformität*, *Steuerbarkeit* und *Übersichtlichkeit*.

Ergänzend sollten bei der Gestaltung der Benutzerschnittstelle allgemeingültige Regeln beachtet werden. Ein gutes „GUI“ (graphical user interface) zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Klarheit
- Konsistenz im Programmverhalten
- Einfachheit
- Dem Nutzer wird die Kontrolle überlassen.
- Direktheit, d.h. der Nutzer erhält eine unmittelbare, sichtbare Rückmeldung auf seine Interaktionen
- Das Programm ist nachsichtig gegenüber Falscheingaben und Fehlbedienung.
- Die Gestaltung der Oberfläche ist ästhetisch.

4.1.2.2 Zusatzelemente des Programms

Einige weitere Elemente erhöhen die Benutzerfreundlichkeit, gehören aber nicht zu den rein softwareergonomischen Kriterien. Dazu zählen z.B.:

- Eine brauchbare, kontextsensitive Online-Hilfe
- Ein ergänzendes, aussagekräftiges Handbuch
- Eine Routine, die den Installationsvorgang übernimmt („Setup-Programm“)

4.1.3 Leistungsfähigkeit

Neben der inhaltlichen, „inneren“ Leistungsfähigkeit sind folgende Aspekte zu ergänzen:

- Zuverlässigkeit,
- Effizienz in der Aufgabenerledigung,

- Korrektheit und
- Robustheit

Diese vier Punkte sind selbsterklärend und bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Die inhaltlichen Gesichtspunkte hingegen sind aufgabenabhängig zu sehen.

Inhaltliche Punkte, die erfüllt sein sollten umfassen folgendes:

- Bodendaten: Es müssen alle Parameter (Bodenart, Humusgehalt, Wechselfeuchte, Skelettanteil und Hangneigung) berücksichtigt werden, sie müssen vom Nutzer frei wählbar sein.
- Maschinendaten: Die Konfiguration für ein Fahrzeug muss in mehreren Dingen frei gestaltbar sein:
 - Reifenwahl, getrennt für jede Achse
 - Verwendung von Bogiebändern
 - u.U. genutzte, achslasterhöhende Zusatzgewichte
- Das Hinterlegen mit marktgängigen Produkten soll eine Direktwahl von Reifen und Maschinen zu ermöglichen.
- Es ist eine einfache Möglichkeit vorzusehen, um für eine konfektionierte Maschine eine weitere Variante mit veränderten Parametern (geändertem Luftdruck, anderer Reifenwahl usw.) zu berechnen.
- Dem Nutzer wird die Verwendung selbst eingegebener Maschinen- und Reifendaten gestatten.
- Berechnungen sollen mit Informationen zum Maschinen- und Waldeigentümer, zum vorgesehenen Waldort und mit allgemeinen Kommentaren ergänzt werden können.
- Erstellte Berechnungen sollen ausgedruckt, gespeichert und später wieder geladen werden können.
- Ergänzende Hinweise zur Befahrungssituation (z.B. Erosionsgefahr in Steillagen, Gefahr der Wurzelbeschädigung bei Raupenfahrwerken usw.) sollen angezeigt werden.
- Rad- und Kettenfahrzeugen sollen unterstützt werden, auch die Verwendung von Bogiebändern soll berücksichtigt werden.
- Das Informationssystem soll auch in Fremdsprachen angeboten werden können.
- Die Datensicherheit ist wichtig. Dies soll Schutz vor Manipulation der Berechnungen bieten. Auch bereits gespeicherte Kalkulationen, ebenso wie die Datenbasis sollen vor ungewünschten Veränderungen geschützt sein.
- Später nötig werdende denkbare Schnittstellen (z.B. um ortsbezogene Daten aus einem GIS zu berücksichtigen) sollen beachtet werden.

4.1.4 Kosten

Gerade aus Sicht der Programmbeschaffer spielt die Kostenkomponente eine entscheidende Rolle. Neben den direkten Kosten für das Programm gehören unter Umständen anfallende Investitionen für zusätzlich benötigte Programme (z.B. eine Datenbank) zu den einmalig auftretenden Auslagen.

Wiederkehrende Aufwendungen sind für Updates anzusetzen. Der Verteilmechanismus für neue Programmversionen betrifft in seinen finanziellen Auswirkungen die Seite der Anwender ebenso wie die der Programmierer.

Günstig ist die Möglichkeit aktualisierte Datenbestände und neue Programmversionen über das Internet zu verteilen. Dies sollte aber nicht unter Verzicht der klassischen Distributionsmedien (Diskette, CD) geschehen.

4.1.5 Wartbarkeit

Insbesondere eine für die Programmpflege zuständige Stelle wird in der Anforderungsliste eine leichte Wartbarkeit des Systems führen. Darunter fallen mehrere Teilaspekte:

- Vorhandensein von Update-Mechanismen:
 - Direkt aus dem laufenden Programm heraus
 - Sowohl für die Daten als auch für das Programm
 - Über verschiedenen Wege: herkömmliche Datenträger (Floppy, CD) oder über das Internet
- Einfache Verwaltung der nutzerspezifischen Daten.
- Verzicht auf Zusatzprogramme (z.B. Datenbanktreiber), die von Drittanbietern stammen. Dies reduziert den Installations-, Konfigurations- und Betreuungsaufwand erheblich und ist somit einer einfachen Wartbarkeit sehr dienlich.

4.2 Datenmodellierung, Datenstruktur

Aufgabe der Modellierung ist die Überführung des gewünschten Betrachtungsausschnittes der realen Welt in eine Abbildung innerhalb der Datenbank. Die dadurch entstehende Datenbasis soll für die gesamte Nutzungsdauer ein korrektes Abbild der zu beschreibenden Realität sein (vgl. dazu auch LOCKEMANN und RADERMACHER, 1990).

Um dies zu erreichen wird üblicherweise in drei Schritten vorgegangen:

1. Zunächst ist eine Entscheidung über die nötige Ausschnittbildung der zu betrachtenden Realität zu treffen. Damit einher geht die Festlegung, welche Abstraktion zweckdienlich ist.
2. Das daraus entstehende, rein gedankliche Gebilde muss formal beschrieben werden. Es entsteht ein konzeptuelles Schema.
3. Als Endziel ist ein logisches Schema zu erstellen. Erst hier wird für ein bestimmtes Datenbanksystem das Schema erzeugt.

4.2.1 Ausschnittbildung, Abstraktion

Beim ersten Schritt hilft die Sichtweise, dass sich die reale Welt aus Objekten, deren Eigenschaften, Beziehungen und den Eigenschaften der Beziehungen aufbaut. In der Modellierung versucht man durch *Benennung* die nötigen Objekte zu identifizieren, dann über eine *Selektion* eine geeignete Auswahl zu finden, und anschließend durch das Zusammenfassen homogener Elemente eine *Klassifikation* durchzuführen.

4.2.2 Konzeptionelles Schema

Für den Aufbau des konzeptionellen Schemas werden Beschreibungsformalismen genutzt. Diese Formalismen werden auch als "semantische Datenmodelle" bezeichnet. Da sie im Modellierungsprozess die zentrale Rolle einnehmen, sind sie Thema von Forschung und Weiterentwicklung. Die zur Verfügung stehenden Modelle unterscheiden sich in ihrer Beschreibungsmächtigkeit, Komplexität und auch der allgemeinen Akzeptanz ganz erheblich. Deshalb sollen zunächst einige gemeinsame Grundlagen und dann einige wenige Modelle kurz vorgestellt werden, um die hier

getroffene Wahl für ein bestimmtes semantisches Modell besser verständlich zu machen. Im Übrigen sei an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur zu diesem Thema verwiesen (z.B. VOSSEN, 2000).

Je nach vorgefundener Sichtweise in den Modellen, lassen sich diese in systemanalytische, softwaretechnische und logische gliedern (LOCKEMANN und RADERMACHER 1990). Allerdings ist die eindeutige Zuordnung bisweilen nicht ganz einfach, da auch unterschiedliche Sichtweisen in einem Modell realisiert sein können. In der systemanalytischen Sichtweise wird die zu modellierende Realität als zu beschreibendes System gesehen, bei der softwaretechnischen Sichtweise wird die Modellierung als Spezifikationsproblem verstanden und in der logischen Sichtweise schließlich steht die vorgefundene Logik im Vordergrund.

Von den drei genannten Sichtweisen haben die systemanalytischen die weiteste Verbreitung und Bedeutung gefunden. Hierzu zählen etwa folgende Modelle: das netzwerkorientierte, hierarchische, relationale, funktionale, objektorientierte und Entity-Relationship Modell (STONEBRAKER 1988).

4.2.2.1 Assoziationstypen, Kardinalität

In fast allen Modellierungsmethoden lassen sich Klassen nach der Zahl der an der Beziehung beteiligten Objekte bilden. Von übergeordneter Bedeutung ist hierbei der binäre Assoziationstyp, also der Beziehungstyp, bei dem genau zwei Objekte beteiligt sind. Die Zahl der bei einer bestimmten Entität möglichen Beziehungen wird als Kardinalität bezeichnet. Hierfür lässt sich eine Unter- und Obergrenze angeben. Der Fall, dass die Untergrenze den Wert Null annimmt, bedeutet, dass eine Beziehung zwischen Entitäten bestehen kann, aber nicht muss. Die Beziehung ist dann optional. Ein weiterer Unterscheidungsfall ist, ob exakt eine oder mehrere Beziehungen eingegangen werden.

Dieser Sachverhalt lässt sich numerisch in unterschiedlicher Weise darstellen:

Min-Max-Notation	(1,c,m)-Notation	(1,M)-Notation
(0,1)	c ¹¹	1
(1,1)	1	
(N ¹² ,0)	mc	m
(N,1)	m	

Die Min-Max- und die (1,c,m)-Notation sind in Ihrem Aussagewert identisch, in der (1,M)-Schreibweise ist hingegen die Optionalität nicht mehr erkennbar.

Lässt man die Optionalität außer Betracht, so ergeben sich drei Paarungen bei den Kombinationsmöglichkeiten, den 1:1, 1:N und M:N Assoziationstyp. Beim 1:1-Typ kann mit einem Exemplar des ersten Typs höchstens ein Exemplar des zweiten Entity Typs verbunden sein. Beim 1:N-Typ können mit einem Exemplar des ersten Objekttyps beliebig viele, - auch null - Exemplare des zweiten Typs verbunden sein, aber mit einem Exemplar des zweiten Typs kann höchstens ein Exemplar des ersten Typs verbunden sein. Der M:N-Typ kennt schließlich keine Einschränkungen.

¹¹ "c" bzw. "m" leiten sich ab vom Englischen "choice" bzw. "many".

¹² Das "N" steht als Platzhalter für jede Zahl, die größer als 1 ist.

4.2.2.2 Grafische Darstellung

Ein wesentliches Hilfsmittel bei der Erstellung neuer, aber auch der Interpretation und Analyse bestehender Modelle sind grafische Darstellungstechniken. Sie gehen auf Chen (CHEN, 1976), bzw. Bachmann zurück (KNOLMAYER und MYRACH, 1990). Diese Grafiken zeigen in abstrahierter Form immer die Objekte und deren Beziehungen. Attribute von Objekttypen können, müssen aber nicht, angezeigt werden. Bisweilen wird auch nur eine Teilmenge der Attribute in der Darstellung aufgenommen.

Ein einfaches ER-Diagramm nach CHEN baut sich aus Rechtecksymbolen für Objekte und Parallelogrammen für Assoziationen auf. Der Assoziationstyp wird durch Markierung der Kanten beschrieben (siehe Abb. 36). Attribute können durch Kreise oder Ellipsen dargestellt und durch verbindende Linien den zugehörigen Gegenständen oder Beziehungen zugeordnet werden.

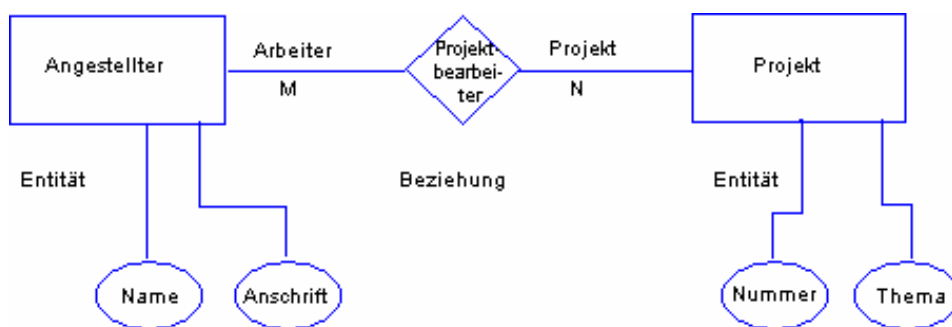


Abb. 36: ER-Diagramm

Wird die Kardinalität nicht numerisch sondern ebenfalls grafisch dargestellt, so ergeben sich weitere Darstellungsformen (siehe hierzu die Übersicht in Abb. 37). Leider existiert kein Standard, bisweilen werden gar nach Gutdünken eigene Erweiterungen genutzt (z.B. in WIBORNY, 1990). Selbst für die Seite, an der die Kardinalität angegeben wird, besteht keine Einheitlichkeit. Dieser Sachverhalt ist nachteilig, weil somit jedes Diagramm mit einer eigenen Legende erläutert werden muss.

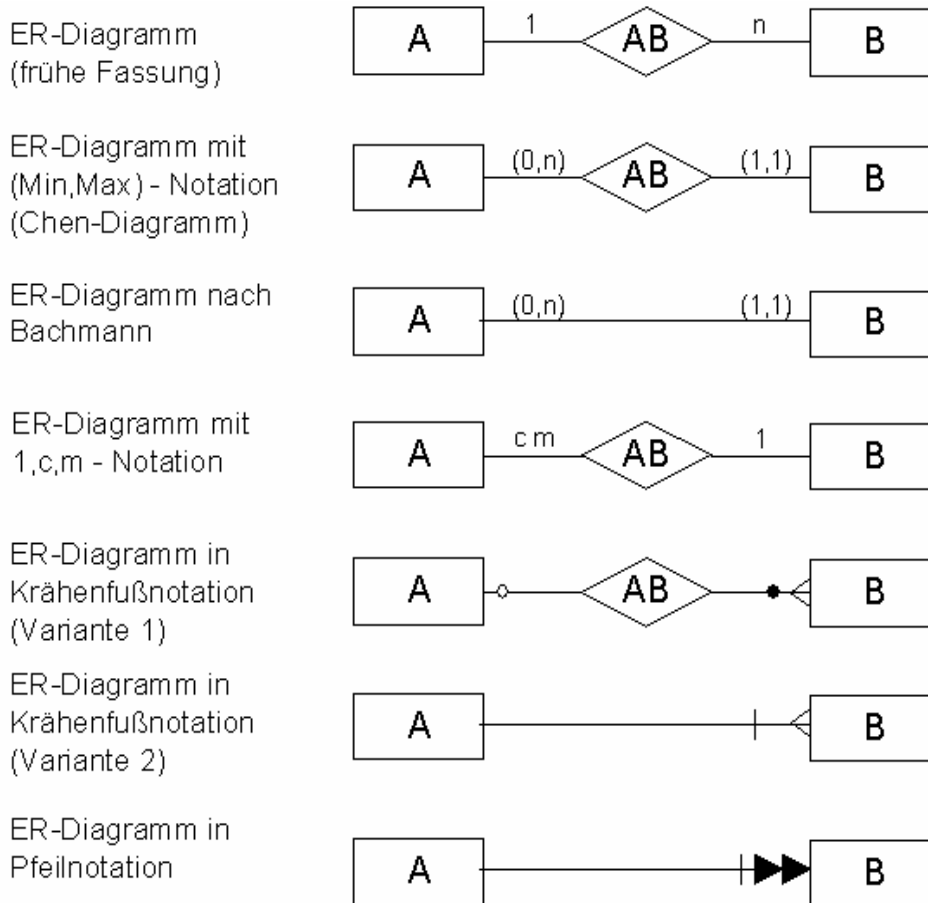


Abb. 37: Beispiele für Kardinalitätsangaben in ER-Diagrammen (nach LOOS, 1996 und KNOLMAYER und MYRACH, 1990, leicht verändert)

Für die in dieser Arbeit gewählte Darstellungsform, galt die Forderung eine hohe Lesbarkeit und Übersichtlichkeit zu gewährleisten ohne dabei Informationsverluste hinzunehmen. Gewählt wurde eine auf MARTIN (1977) zurückgehende Notation. Hier ist alleine die verbindende Kante zur Angabe der Beziehungsform ausreichend, der Verzicht auf die zusätzliche Raute erhöht die Lesbarkeit. Einzelheiten dieser Darstellungsform sind in Abb. 38 erläutert.

Besonders wichtig ist dabei der Hinweis auf die Position der Angaben zum Assoziationstyp bzw. Kardinalität und zur Optionalität, da diese bisweilen auch in anderer Lesart benutzt wird. Als Merkhilfe mag gelten: Beim Betrachten der Optionalität einer Beziehung ist das dem fraglichen Objekt zugeordnete (benachbarte) Symbol entscheidend, während beim Assoziationstyp auch die Beziehungsrichtung von Bedeutung ist. Die Kardinalität erklärt sich an der dem fraglichen Objekt abgewandten Seite. Der Vorteil dieser Darstellungsform ist, dass sich optisch sofort erkennen lässt, dass im Beispiel mehrere Objekte₁ in Beziehung mit Objekt₂ stehen.

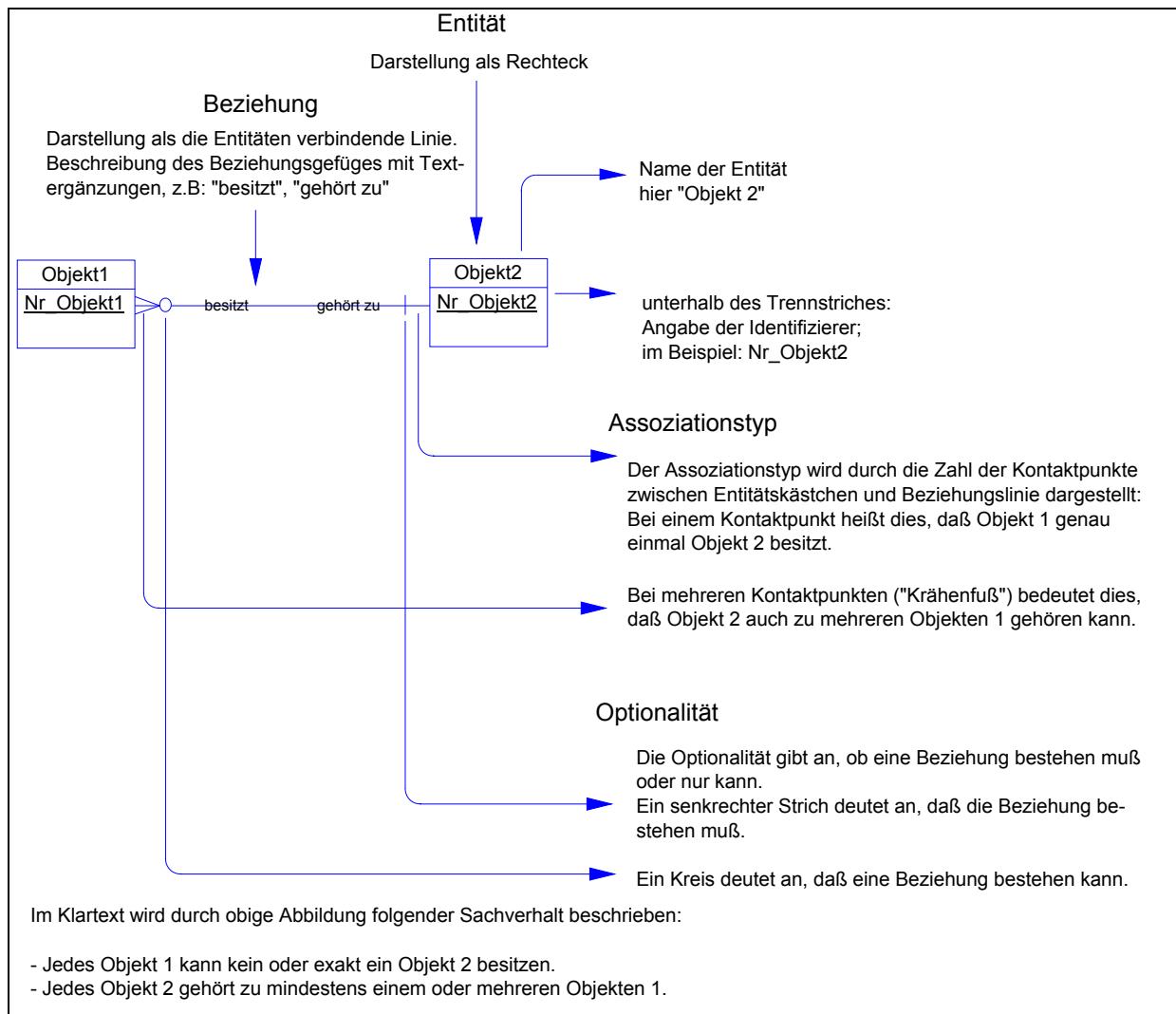


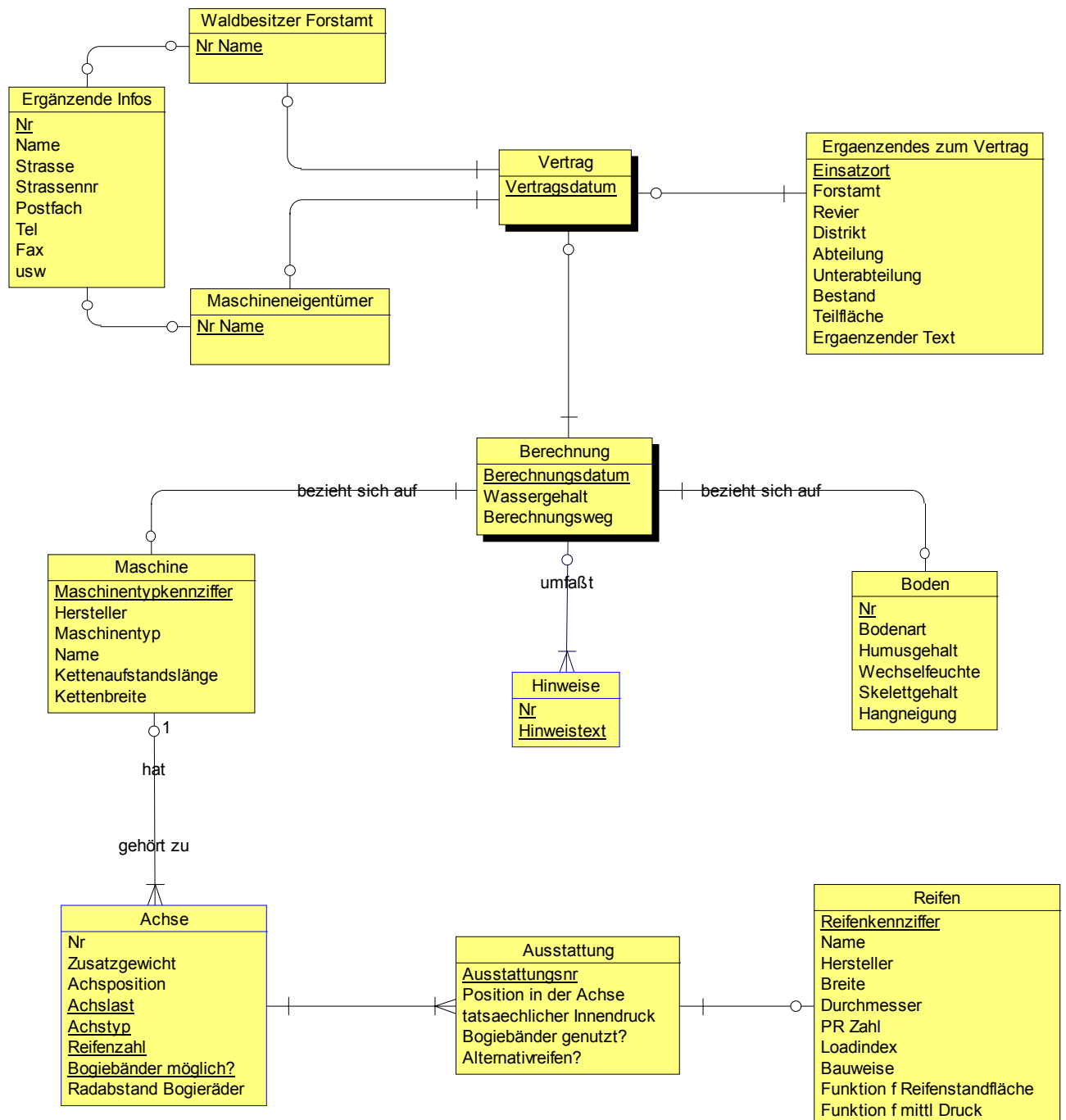
Abb. 38: Darstellungsmethodik im konzeptionellen Modell

Der erster Entwurf eines ER-Diagrammes in Abb. 39 gibt einen grundsätzlichen Überblick über die beteiligten Betrachtungsobjekte und deren Beziehungen:

Im Mittelpunkt steht die Berechnung der Befahrungsmöglichkeit, die Boden und Maschine zusammenführt. Ergänzt wird sie durch optionale Hinweise, und die Zuordnung zu einem Vertrag zwischen einem Unternehmer und einem Waldbesitzer. Bei Radmaschinen werden pro Achse u.U. mehrere Ausstattungen [z.B.: Zwillingbereifung] mit den dort genutzten Reifen beschrieben. Ergänzende Informationen zum Einsatzort, bzw. zu den Vertragsparteien vervollständigen die Darstellung.

Aus diesem ersten Entwurf lässt sich ein gestraffter, und für die Umsetzung vereinfachter Entwurf ableiten (Abb. 40). Dazu wird die Möglichkeit verworfen, sowohl Verträge als auch Berechnungen separat zu verwalten, da das Vertragsmanagement außerhalb der Kernaufgaben liegt. Außerdem ist eine direkte Zuordnung der Achsinformation zum Fahrzeug möglich, da die Zahl der Achsen bei den im Forst vorkommenden Fahrzeugen i.d.R. auf zwei Achsen begrenzt ist. Um auch allen Sonderfällen gerecht zu werden, ist eine Obergrenze von vier Achsen gesetzt. Durch diese Vereinfachung lassen sich Reifenausstattungen direkt einem Fahrzeug zuordnen. Ergänzt wurde die Möglichkeit, Reifen direkt Messfelder für den mittleren Bodendruck zuzuordnen. Dies eröffnet die Chance, dass Messergebnisse

von Reifenprüfungen unmittelbar und nicht erst über Modifikation von funktionalen Zusammenhängen über die Datenbank in das System eingespielt werden können. Ergänzt man den zeitlichen Aspekt der Nutzung, so kann getrennt werden in jene Information, die bereits mit Auslieferung des Systems vorliegen muss und jene, die erst später bei Erstellung erster Berechnungen nutzerspezifisch entsteht. In Abb. 40 ist Nutzerspezifisches in gelber Farbe kodiert. In rötlichem Ton sind die Objekte und Verknüpfungen markiert, die vor einer ersten Kalkulation verfügbar sein müssen.



Anmerkung 1: Die Reifenausstattung kann NUR bei Kettenfahrzeugen entfallen!

Abb. 39: Ausschnitt der für die Problemlösung relevanten Objekte, dargestellt als ER-Diagramm

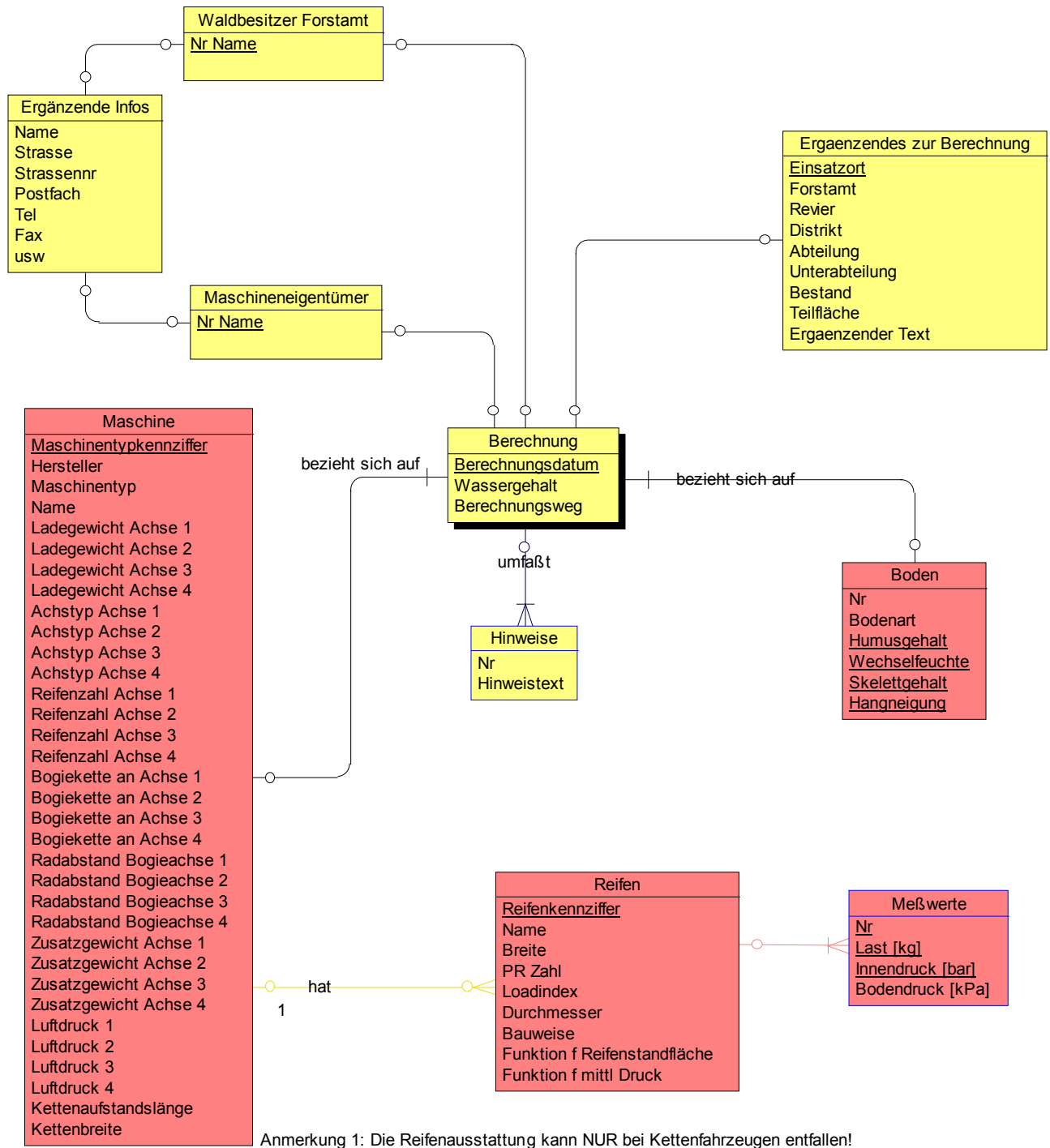


Abb. 40: Vereinfachtes ER-Diagramm. Nutzerbezogene Daten sind gelb markiert.

Diese Trennung bedeutet, dass für das Erstellen eines funktionsfähigen Datenbestandes für das Programm einzig die in Abb. 40 rot markierten Tabellen zu beachten sind. Gelb markierte Objekte liegen alleine in der Datenhoheit des Endanwenders. Da dort der Einsatz einer Datenbank nicht vorgesehen ist (siehe hierzu auch Kapitel 4.1.5) können diese in der weitergehenden Betrachtung außer Acht gelassen werden.

Ist das konzeptuelle Schema erstellt, so muss dieses auf ein logisches Schema abgebildet werden. Für diesen Transformationsschritt existieren Abbildungsregeln, die sich mehr oder weniger mechanisch anwenden lassen. Beispiele gibt Loos in

seinen Publikationen von 1992 und 1993. Auch diverse CASE-Programme bauen auf dieser Tatsache auf (z.B. S-Designor, siehe ANONYMUS 1995).

Allerdings bestehen für den Entwickler sehr wohl Entscheidungsfreiräume und ~notwendigkeiten (LOCKEMANN und RADERMACHER, 1990). Dies ergibt sich daraus, dass die Möglichkeiten der Abbildung nicht eindeutig sind. Außerdem sind die Eigenheiten der Zieldatenbank zu berücksichtigen und schließlich können auch Leistungsgesichtspunkte eine Rolle spielen (SHASHA, 1992).

Im vorliegenden Fall ist das Erstellen wegen der Einfachheit des zu berücksichtigenden ER-Gefüges (Abb. 40, rot hinterlegter Teil) unkompliziert.

4.3 Informationsfluss

Als letztes Element der Anforderungsphase soll der Informationsfluss aus Anwendersicht dargelegt werden. Entsprechend der Aufgabenstellung müssen Daten des zur Befahrung vorgesehenen Bodens und Daten der für den Einsatz geplanten Maschine an das Kalkulationsprogramm übergeben werden. Daraus wird der limitierende Grenzwassergehalt während des Maschineneinsatzes als Antwortgröße errechnet. Die für die Praxis hilfreiche und klare Trennung der Informationsobjekte „Boden“ und „Maschine“, entsprechend der Waldbesitzer- und Maschineneigentümerseite, ist in Abb. 41 gut erkennbar.

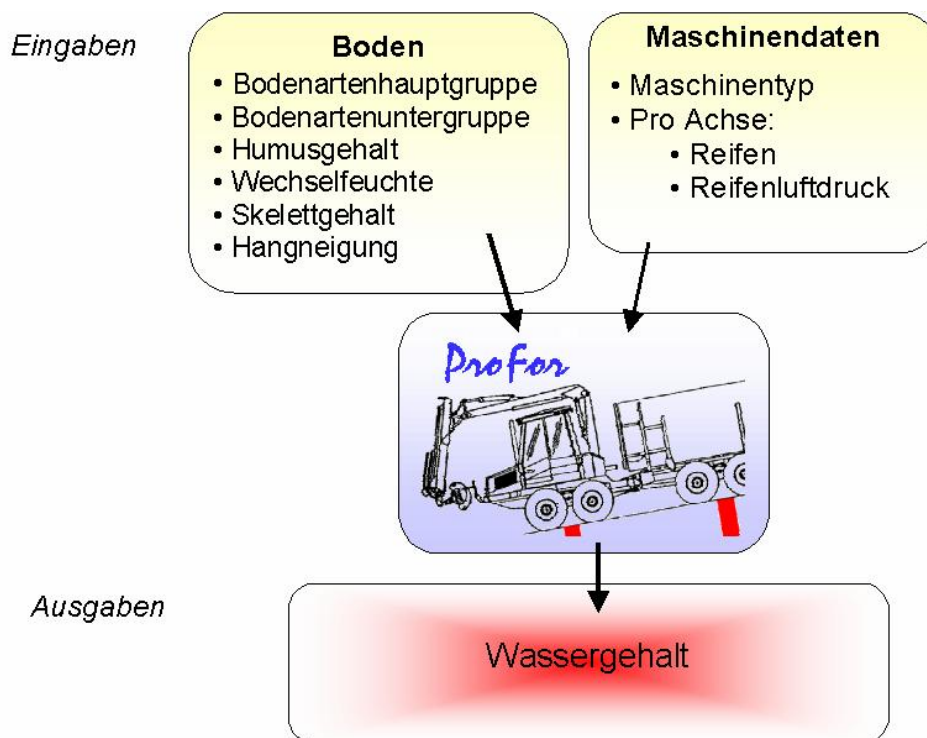


Abb. 41: Informationsfluss aus Anwendersicht, „ProFor“ ist der Name des Kalkulationsprogramms

4.4 Umsetzung: Entwurf, Implementierung, Test

Die klassischen Elemente der Softwareentwicklung „Entwurf“, „Implementierung“ und „Test“ lassen sich mehr oder weniger ausgeprägt bei jeder Software-Entwicklungsphilosophie finden (vergleiche PAGEL und SIX, 1994). Für die hier gewählte ergebnisorientierte Darstellung des Projektes sollen sie aber nicht mit all

deren Einzelheiten, wie z.B. Grob- und Feinentwurf, verwendete Instrumente, Dialogdesign oder Testmethoden (siehe hierzu z.B. MYERS, 1991) weiter beschrieben werden, obwohl diese natürlich während der Entwicklung durchlaufen wurden. Viel wichtiger sind einige Resultate, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

4.4.1 Programmiersprache

Um die in der Anforderungsliste geforderte Plattformunabhängigkeit zu erlangen, wurde als Programmiersprache „Java“ gewählt. Diese Flexibilität wird in Java dadurch erreicht, dass aus dem Java-Quellcode mit Hilfe eines Compilers ein Bytecode in einem architekturunabhängigen Objektdateiformat erzeugt wird und kein direkter Maschinencode. Um nun das Java-Programm auszuführen, ist ein Java-Interpreter, eine Javalauftzeitumgebung, englisch „java runtime environment“, JRE nötig. Für nahezu jedes gängige Betriebssystem gibt es kostenfrei die nötige Laufzeitumgebung, die auf jeder dieser Plattformen zum Ablauf des Programmes den Byte-Code abarbeitet (siehe hierzu z.B. KRAMER, 1996). Die aufgezeigte Struktur ist in Abb. 42 skizziert.

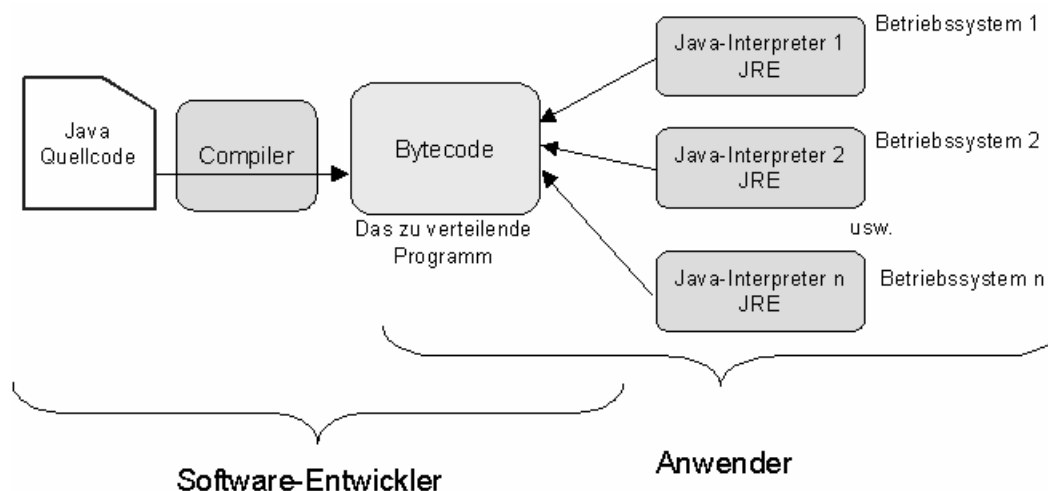


Abb. 42: Prinzip der interpretierten Programmiersprache Java

Der alternativ denkbare Einsatz plattformunabhängiger Klassenbibliotheken in Verbindung mit „klassischen“ Programmiersprachen wurde verworfen: Die Flexibilität in Bezug auf die Wahl des Betriebssystems ist längst nicht so hoch wie bei Java. Zudem können dem Endanwender zusätzliche Kosten für den Erwerb der nötigen Laufzeitbibliotheken entstehen.

Java bringt als moderne Programmiersprache zusätzlich einige positive „Charaktereigenschaften“ mit, welche die Wahl für diese Sprache unterstützt haben. Sun Microsystems – die Entwicklerfirma der Sprache – sagt über Java (Sun, o.J.):

"Java: A simple, object-oriented, network-savvy, interpreted, robust, secure, architecture neutral, portable, high-performance, multithreaded, dynamic language."¹³

¹³ Java: Eine einfache, objektorientierte, netzwerkorientierte, interpretierte, robuste, sichere, plattformunabhängige, portable, hoch-performante, parallelisierbare (multithreaded), dynamische Sprache.

4.4.2 Datenzugriff

Aus der Aufgabenstellung wird ersichtlich, dass zur Datenverwaltung eine Datenbank sinnvoll ist. Andererseits ist aus der Anforderungsliste (siehe 4.1) zu entnehmen, dass es gilt, der Anwenderseite vermeidbare Kosten zu ersparen und zusätzlich auch ein hohes Maß an Nutzerfreundlichkeit und Wartbarkeit zu erreichen.

Deshalb wurde die Datenbank komplett vom Endanwender fern gehalten und die Daten in Form von „flachen Dateien“¹⁴ verteilt. Dies hat folgende Vorteile:

- Kosten auf Anwenderseite für Datenbanken oder Datenbanken-Treiber fallen nicht an.
- Es entsteht überhaupt kein Aufwand, um auf Nutzerseite Datenbanken und / oder Datenbanken-Treiber (z.B. ODBC-Treiber¹⁵) für den Betrieb der Software zu installieren, zu konfigurieren oder zu warten.
Gerade dieser Punkt ist von unschätzbarem hohem Wert. Dies zeigte sich, als in der Phase von Version 1.0 auf Kundenseite das komplette Informationssystem installiert wurde und eine Konfiguration der Datenbank auch auf Kundenseite vorgenommen wurde, was einen erheblichen Aufwand bedeutete.
- Ein direkter Zugriff auf die binär kodierten Daten wird einem Endanwender, der die Daten manipulieren will, überaus erschwert.
- Die absolute Plattformunabhängigkeit des Berechnungsprogramms „ProFor“ wird von gegebenenfalls fehlenden Treibern für bestimmte Betriebssysteme nicht eingeschränkt.

Bei diesem Konzept ist die Datenbank einzig an der Daten pflegenden Stelle zu installieren. Zum Generieren der flachen Dateien für die Endanwender wird zur Extraktion und zur binären Kodierung ein Filterprogramm eingesetzt.

Der Kommunikation zwischen dem ebenfalls in Java geschriebenen Filterprogramm und der SQL-Datenbank erfolgt über JDBC-Treiber¹⁶. Von den vier zur Auswahl stehenden JDBC-Treibertypen (siehe SUN JDBC) wurde Typ 1, die JDBC-ODBC-Bridge eingesetzt (siehe SUN JDBC-ODBC). Damit ist ein problemloser Zugriff auf alle SQL-Datenbanken denkbar, für die ODBC-Treiber existieren. Derzeit wird für diesen Zweck das Produkt „Microsoft© Access97“ eingesetzt, eine weit verbreitete Desktop-Datenbank. In Abb. 43 ist die beschriebene Aufteilung zu erkennen.

4.4.3 Gesamtstruktur des Informationssystems

Neben dem Datenzugriff sind vom Hauptprogramm natürlich weitere Operationen zu erledigen. Außer der eigentlichen Hauptaufgabe, der Berechnung des Grenzwassergehaltes, gehören dazu das Verwalten der vom Nutzer selbst angelegten Reifen- und Maschinendaten, der Verschnitt dieser Daten mit den Hauptdaten, das Aktualisieren von Daten- und Programmdateien und auch das Verwalten der gespeicherten Berechnungen. All diese Aktivitäten sind zusammen mit den dazu gehörenden Daten- bzw. Informationsströmen sowie Datenbank- und Dateidaten in Abb. 43 dargestellt.

¹⁴ Der wesentliche Punkt sogenannter „flachen Dateien“ (engl. „flat files“) ist hier, dass sie keine Metadaten enthalten. Das in der Regel selbst definierte Format speichert nur die Daten. Dies steht im Gegensatz zum Beispiel zu Datenbanken, die darüber hinaus auch Informationen zur Struktur der Daten, Datentypen, Relationen usw. enthalten.

¹⁵ ODBC englische Abkürzung für Open DataBase Connectivity

¹⁶ JDBC englische Abkürzung für Java DataBase Connectivity

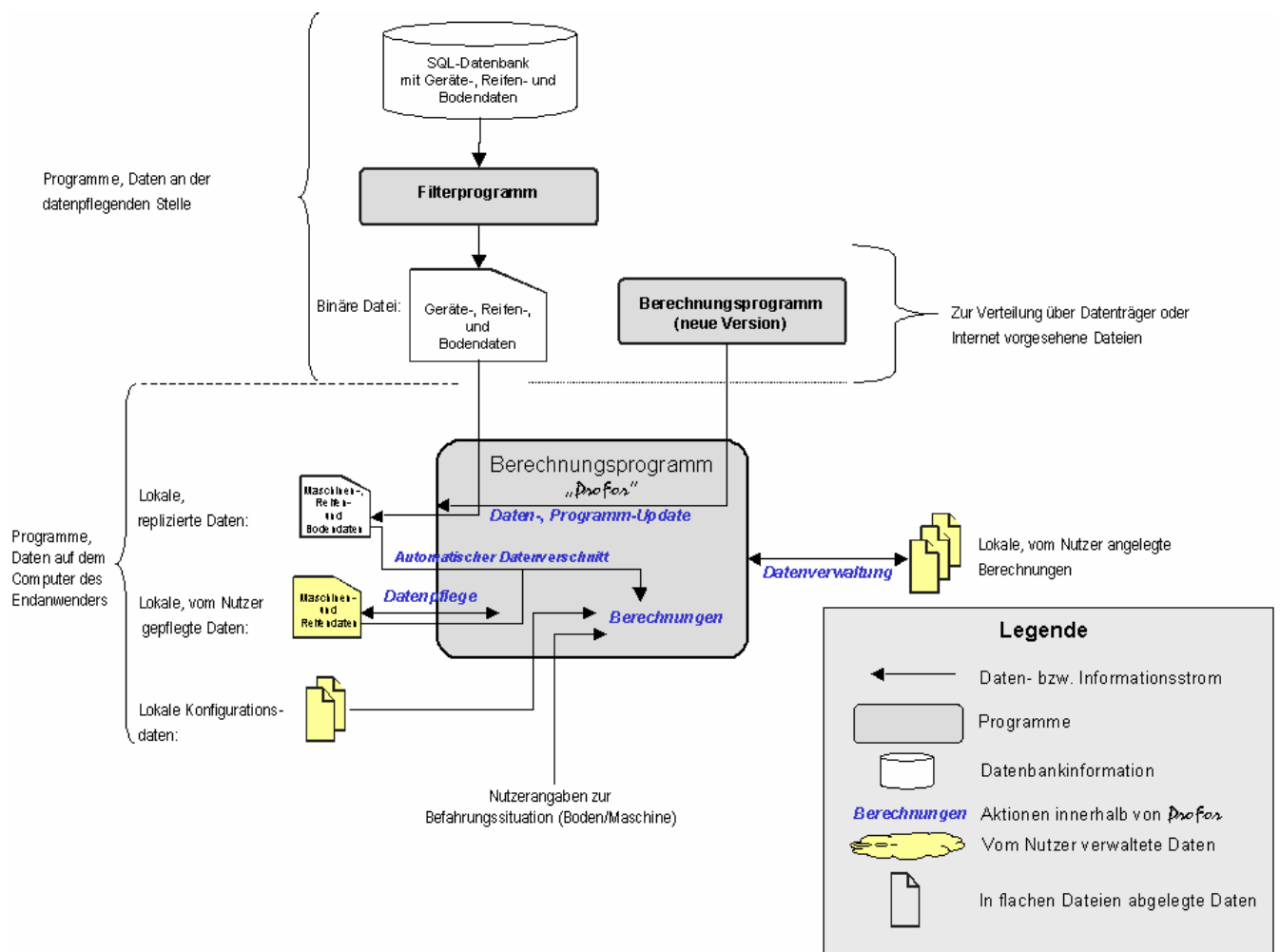


Abb. 43: Gesamtstruktur des Informationssystems:
Programme, Daten in Datenbanken und Dateien sowie Daten- bzw. Informationsströme

4.5 Dialoggestaltung

Die Zuordnung von Informationsblöcken zu Bildschirm-Masken, das Festlegen der Dialogtechnik und die visuelle Darstellung der Masken und Menüs sind wichtige Elemente der Dialoggestaltung. Allgemeine Regeln, die es einzuhalten gilt, sind bereits in Kapitel 4.1.2.1 erwähnt. An dieser Stelle sollen exemplarisch an den beiden wichtigsten Eingabefenstern ergebnisbezogen einige Überlegungen zur Dialoggestaltung aufgezeigt werden.

Entsprechend dem Informationsfluss (siehe Abb. 41) hat es der Anwender bei der Ermittlung einer Befahrungssituation mit drei Informationsblöcken zu tun: Boden- und Maschinendaten auf der Eingabeseite, sowie dem Kalkulationsergebnis auf der Ausgabeseite. Korrespondierend hierzu existieren drei Fenster, von denen das Ergebnisfenster nahezu interaktionsfrei ist und deshalb hier nicht weiter erläutert wird.

4.5.1 Eingabemaske „Maschinendaten“

Um eine aufgabenbezogene Benutzerführung zu erreichen, ist eine gezielte Informationsbereitstellung nötig. Dazu wird ein dynamischer, einzelfallabhängiger Fensteraufbau genutzt. Je nach gewähltem Maschinentyp (in Abb. 44 sind dies die

fiktiven Typen „300L“, „400L“, „500L“) wird der Fensteraufbau an die Zahl der Fahrzeugachsen angepasst (Zwei-, Drei- und Vierachser, zu beachten ist in Abb. 44 die blaue Markierung). Je nach dem, ob an der Maschine der Einsatz von Bogiebändern möglich ist, wird das Ankreuzfeld „Bogieketten“ deaktiviert und zusätzlich grau hinterlegt (Abb. 44 rote Markierung).

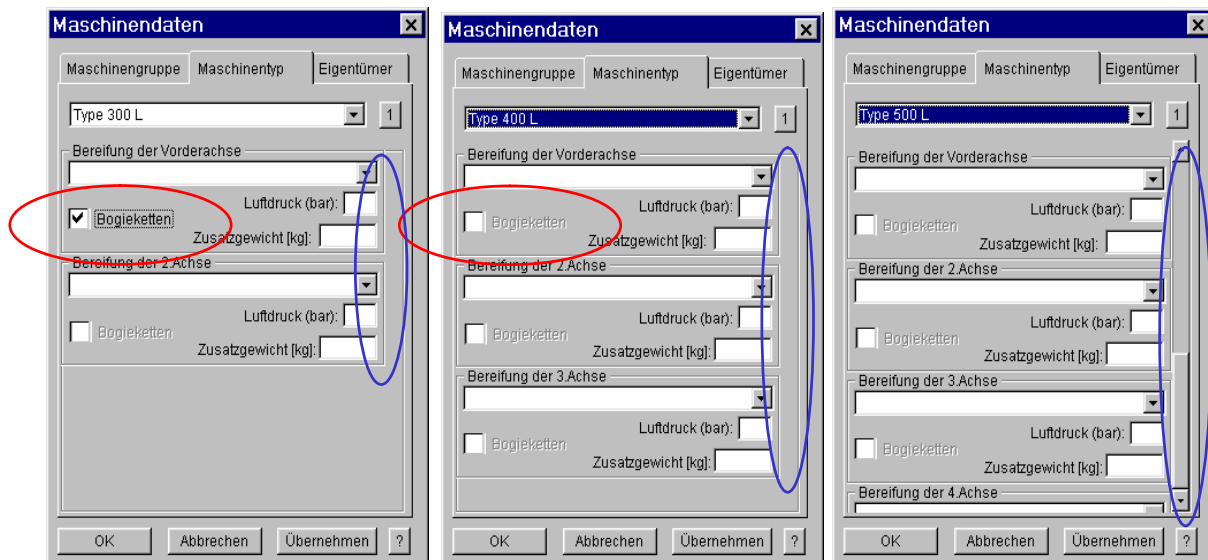


Abb. 44: Dynamische Fenstergestaltung: Beispiel: Anwendbarkeit von Bogiebändern (rot) und Maschinen mit unterschiedlicher Zahl an Achsen (blau)

Beim Eingeben der Information zum Maschinentyp in der bereits vorgestellten Maske ist zunächst der Maschinentyp (also etwa „300L“, ein zweiachsiges Gerät) auszuwählen, dann kann für die Vorderachse der dort genutzte Reifen und sein Luftdruck eingegeben werden. Anschließend selbiges für die Hinterachse. Folgt der Nutzer diesem logischen Eingabepfad, so ergibt sich die in Abb. 45 blau markierte Eingaberichtung. In roter Farbe ist der bei Mausbedienung sich ergebende idealisierte Bewegungsverlauf angegeben. Evident ist nun, dass der Fensteraufbau bewusst so gestaltet wurde, um den Leseablauf für den Nutzer identisch mit der Eingaberichtung und ebenso zur zu vollziehenden Bewegung des Mauszeigers zu machen.

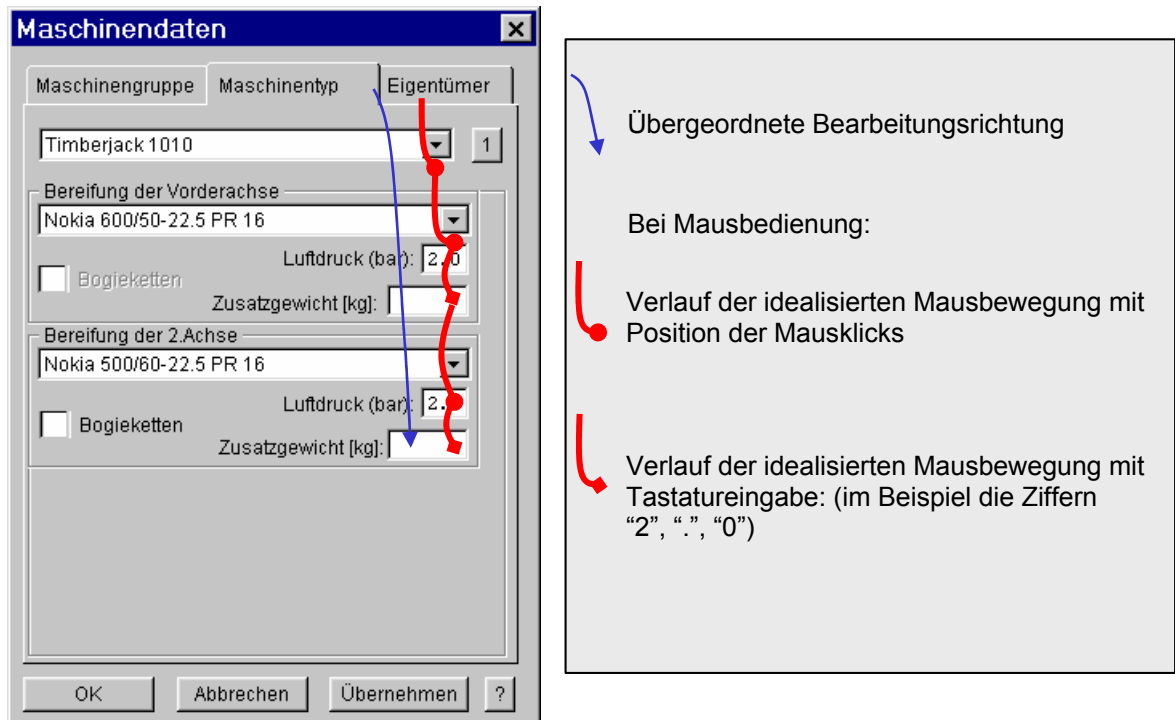


Abb. 45: Bearbeitungsrichtung bei Festlegung der Maschinenparameter

4.5.2 Eingabemaske „Boden“

Eine äußerst strenge Nutzerführung wird im Registerfeld „Boden“ des gleichnamigen Dialogfensters umgesetzt. Das zunächst nur eine einzige Auswahlmöglichkeit („Bodenartenhauptgruppe“) bietende Fenster, lässt eine Berechnung erst zu, wenn alle Bodencharakteristika komplett eingegeben sind. Damit wird eine versehentliche Berechnung eines Grenzwassergehaltes für unvollständig beschriebene Befahrungssituationen ausgeschlossen. Zu erkennen ist dies in Abb. 46, wo die Eingabe der Bodendaten noch nicht abgeschlossen ist und in Abb. 47, wo sämtliche Eingaben erledigt sind, und die die Berechnung auslösenden Knöpfe „OK“ bzw. „Übernehmen“ jetzt aktivierbar sind (jeweils mit rotem Oval markiert). Um Fehleingaben weiter zu minimieren wird das Dialogfenster schrittweise mit Abschluss

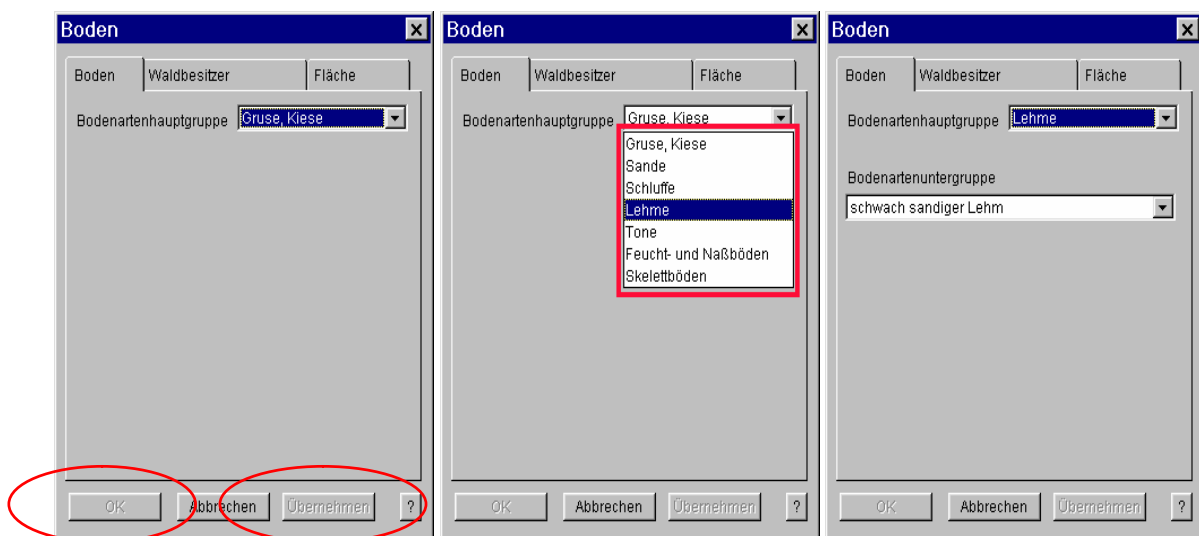


Abb. 46: Nutzerführung in der Eingabemaske „Boden“

einer Eingabe um je ein weiteres Element erweitert. Dazu muss der Nutzer aktiv aus der in Abb. 46 mit einem roten Rechteck markierten Auswahlliste seine zum Einsatzfall passende Bodenarten*haupt*gruppe wählen, im Beispiel „Lehme“. Erst dann erscheint die dazugehörige Bodenarten*unter*gruppe (hier diverse Lehmtypen). Das Einhalten der sich dadurch ergebenden und in Abb. 47 mit Nummern angegebenen Sequenz wird also zur Vermeidung von Fehleingaben ganz bewusst erzwungen. Dennoch bleibt, wie im Dialogfenster „Maschinendaten“, die Bearbeitungs-, Lese und Mausebewegungsrichtung einfach und klar (siehe rote, bzw. blaue Linien in Abb. 47).

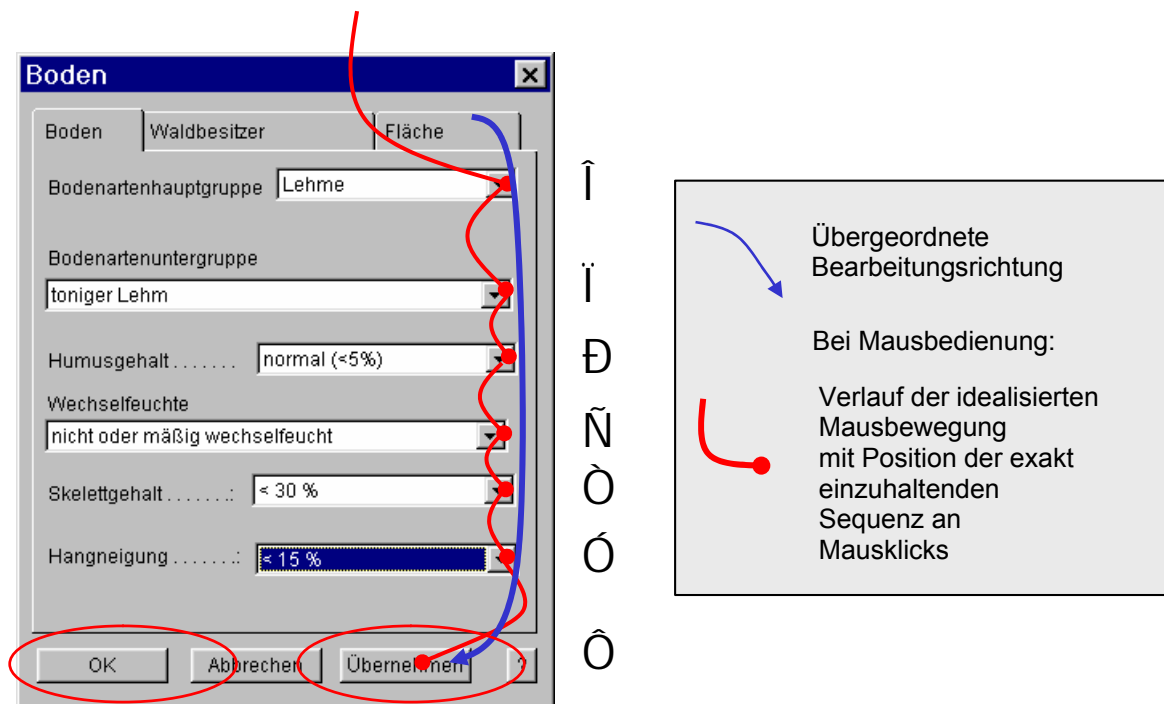


Abb. 47: Dialogfenster "Boden", Dialogelemente

4.6 Entwicklungsgeschichte

Ein kurzer, stichwortartiger Überblick der Entwicklungsgeschichte soll die Vorstellung des Informationssystems abschließen. Ergänzend soll auf Anlage 5 verwiesen werden, wo sich das Handbuch der aktuellen Version 2.1.1 befindet.

1.0 [Dezember 1998]
Urversion erstellt.

1.10 [September 1999]

- Ergänzen um ein „Setup-Programm“, welches das Programm von einem Datenträger auf einem Zielrechner komplett mit Icon und eigener Programmgruppe installiert, so dass auch unerfahrene Computernutzer den Installationsvorgang leicht bewältigen können.
- Ergänzen der vorhandenen „Install-over-the WEB“ Funktionalität um die Möglichkeit auch von Datenträger (CD, Floppy) eine Aktualisierung des Programms und / oder des Datenbestandes vorzunehmen.
- Ergänzung der Wassergehaltsberechnung um den Einflussfaktor „Skelettanteil des Bodens“.

- Änderung des Formates, wie Berechnungen abgespeichert werden, und zwar so, dass alte Berechnungen nicht erneut gerechnet, sondern nur angezeigt werden.

1.21 [November 1999]

- Erweiterung des Programms um die Möglichkeit, dass der Nutzer auch im Berechnungsprogramm (und nicht im Datenfilterprogramm) eigene Daten zu Geräten, Reifen und Reifenaufstandsflächen parallel zum existierenden Datenstamm anlegt und pflegt. Realisiert werden das Neuanlegen, Ändern und Löschen von Datensätzen.

1.30 [März 2000]

- Berechnung nutzt nun den Impaktwert (anstelle des Bodendruckes). Die Programmgestaltung wurde entsprechend angepasst.
- Grenzen für die Berechnung der Impaktwerte bereits bei der Selektion der Reifen eingefügt.
- Handbuch "Hinweise zum Installieren und Bedienen ..." für Version 1.30 geschrieben.

1.3.1 [April 2000]

- Zusätzlichen Schalter zum Löschen von Feldern eingefügt (z.B. bei den Angaben zum Waldbesitzer, ...).

1.4.0 [September 2000]

- Berechnungsformel für den Impaktwert geändert.
- Reihenfolge der Angaben zum Boden getauscht: zuerst die Standorteinheit, dann die Geologie
- Zusätzliche Einflussfaktoren hinzugefügt, z.B. Humusgehalt, Podsolierung, Wechselfeuchte, ...
- Option zum dauerhaften Speichern der Fensterposition(en) realisiert.
- Setuproutine überarbeitet.
- Auf PowerJ Version 3.0 umgestellt.
- Handbuch "Hinweise zum Installieren und Bedienen ..." für Version 1.40 aktualisiert.
- Datenbestand um 10 Geräte erweitert.

1.4.1 [Oktober 2000]

- Begriff "Impaktfaktor" durch "Impaktwert" ersetzt.
- Fehlverhalten bei der Dateneingabe mittels "workaround" korrigiert.

Anmerkung: Das Fehlverhalten tritt durch Verwendung der neuen PowerJ Version 3.0 auf. Bei Einsatz der alten PowerJ Version 2.5 werden die Ebenen der Dateneingabe korrekt weitergeschaltet.

2.0 [Juli 2001]

- Änderung des Namens auf "ProFor", um falsche Assoziationen mit dem zuvor genutzten Begriff "Forstbefahrung" zu vermeiden.
- Umstellung der Entwicklungsumgebung auf PowerJ 3.6.

- Upgrade der zugrunde liegenden JRE auf Java (TM) 2 Runtime Environment, Standard Edition, v 1.3.1.
- Komplette Änderung der Datenbank, Bereich Boden:
 - neue DB-Struktur
 - neues Filterprogramm (nun Version 1.3)
 - neues Format in der Datei „forstdb.dat“

Für den Nutzer werden Bodendaten nun klassifiziert nach den Kriterien

- Bodenartenhauptgruppen,
 - Bodenartenuntergruppen,
 - Humusgehalt,
 - Wechselfeuchte,
 - Skelettgehalt und
 - Hangneigung.
- Intern wird ein kompakteres Datenformat genutzt, in dem nur noch die Eckwerte pro Empfindlichkeitsklasse gespeichert werden und ProFor die Zwischenwerte selbst errechnet.
 - Änderung der Kenngröße: neu kPa (anstelle von alt „Impaktwert“) unter Einsatz einer neuen Berechnungsformel.
 - Erweiterung der Optionen um den Punkt "Zusätzliche Achslasten", um Modifikationen an Geräten leichter nachbilden zu können.
 - Modifikationen im Bereich der Dateneingabe, flimmerfreie Wiedergabe der Registerseiten.
 - Herausnahme der Möglichkeit für den Endnutzer, eigene Bodendrucktabellen für Reifen zu verwalten.
 - Handbuch "Hinweise zum Installieren und Bedienen ..." für Version 2.0 aktualisiert.
 - Setup-Routine überarbeitet, interne Routinen basieren nun auf GkSetup Version 193, und nicht mehr auf Version 190.

2.0.1 [August 2001]

- Position der Fenster so verändert, dass auch auf einem Notebook (640x480) alle Dialogfenster sichtbar sind.
- Sybase-Hinweis zum Panel-Umschalten eingearbeitet, betrifft Dialog "Dateneingabe". Damit arbeitet diese Registerseite flimmerfrei.
- Gerätedatei um einen Forstspezialschlepper erweitert.

2.0.2 [Oktober 2001]

- Grenzen für den maximalen Reifendurchmesser von 1600mm auf 1650 mm erhöht, damit in der Evaluierung auch etwas größere Reifen mit abgedeckt werden (gilt nicht für die Alternativbereifung!).
- Einen weiteren Reifen in die Datenbank aufgenommen.

2.0.9 [November 2001]

- Internationalisierung von ProFor realisiert.
- Update Mechanismus so geändert, dass zukünftige, neue Sprach-Onlinedokumentationen in neuen, separaten Unterverzeichnissen abgelegt werden.
- Übersetzung des Programms: Englisch (noch OHNE Online-Dokumentation!).
- Info-Dialogfenster, um Angaben zum eigenen Rechner erweitert.

2.1.0 [Juni/Juli 2002]

- Übersetzung des Programms: Englisch (jetzt mit Online-Dokumentation), Italienisch (ohne Online-Dokumentation), Spanisch (ohne Online-Dokumentation).
- Begrenzung des Reifenluftdruckes auf Werte zwischen 0.6 und 5 bar.
- Default-Wert für den Reifenluftdruck mit einem fest voreingestellten Wert von 4.0 bar eingeführt.
- Programmverhalten beim Wechseln der Gerätewahl geändert: Beim Wechseln der Maschine werden u.U. zuvor für die ursprüngliche Maschine eingegebene Werte für Reifen, Luftdruck, Zusatzgewicht und Boogiebänder wieder zurückgesetzt. Ziel ist ähnlich wie im Bodenfenster eine strikte Zwangsführung des Nutzers, die Falscheingaben minimieren soll.
- Berechnung von alternativen Gerätekonfigurationen werden nur durchgeführt, wenn die Alternativseite ("2") geöffnet ist und außerdem dort die zuvor von der Hauptkonfiguration übernommenen Eintragungen (z.B. für Reifenwahl, Bogiebänder, Luftdruck, Zusatzgewicht) an mindestens einer Stelle gegenüber der Hauptseite ("1") geändert wurden.
- Gerätezusatzgewichte werden nun direkt im Maschinenfenster und nicht mehr im Fenster „Optionen“ eingegeben.
- Zusatzgewichte können nun an allen Achsen, auch in einer Alternativoption variierend angegeben werden.
- Die Gestaltung des Registerfeldes „Maschinentyp“ des Fensters „Maschinendaten“ wurde überarbeitet. Je nach gewähltem Gerätetyp werden nun nur noch exakt so viele Achsfelder angezeigt wie auch tatsächlich an der Maschine auftreten.
- Das Info-Dialogfenster wurde aktualisiert und ergänzt.
- Die Ergebnisse der Evaluierung sind eingebaut:
 - Wechselfeuchte nun immer wählbar
 - Sonderbehandlung der humosen, wechselfeuchten Standorte
- Weitere ergänzende Informationen werden ausgegeben:
 - Kettenfahrzeuge -> Hinweis auf mögliche drohende Wurzelbeschädigungen.
 - Warnhinweis bei sehr plastischen Böden.
 - Zusätzlicher Hinweis bei humosen, wechselfeuchten Böden (Zweischichtböden).
- Umstellung der Entwicklungsumgebung auf PowerJ 4.1.
- Der Datenumfang im Bereich der Maschinendaten wurde deutlich erweitert (v.a. Forwarder, Schlepper).
- Umstellung der WWW-Adresse für Updates über das Internet.
- Datenfilterprogramm auf PowerJ4.1 umgestellt, Option zur freien Namenswahl der Quelldatenbank realisiert. Das Datenfilterprogramm trägt nun die Versionsnummer 1.5.

2.1.1 [August 2002]

- Übersetzung des Programms: Farsi (ohne Online-Dokumentation).

5 Beurteilung des Informationssystems

Bevor ein neues System, wie das hier vorgestellte „ProFor“, unter Realbedingungen eingesetzt wird, sollte es zunächst umfangreich getestet werden. Nur so kann eine umfassende Beurteilung vorgenommen werden.

Die Leistungen des Informationssystems können am ehesten beurteilt werden, wenn es aus unterschiedlichen Perspektiven beleuchtet wird. Deshalb soll einer zunächst rein inhaltlichen Beurteilung, darunter ein umfangreicher Einsatz unter praxisnahen Bedingungen, eine Darstellung aus Sicht der unterschiedlichen, möglichen Nutzergruppen folgen. Abgeschlossen wird die Betrachtung mit Aspekten, welche die Praktikabilität des Systems betreffen.

5.1 Inhaltliche Aspekte

In der inhaltlichen Prüfung gilt es abzuklären, ob die vom Informationssystem getroffenen Aussagen in allen Fällen inhaltlich korrekt sind. Dies heißt, es ist zu prüfen, inwieweit die Einsatzempfehlungen durch „ProFor“ auch den angestrebten Zielen eines bodenschonenden Forstmaschineneinsatzes entsprechen.

5.1.1 Evaluierung unter praxisnahen Bedingungen

In Nordrhein-Westfalen wurden dazu an sieben verschiedenen Forstämtern auf unterschiedlichen Standorten Holzernte-Einsätze mit „ProFor“ begleitet. Insgesamt wurden 15 Maßnahmen zur Beurteilung herangezogen (siehe Evaluierungsbericht MATTHIES ET AL., 1999). In allen Fällen wurde dabei wie folgt vorgegangen:

Bei allen Maschineneinsätzen wurden folgende Größen registriert bzw. ermittelt:

- Die genaue **Konfiguration der Forstmaschine**, einschließlich Reifenwahl und Reifenfülldruck
- Die von einem erfahrenen Standortserkunder bestätigte Beschreibung der **Bodenparameter** der Einsatzfläche
- Aus diesen beiden Angaben wurde der **maximal tolerierbare Wassergehalt** (mtW) von „ProFor“ errechnet.

Alle Maschineneinsätze erfolgten OHNE Beachtung dieses Grenzwertes. Dadurch wurden bewusst auch Überschreitungen des Grenzwassergehaltes mit in das Beobachtungsprogramm aufgenommen. Während des Einsatzes wurde mittels FDR-Sonde der **tatsächliche Bodenwassergehalt** gemessen.

Nach Abschluss der Arbeiten wurde das Spurbild gutachtlich erfasst. In kritischen und strittigen Fällen wurden Bodenproben genommen, um den exakten Status der bodenphysikalischen Parameter zu ermitteln. In Einzelfällen waren Korrekturen der Grenzwassergehalte nötig. Diese wurden in die endgültige Fassung des Informationssystems eingearbeitet.

Einen Überblick aller evaluierten Einsätze VOR Anpassung der Grenzwerte zeigt Tabelle 9. Es ist erkennbar, dass in der Mehrzahl der Fälle das Prognoseverhalten von ProFor als perfekt bezeichnet werden kann. Es ist auch festzustellen, dass in einigen, wenigen Fällen der bewusst eingebaute Sicherheitspuffer im maximal tolerierbaren Bodenwassergehalt sehr konservativ, sprich sehr hoch, ausgelegt erscheint. Dies wurde in der Endfassung des Systems angepasst.

Tabelle 9: Übersicht der Evaluierungsflächen in NRW. Es bedeuten:

- ✓ die durch ProFor getroffene Prognose ist absolut korrekt
- ⓪ der in ProFor hinterlegte Prognosepuffer erscheint zu hoch
- mtW maximal tolerierbarer Wassergehalt, nach ProFor
- FoA Forstamt
- StoE Standorteinheit

FoA	StoE	Bodenart	Unterteilung	Wassergehalt während des Einsatzes [%]	mtW [%]	Abweichung [%]	Beurteilung
Bad Driburg	619	utL	Gasse 1	37 - 39	39	-2, 0	✓
		utL	Gasse 2	36 - 42	39	-3, +3	✓
	620	utL	Gasse 1	34 - 37	30	+4, +7	✓, ⓪
Bergisch Gladbach	58 a	sL	Gasse 1	26 - 36	37	-11, -1	✓
Hürtgenwald	379	uL	Gasse 1	37	25	+12	Effekt des Skelettanteiles u.U. unterschätzt
		uL	Gasse 2	25 - 30	37	-12, -7	✓
	406	uL, Skelettboden	Gasse 1		keine Begrenzung		✓
Kleve	54 b	uS (sU)	Gasse 1	27	16 (uS) 30(sU)	+11 -3	✓
		sU (uS)	Kuppe	30	30	0	✓
	109	sU (uS)	Hang	27 - 33	30	-3, +3	✓
		sU (uS)	Hangfuß	40	30	+10	✓
	126	IU (sU)	Gasse 1	22 - 25	25	-3, 0	✓, ⓪
Minden	3 b	sL, uL, L	Gasse 1 Punkt 1	35 - 38	33	+2, +5	✓
		sL, uL, L	Gasse 1 Punkt 2	35	41	+6	✓
	109 b	sL, IS	Gasse 1	14 - 15	37	-23, -22	✓
	128 a	IS	Gasse 1,3	12 - 15	16	-4, -1	✓
		uL	Gasse 2	18 - 27	16	+2, +11	✓, ⓪
Olsberg	461 c	uL	Gasse 1	16	45	-29	✓
			Gasse 2	19	45	-26	✓
	651 a	uL	Gasse 1	20 - 26	37	-17,-11	✓
Paderborn	140 a	uL	Gasse 1	30	34	-4	✓
			Gasse 1	32	34	-2	✓
		wechsel-feucht	Gasse 1	37	27	+10	✓
	141 a	uL	Gasse 1	36 - 40	29	+7, +11	✓, ⓪

Ein besonders interessanter Fall soll auch anhand von drei Abbildungen gezeigt werden.

Im Forstamt Kleve konnten aufgrund der morphologischen Gegebenheiten einer Rückegasse (Kuppe, Hang, Hangfuß) die Auswirkungen der Befahrung mit einem Timberjack 810B bei verschiedenen Wassergehalten beobachtet werden. Der Großteil der Fläche, etwa 80 Prozent, lag auf einer Kuppe, auf der die Bodenfeuchte zum Einsatzzeitpunkt exakt dem maximal tolerierbaren Wassergehalt entsprach (Abb. 48). Die Begutachtung konnte keine nachhaltige Bodenveränderung nachweisen. Das Spurbild und die mittlere Spurtiefe von < 5 cm entsprachen dem Idealbild eines vorsorgenden Maschineneinsatzes.



Abb. 48: Evaluierung im FoA Kleve. Der Bodenwassergehalt zum Befahrungszeitpunkt lag bei 30 %, was dem errechneten Grenzwassergehalt entspricht. Die mittlere Spurtiefe lag unter 5 cm. (Foto: Matthies)



Abb. 49: Im Bereich des Hanges lag der Bodenwassergehalt zum Befahrungszeitpunkt mit 33 % über dem errechneten Grenzwert von 30 %. Die Spurtiefe lag im Mittel zwischen 10 und 13 cm. Die Bodenveränderungen lagen an der Grenze zum nicht Akzeptablen. (Foto: Matthies)

In Abb. 49 ist der Hang zu erkennen, bei dem der aktuelle Wassergehalt auf 33 % anstieg. Die Spurausprägung ist als Grenzfall anzusehen, die mittlere Spurtiefe lag bei 10 bis 13 cm. Die bodenphysikalischen Veränderungen lagen im Grenzbereich zwischen akzeptabel und zu hoch. Die Überschreitung des errechneten Feuchtegrenzwertes um drei Prozentpunkte liegt im Bereich der eingebauten Sicherheitsmarge.



Abb. 50: Am Hangfuß lag der Bodenwassergehalt zum Befahrungszeitpunkt bei 40 %. Die Spurausprägung und die Bodenveränderungen waren inakzeptabel. (Foto: Matthies)

Am Hangfuß stieg die Bodenfeuchte auf Werte von 40 % an (siehe Abb. 50). Die Spurtiefe stieg auf Werte über 50 cm. Stellenweise war die Bodenfreiheit des Tragschleppers überschritten, das Bodenblech berührte dort den Boden. Das Spurbild war nun gänzlich inakzeptabel.

Insgesamt gesehen hat die Praxisevaluierung die inhaltliche Korrektheit der von ProFor getroffenen Aussagen bestätigt.

5.1.2 Überprüfung unter Laborbedingungen

Eine recht interessante Untersuchung zur Stabilität biogener Makroporen bei verschiedenen Wassergehalts- und Belastungsstufen erstellte SCHARDT (2003). Mittels CT-Auswertungen wurde die Verformung natürlicher Makroporen untersucht. Die eingestellten Wassergehalte lagen zwischen Ausroll- und Fließgrenze, die Druckbelastung wurde jener eines leeren bis voll beladenen Forwarders „Timberjack 810B“ nachempfunden.

Die beobachteten Porenraumveränderungen wurden exakt quantifiziert. Dies ermöglichte auch eine Bewertung der biologischen Bodenfunktion, wie etwa Drainage, Sauerstoffversorgung, Durchwurzelbarkeit, usw.

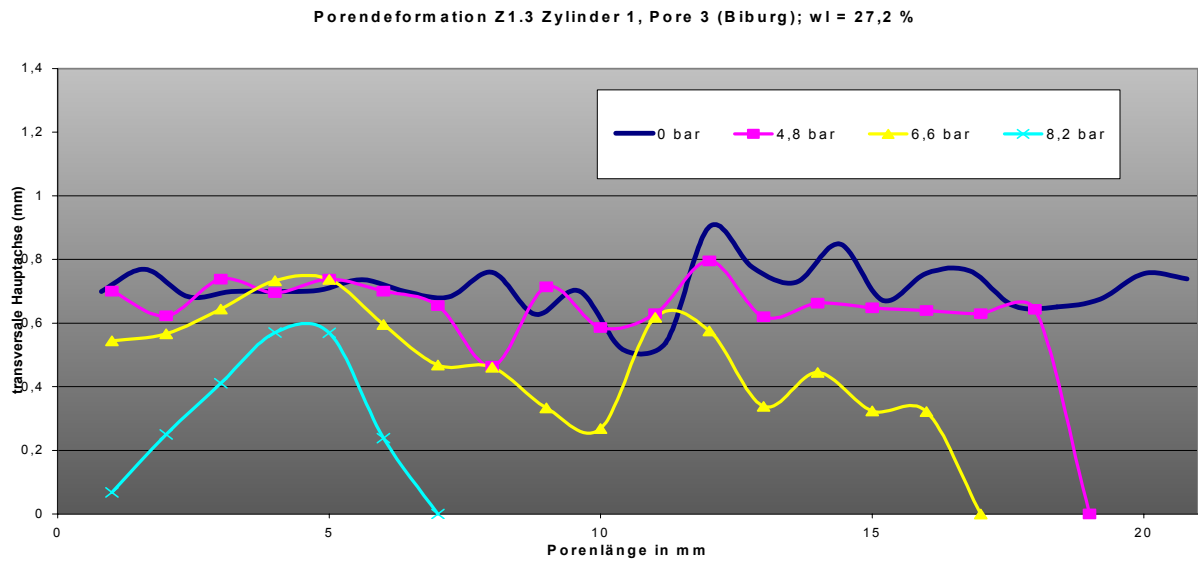


Abb. 51: Veränderung einer Bodenpore bei verschiedenen Belastungen, verändert nach SCHARDT (2003)

Von besonderem Interesse ist der von SCHARDT vorgenommene Vergleich mit den von ProFor errechneten Grenzwerten. Für den von ihm untersuchten Bodentyp, einem wechselfeuchten sandigem Lehm, stellte er den maximal tolerierbaren Wassergehalt, einer Befahrbarkeitsempfehlung aus seinen Porenuntersuchungen gegenüber. Unter Berücksichtigung der in ProFor eingebauten Sicherheitsmarge, decken sich seine Aussagen zur Befahrbarkeit mit der Einsatzempfehlung von ProFor. Zu beachten ist, dass dabei durchaus Veränderungen im Bodenkörper auftreten und toleriert werden, allerdings bleiben „die ökologischen Bodenfunktionen wie Drainage und Gasaustausch erhalten“, sofern die Schwelle während des Maschineneinsatzes nicht überschritten wird (siehe Abb. 51 und Tabelle 10).

Tabelle 10: Semiquantitative Bewertung der Veränderung der mittleren Porenquerschnittsflächen und Strukturdeformationen in Abhängigkeit von Belastung und Wassergehalt (Standort Scheyern), verändert nach SCHARDT, 2003.

		Druckbelastung				
		0 bar	4,8 bar	6,6 bar	8,2 bar	9,8 bar
Wassergehalt (Vol.-%)	17,6 (Ausrollgrenze)		≈	↘	↘	↘
	21,8 (mittlerer Wassergehalt)		↘	↓	↓	↓
	26 (Fließgrenze)		↓	↓	↓	↓

Legende:	Strukturdeformationsstadien:
k. A.	keine Angaben
≈	„stabil“, Fläche nicht signifikant reduziert
↘	„minimale Strukturdeformation“, Fläche um < 25 % reduziert
↓	„Strukturdeformation“, Fläche um 25 bis 50 % reduziert
↓	„Gesamtdeformation“, Fläche um > 50 % reduziert

5.2 Beurteilung aus der Nutzerperspektive

Da die Nutzerkreise verschiedene Interessen vertreten, soll getrennt für die Sichtweise

- des Waldbesitzers,
- des Maschineneinsatzleiters (bzw. Forstunternehmers) und
- des Naturschützers

eine Einwertung des Informationssystems erfolgen.

5.2.1 Waldbesitzer

Die Perspektive des Waldbesitzers wird hier in der Tradition eines nachhaltig wirtschaftenden Eigentümers angenommen, entsprechend den Werten und Vorgaben, wie sie in deutschen Gesetzeswerken (Bundeswaldgesetz, Gesetzeswerke der Länder, ...) verankert sind.

Das Augenmerk des wirtschaftenden Waldeigentümers wird dabei darauf liegen, dass einerseits

- seine Eingriffe dem Prinzip der Nachhaltigkeit folgen, und andererseits
- ihm auch die **Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Nutzung nicht eingeschränkt** werden.

Für beide Aspekte bietet das Informationssystem Hilfestellungen.

Durch das Informationssystem wird dem Waldbesitzer ein Instrument an die Hand gegeben, das es ihm ermöglicht, erstmals die Ressource Boden nachhaltig zu schützen. VOR jeder Maßnahme kann er den geplanten Einsatz beurteilen. Dabei wird die Entscheidung, wie er in einem Konfliktfall vorgeht, bewusst freigestellt. Es liegt an ihm

- die vorgesehene Gerätekonfiguration zu ändern,
- den Einsatzzeitpunkt zu verschieben,
- Sicherungsmaßnahmen zum Schutz des Bodens zu ergreifen, oder
- aber sich über die Einsatzempfehlung hinwegzusetzen.

Im dargelegten Fall des Forstamtes Kleve ließe sich die Situation aus Abb. 50 bereits vor Beginn des Einsatzes erkennen und, falls vom Waldbesitzer gewünscht, auch vermeiden. Selbst wenn ein Verschieben des Einsatzes und eine andere Maschinenkonfiguration sich nicht realisieren ließen, so könnte die relativ kleine Passage am Hangfuß dieser Rückegasse etwa durch eine ausreichend starke(!) Reisigmatte armiert werden.

Das Instrument des Informationssystems hilft dem Waldbesitzer sein Interesse an einem nachhaltigen Bodenschutz gegenüber fremden Unternehmern zu wahren. Dies wird in der Zeit, die sich durch Zunahme des „Stockverkaufes“ und vermehrten Unternehmereinsatz auszeichnet, immer bedeutender. Exemplarisch ist für diese Situation die nordrhein-westfälische Richtlinie für den Holzverkauf auf dem Stock (ANONYMUS, 2002) zu nennen, wo die Einhaltung der Einsatzbedingungen gemäß ProFor verbindlich festgeschrieben ist.

Auch für den zweiten Fall – Sicherung der forstlichen Bewirtschaftungsinteressen – bietet das Informationssystem für den Waldbesitzer Hilfestellung. Diese ist gerade unter dem Aspekt der zunehmenden Fremdbestimmung und Reglementierung durch Externe wichtig (siehe hierzu auch Kapitel 1). Bei Einhaltung der durch das Informationssystem vorgegebenen Grenzen, kann ein Waldbesitzer eine im Sinne des Bodenschutzes nachhaltige Bewirtschaftung seiner Flächen damit dokumentieren. Der in der breiten Bevölkerung zunehmend kritisch gesehene Einsatz von Großmaschinen bleibt vor diesem Hintergrund möglich; ein durch diese

Maschinen ermöglichter Kostenvorteil kann weiterhin genutzt werden, die Bewirtschaftung ist somit sichergestellt.

Als Nachteil, der gegen den Einsatz des Informationssystems spricht, mag vom Waldbesitzer angeführt werden, dass die Reglementierung für den Forstmaschineneinsatz erhöht wird, da zusätzliche Elemente (Bodenwassergehalt, Maschinenkonfiguration usw.) auf der Planungsseite zu berücksichtigen sind. Ebenso mag angeführt werden, dass nun neue Planungstätigkeiten zu berücksichtigen sind, wo bislang keine Reglementierung existierte.

5.2.2 Maschineneinsatzleiter, Forstunternehmer

Der Eigentümer von Forstmaschinen wird sein Interesse in starkem Maße darauf richten, dass der Einsatz seiner Maschinen ohne Behinderungen stattfinden kann. Daraus kann sich eine ablehnende wie auch zustimmende Position gegenüber dem Informationssystem ergeben. Wird vom Unternehmer die Einsatzgrenze einer Maschine nur durch die technische Befahrbarkeit eines Standortes limitiert gesehen, so stellen die Befahrungsgrenzen des Informationssystems eine deutliche Einschränkung des Handlungsspielraumes dar.

In einer Situation, wo mit dem System gearbeitet wird, kann sich Folgendes ergeben: Ungünstige Witterungsbedingungen können dazu führen, dass ein bereits begonnener Arbeitseinsatz unterbrochen werden muss. Die Wahrscheinlichkeit für einen derartig verursachten Stillstand der Maschine kann zwar durch gute, vorausschauende Planung (Erstellen eines Jahreseinsatzplanes gemäß der Bodenempfindlichkeit) minimiert werden. Unter mitteleuropäischen Klimabedingungen wird sich solch eine Situation aber nicht gänzlich ausschließen lassen. Ein Fehlen von Regeln, wie dieses Unterbrechungsrisiko zwischen Waldbesitzer und Unternehmer aufgeteilt wird, mag fälschlicherweise dem Informationssystem angelastet werden und so zu einer Ablehnung durch die Unternehmerseite führen. Derartige Regeln sind deshalb sicher nötig, es bleibt aber Aufgabe der genannten Vertragspartner sie zu erarbeiten.

Ähnlich wie beim Waldbesitzer wird das System unter dem Aspekt der Sicherung des Einsatzfeldes von Großmaschinen Zustimmung durch die Unternehmerseite erhalten. Darüber hinaus ist das Programm für ihn hilfreich, um die bestehende Maschinenkonfiguration hinsichtlich Bodenverträglichkeit zu beurteilen und gegebenenfalls günstiger zu adaptieren. Gleiches gilt, wenn es um die Vorbereitung und Beurteilung von Maschinenersatzinvestitionen geht.

Schließlich wird ein Unternehmer, der sich verpflichtet die Vorgaben des Informationssystems einzuhalten, dadurch gegenüber Konkurrenten im Vorteil sein. Hier erweisen sich die klaren, nachvollziehbaren und objektiven Regeln des Systems als günstig.

5.2.3 Naturschutz

Die Perspektive des Naturschützers ist eindeutig. Als transparentes Entscheidungsinstrument, das dazu beiträgt intensive Schädigungen vom Boden fernzuhalten, wird das Informationssystem von seiner Seite Unterstützung finden.

Extrempositionen, die grundsätzlich den Einsatz von Großmaschinen ablehnen, oder das Auftreten von Spurbildern auf den Rückegassen nicht tolerieren, werden nicht gestützt. Ebenso wenig kann das Informationssystem herangezogen werden, um jegliche Beeinträchtigung des Bodenkörpers zu verhindern. Veränderungen, etwa am Porenraum, werden von ProFor toleriert. Da aber die Schadenschwelle im System so

definiert ist, dass eine nachhaltige, negative ökologische Beeinflussung des Bodens ausgeschlossen wird, sollte ein vernünftig ausgelegter Naturschutz das System akzeptieren und unterstützen.

5.3 Praktikabilität von ProFor

Die Praxistauglichkeit des Systems soll abschließend anhand einiger, nutzergruppenunabhängig zu sehender Elemente dargelegt werden.

5.3.1 Messgröße Bodenwassergehalt

Als wichtige Beurteilungsgröße wird, wie dargelegt, der Bodenwassergehalt herangezogen. Dieser lässt sich mit folgenden Messverfahren ermitteln:

- Neutronensonde
- TDR-Sonde¹⁷, FDR-Sonde
- Ofentrocknung und Wägung einer Bodenprobe

Die ebenfalls den Wasserhaushalt charakterisierenden Größen „Bodenwasserpotential“ und „Wasserleitfähigkeit“ können mit Tensiometer bzw. CT, Infiltrimeter oder Kf-Apparatur ermittelt werden.

Für die Praktikabilität des von ProFor vorgegebenen Verfahrens ist es nun wichtig, eine Beurteilungsgröße zu haben, die sich sowohl präzise, schnell und einfach auch von Laien ermitteln lässt. Nach einer Zusammenstellung von MATTHIES (2002) über wichtige bodenphysikalische Parameter und deren Erfassung ist der Bodenwassergehalt die einzige, auch von ungeübtem Personal ermittelbare Größe, die entsprechende Bedeutung für das Informationssystem hat.

Die Einfachheit der Messung ist bereits bei einem Blick auf einen Messvorgang mit der FDR-Sonde erkennbar (Abb. 52).



Abb. 52: FDR-Sonde, links mit frei erkennbaren Sondenspitzen, rechts während einer Messung

¹⁷ TDR: Time Domain Reflectometry bzw. FDR: Frequency Domain Reflectometry: Das Messprinzip beruht darauf, dass die Dielektrizitätszahl von Wasser stark von jener des Mineralbodens abweicht. Bei der TDR-Sonde wird die Laufzeit einer elektromagnetischen Welle von Sondenschafft zu Sondenspitze ermittelt und dann daraus der volumetrische Bodenwassergehalt in Sekundenschnelle errechnet.

Dass einfach, schnell und verlässlich von jedermann der kritische Messwert – der Bodenwassergehalt – für die Beurteilung der Einsatzsituation ermittelt werden kann, ist ein ganz wesentlicher Erfolgsfaktor für eine leichte Umsetzbarkeit und hohe Akzeptanz des vorgestellten Systems in der Praxis.

Mit der Ofentrocknung steht zusätzlich ein weiteres Messverfahren zur Verfügung, das zwar lange dauert, aber in all jenen Situationen Bedeutung erlangen mag, wo die Beschaffung der TDR- bzw. FDR-Sonde zu kostspielig ist, wie etwa in Entwicklungsländern. Dieser Sachverhalt sollte unter diesen Umständen ebenfalls die Akzeptanz positiv beeinflussen.

5.3.2 Datenbasis

Zwei getrennte Informationsbereiche müssen vorliegen, um mit dem Informationssystem eine Einwertung der Befahrungssituation zu erhalten:

- Daten zur Maschine und bei Radmaschinen auch zu deren Bereifung
- Daten zum Boden (Bodenart, Humusgehalt, ...)

Während sich im Regelfall die Angaben zur vorgesehenen Maschine leicht ermitteln lassen, erscheint die Situation bei den Bodendaten schwieriger.

Doch durch die in allen Bundesländern verfügbaren Standorterkundungswerke liegt auch diese Information in den allermeisten Fällen vor. Damit profitiert ProFor von bereits verfügbarer Information. Die Anbindung an bestehende Informationsquellen erhöht die sofortige Einsetzbarkeit erheblich.

Doch auch in jenen Fällen, wo keine Standortserkundung vorliegt, ist das System einsetzbar. Die jedem Förster geläufige „Fingerprobe“ zur Ermittlung der Bodenart ist ausreichend, um zur gewünschten Information zu gelangen.

5.3.3 Direkthinweise

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass ProFor dem Anwender einfach handhabbare, zusätzliche Hinweise zur Einwertung der Einsatzsituation gibt.

Darunter fallen Anmerkungen zur Gefahr von Wurzelverletzungen durch Raupenfahrzeuge oder beim Einsatz von Bogiebändern, der Verweis auf Erosionsgefahr oder der Hinweis auf Böden, die sehr schnell die Fließgrenze erreichen, und ähnlichem. Für die Praxis stellen diese Hinweise wertvolle Direkthilfen für den bevorstehenden Einsatz dar.

6 Ausblick

Der jetzt realisierte Rechenweg kann anhand eines auf der Spitze stehenden Dreieckes dargestellt werden (Abb. 53). Aus zwei Vorgaben des Nutzers (Angaben zum Boden und zur Konfiguration der Maschine) wird eine Einsatzempfehlung (maximal tolerierbarer Wassergehalt) errechnet.

Damit ist die Richtung der Einsatzplanung des Instrumentes vorbestimmt. Aus den beiden Vorgaben wird eine Einsatzgrenze abgeleitet.

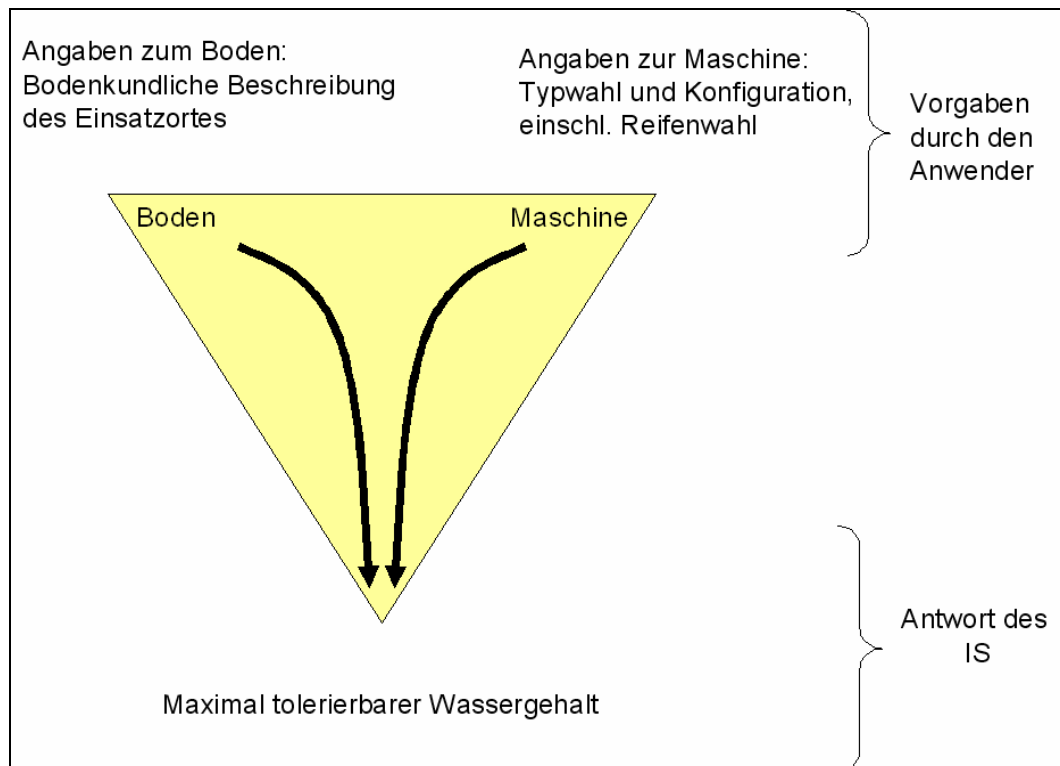


Abb. 53: Eingabe- und Ausgaberrichtung des existierenden Informationssystems

Bei Überschreitung des Grenzwassergehaltes ist der Nutzer allerdings auf sich alleine gestellt, um händisch Alternativkonfigurationen in der Maschinenwahl oder für den Einsatzort herauszufinden.

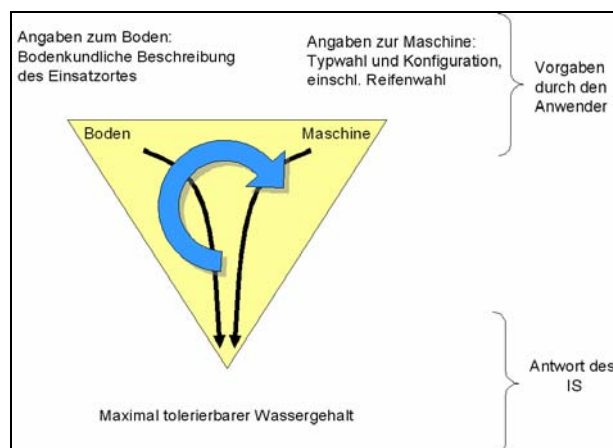


Abb. 54: Eine erste Erweiterung entsteht durch „Drehen“ des Dreieckes

Dies lässt sich in einer ersten Erweiterung umgehen, die zugleich auch weitere Berechnungsmöglichkeiten realisiert. Sie leitet sich durch eine geänderte Nutzereingabe ab, die durch Rotation des Dreieckes erreicht wird (siehe Abb. 54).

6.1 Erweiterung des Berechnungsweges

Bei Vorgabe des Standortes und des Wassergehaltes, der seinerseits die Bodentragfähigkeit bestimmt, lässt sich ermitteln welche Maschinen und in welcher Konfigurationen unter diesen Bedingungen arbeiten können (Abb. 55).

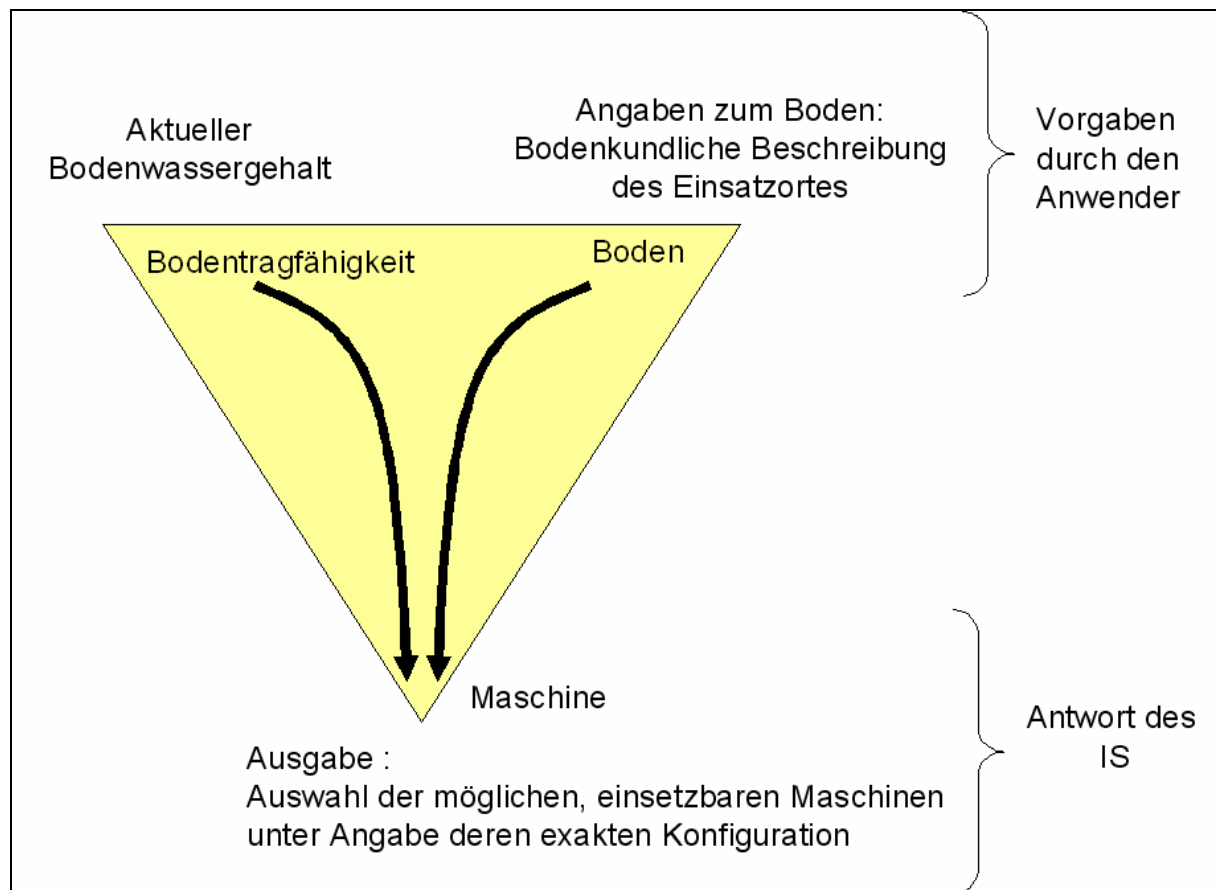


Abb. 55: Ein veränderter Berechnungspfad eröffnet neue Berechnungsperspektiven

Diese veränderte Berechnungsorientierung erlaubt dem Nutzer ein flexibleres Vorgehen bei der Einsatzplanung, da sich dadurch auch für eine vorgegebene Befahrungssituation die Maßnahmenmöglichkeiten unmittelbar ermitteln lassen.

Für Tragschlepper lässt sich über diesen Weg eine verringerte, für die aktuelle Bodensituation zutreffende und gerade noch tolerierbare Zuladung errechnen. Diese gegebenenfalls unter der technisch möglichen Maximalbelastung liegende Last, erweitert somit das Einsatzspektrum des teilbeladenen gegenüber dem vollbeladenen Forwarder.

6.2 Erweiterung der taktisch-operativen, sowie strategischen Einsatzmöglichkeiten

Der Einsatzbereich des Informationssystems lässt sich unter Einbeziehung des soeben dargelegten, erweiterten Rechenweges in zwei Richtungen entwickeln:

- Für den taktisch-operativen Bereich
- Für den strategisch orientierten Planungsbereich

Für beide Aufgabenkreise sollen mögliche Weiterentwicklungen kurz skizziert werden. Detailliertere Ausführungen sind bei NEUGEBAUER (2003) zu finden.

Im **taktisch-operativen Bereich** ist eine direkte Integration der Software in die Fahrzeugkabine (auf einen dortigen Bordcomputer) denkbar. Damit ergibt sich die Möglichkeit eine direkte Interaktion der Software mit einer elektronischen Reifendruckregelanlage zu realisieren. Bei Tragschleppern ist die Anbindung an eine elektronische Kranwaage denkbar.

Beides führt dazu, dass das Fahrzeug, bzw. der Forwarder in seiner Konfiguration hinsichtlich Reifenfülldruck bzw. Beladungsmenge optimal an die aktuelle Bodensituation angepasst werden kann. Das „Zeitfenster“ für einen Einsatz kann damit länger geöffnet bleiben. Die Integration des Informationssystems gibt außerdem dem Fahrzeugführer die Möglichkeit die Befahrungssituation unmittelbar zu beurteilen.

Im **strategisch orientierten Bereich** geht es darum, ProFor in seinen Fähigkeiten zu verbessern, die kurz- bis mittelfristige, regionale wie überregionale Einsatzplanung zu unterstützen. Hierzu wäre es notwendig, unter Berücksichtigung eine langjährigen Klimamittels, den **jahreszeitlichen Verlauf der Niederschläge** zu verwenden. In Kenntnis der in der Planungsregion vorliegenden Böden ist dann ein den Bodenschutz mit berücksichtigender Jahreseinsatzplan sehr leicht ableitbar. Hierin würden z.B. kritische Flächen bevorzugt in der trockenen Jahreszeit zur Bearbeitung vorgesehen, und ganzjährig ohne Probleme befahrbare Flächen würden als Reserveflächen bereitgehalten (siehe Abb. 56).

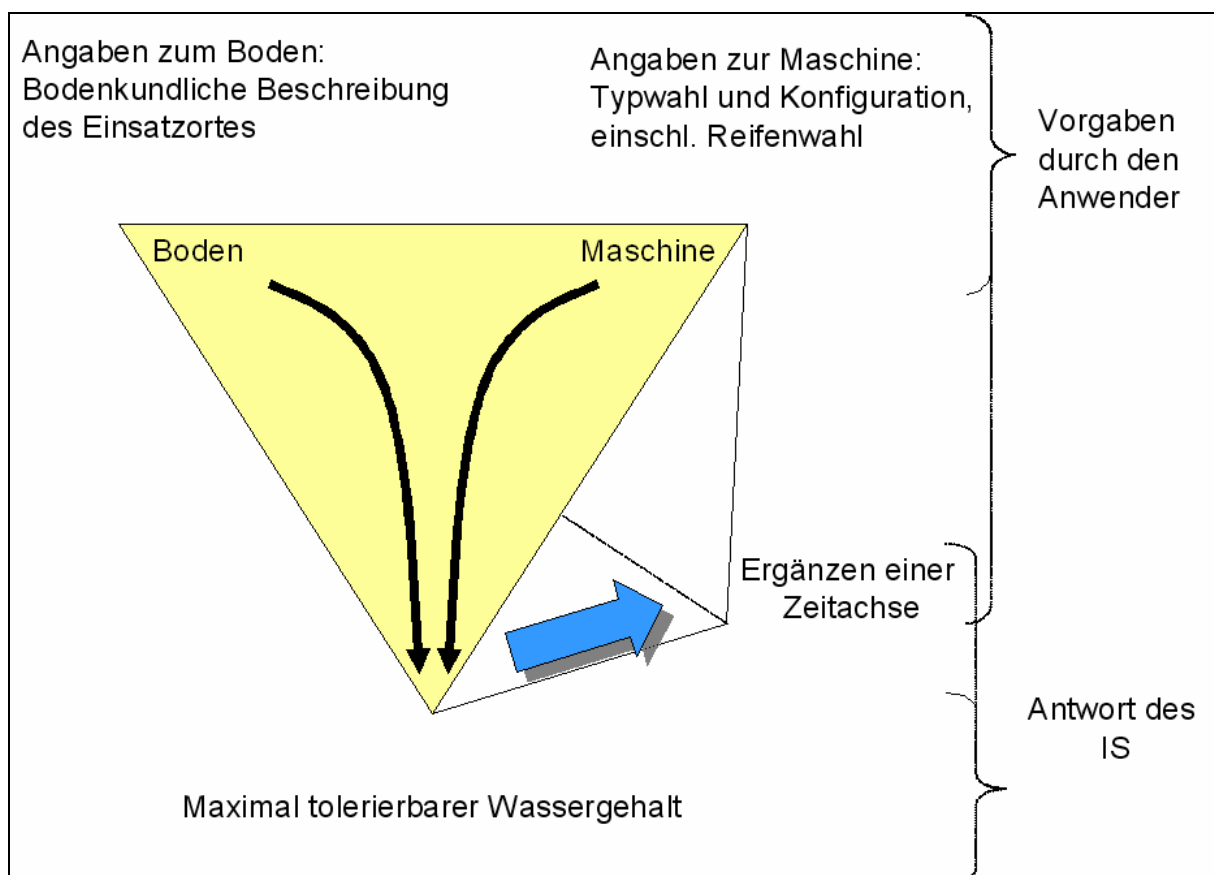


Abb. 56: ProFor, Erweiterung um eine Zeitachse

Die zurzeit noch nötige Messung der Bodenfeuchte lässt sich unter Einbeziehung von **Bodenwasserhaushaltsmodellen** ganz vermeiden. Durch geschickte Kombination dieser Modelle mit aktuellen, regionalen Niederschlagsdaten, die gegebenenfalls über verfügbare Waldklimastationen (siehe PREUHLER und KENNEL, 2001) kalibriert werden, sollte die gewünschte Genauigkeit in der Ableitung des Bodenwassergehaltes erzielt werden.

Bezieht man zudem die **Wetterprognosen** in die kurzfristige Planung mit ein, so ließen sich für den derzeit verfügbaren Prognosezeitraum von 3 bis 5 Tagen (Eintrittswahrscheinlichkeit > 80 %, bzw. > 50 %) Einsatzempfehlungen auf Basis der dann zu erwartenden Bodenfeuchte für die operative Planung ableiten. Auch hier sind wie beim Einbeziehen des Jahresganges **Aussagen zum zukünftigen Einsatzzeitrahmen** ableitbar.

Schließlich stellt eine **Direktanbindung an ein GIS** eine sinnvolle Erweiterung dar. Hinterlegte Bodendaten aus der Standorterkundung brauchen nicht mehr separat eingegeben werden; ein Verschneiden mit anderen wichtigen Informationen (Topografie, Bestandesdaten, ...) wird möglich. Aber auch der aktuelle oder der für die Zukunft prognostizierte Befahrungsstatus für verfügbare Maschinen lässt sich hierüber wie auf einem **Leitstand** überregional darstellen.

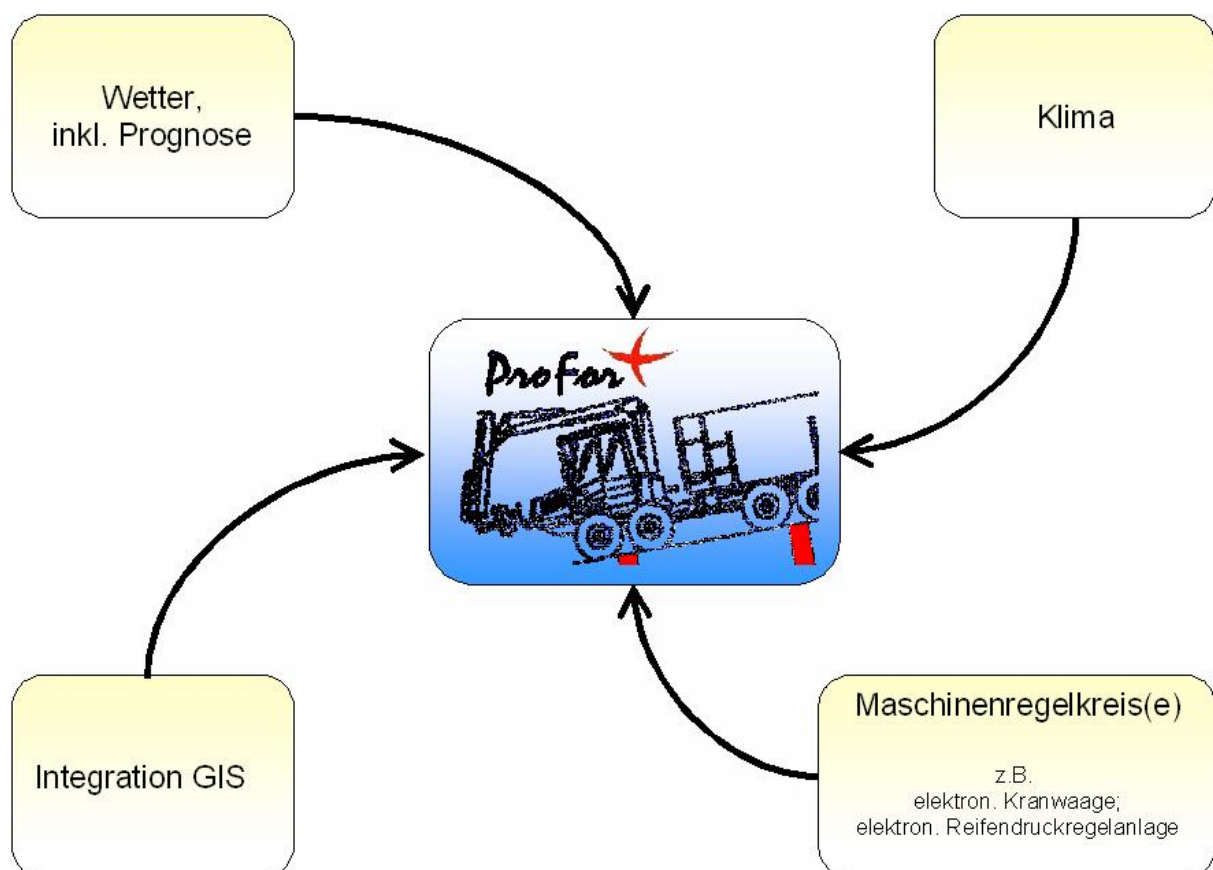


Abb. 57: Schematischer Überblick der denkbaren Erweiterungen von ProFor zu "ProFor+"

7 Zusammenfassung

In den vergangenen Jahrzehnten nahm in Mitteleuropa die Befahrungsintensität der Waldböden deutlich zu. Dies erhöht das Risiko für negative Strukturveränderungen im Boden dramatisch. Wenn überhaupt, dann ist eine Regeneration nur in äußerst langen Zeiträumen zu erwarten. Zudem wird von der Allgemeinheit eine auch mit dem Boden pfleglich umgehende Waldbewirtschaftung erwartet. Deshalb ist ein praxistaugliches Instrument, das hilft, solche Schäden zu vermeiden, nötiger denn je. Solch eine Planungshilfe wird in Form eines Informationssystems in der vorliegenden Arbeit entwickelt.

Dazu wird von den umfangreichen bodenphysikalischen Arbeiten am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik ausgegangen. Hier wurden Schwellenwerte zur ökologischen Beurteilung von Bodenstrukturveränderungen ermittelt. Um nun den kritischen, maximal tolerierbaren Wassergehalt für eine Belastung zu ermitteln, wurden umfangreichen Befahrungsversuche durchgeführt. Dazu befuhr ein Forwarder mit vorgegebenen, variierenden Lasten bei verschiedenen, exakt eingestellten Wassergehalten den zu untersuchenden Boden. Während der Befahrung traten dynamische wie statische Kräfte auf. Die Bodenproben wurden anschließend im Labor untersucht, um anhand der ökologischen Beurteilungskriterien den kritischen Feuchtegrenzwert für die aufgetretenen Belastungen zu ermitteln. Um für weitere Maschinen, auch bei unterschiedlicher Bereifung, Aussagen treffen zu können, lässt sich das Versuchsergebnis verallgemeinern. Hierfür ist eine Zuordnung der statischen Kräfte der Versuchsmaschine auf andere Maschinen nötig.

Dazu wurde in einer in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsserie mit forstüblichen Reifen Kontaktabdrücke auf einem harten Untergrund mit verschiedenen Fülldrücken und Lasten erstellt. Daraus ließ sich einerseits eine Berechnungsmethode zum Herleiten der Kontaktfläche ableiten. Andererseits wurde über ein Druckzonenmodell eine Methode zum Berechnen des mittleren, maximalen Reifenkontaktflächendruckes hergeleitet. Bezieht man die maschinenindividuelle Radlast in die Berechnung ein, ist damit für jede Forstmaschine ein statischer Bodendruck berechenbar.

Damit lagen nun alle Informationen vor, um ein universelles Prognosemodell zu entwickeln. In der programmtechnischen Realisierung wurden in einer Datenbank die Angaben zur Konfiguration von Forstmaschinen und üblichen Forstreifen abgelegt. Ebenso wurden die Bodendaten abgespeichert. Im Programm selbst wurde die Berechnungsmethode zum Ableiten des statischen Bodendruckes unter Forstreifen hinterlegt, sowie die nötigen bodenkundlichen Zuordnungsregeln. Damit kann das Informationssystem „ProFor“ aus Nutzerangaben zum Boden und aus der vorgesehenen Maschine für diesen Einsatz einen maximal tolerierbaren Bodenwassergehalt errechnen. Solange dieser Bodenfeuchtewert während der Durchführung der Arbeiten nicht überschritten wird, kann davon ausgegangen werden, dass keine bodenökologisch nachteilige Schädigung auftritt.

Die umfangreiche Evaluierung des Systems belegte die Korrektheit der getroffenen Aussagen, aber auch die Nutzerfreundlichkeit und Praktikabilität wurde bestätigt.

7.1 Abstract

Over the last decades in middle Europe the intensity and frequency of driving activities on forest soils intensified dramatically. This raises the risk for negative structural changes in the soil. If at all, regeneration can be expected only over rather long periods. More and more does the public expect from foresters soil caring management practises. Therefore the need for a practical tool that helps to prevent critical soil damages is bigger than ever. Such a tool is presented here as a computer based information system.

The extensive work, done at the chair for “forest work science and applied informatics” is the basis for this development. Here threshold values were defined, which determine critical ecological soil structural changes. In order to find the critical, maximum soil water content, where this threshold is not exceeded, driving-tests were conducted. With varying loads a forwarder was driving on forest soil patches which had different, preconfigured soil water contents. During these driving tests static as well as dynamic forces affected the soil. The critical, maximum soil water content could be determined, by investigating several ecological soil parameters, where the ecological soil structural threshold values were not exceeded. In order to generalise the results for use with other forest machinery respectively different tyre configurations the applied static forces were used to generate this link.

In order to quantify the static pressure, it was necessary to investigate the behaviour of forest tyres. The contact areas on hard surface of 15 typical forest tyres were investigated. During this test series inflation pressure and wheel load were varied. Based on this test a calculation method for the contact area, but also for the mean maximum contact pressure was developed. When including the wheel load with this contact pressure calculation it is possible to predict the static contact pressure for typical forest machines.

Thus all information for developing the programme was available. A database was used to store information about forest machines and tyres, but also about the soil characteristics. The calculation methods and the soil physical classification were coded into the programme. With user input about the soil and the designated machine, the programme will be able to calculate a maximum soil water content. As long as the actual soil moisture is below this critical value during a machine operation, no critical soil structural damages will occur.

The evaluation of the system proofed that the predictions were correct, but also the practicability and usability were found to be high.

8 Literatur

8.1 Artikel, Proceedings, Bücher, usw.

ABEELS, P. F. J. (1992): Das Lastwinkelmodell. Mündliche Mitteilung.

ABDALLA, A., M., HETTIARATCHI, D., R., P., REECE, A., R. (1969): Mechanics of root growth in granular media. J. Agric. Eng. Res., 14, S. 236 – 248. [zitiert nach WHALLEY et al.]

AGENDA 21 (1992): REPORT OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Rio de Janeiro, 3-14 June 1992, Annex II, AGENDA 21
Zu finden unter: <gopher://gopher.undp.org:70/00/unconfs/UNCED/English>

AGENDA 21-2 (1992): REPORT OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Rio de Janeiro, 3-14 June 1992, Annex III, NON-LEGALLY BINDING AUTHORITATIVE STATEMENT OF PRINCIPLES FOR A GLOBAL CONSENSUS ON THE MANAGEMENT, CONSERVATION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ALL TYPES OF FORESTS
Zu finden unter:
<gopher://gopher.undp.org/00/unconfs/UNCED/English/forestp%09%09%2B>

ANONYMUS (1995): S-Designor Reference Guide - Powerful Database Design Made Simple. Powersoft Corporation, Concord - USA 1995.

ANONYMUS (1997): TableCurve 3D. Automated surface fitting and equation discovery. Version 3.0. User's manual. SPSS Inc. , Chicago - USA 1997.

ANONYMUS (2002): Vorläufige Verkaufs- und Zahlungsbedingungen für Verkäufe von Holz "auf-dem-Stock" im Staatswald des Landes Nordrhein-Westfalen (VZV-FSZ 2000) durch die unteren Forstbehörden. RdErl. d. Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz v. 1.4.2002, Az. III-1 32-22-00.00

ARVIDSSON, JOHANN (1999): Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. Plant and Soil, 208, S. 9 – 19.

BACKHAUS, GISBERT (1993): Reifendruckverstellanlagen und ihr Nutzen beim Forstmaschineneinsatz. AFZ Nr. 15, S. 761 – 763.

BACKHAUS, GISBERT (1994): Reifendruck-Verstellanlagen - Konsequenzen für die Bereifung von Forstmaschinen bei verstellbarem Reifenluftdruck. Forst & Technik Nr. 12, S. 12 – 17.

BARLEY, K., P. (1963): Influence of soil strength on growth of roots. Soil Science, 96. S. 175 – 180. [zitiert nach Whalley et al.]

BEHRENDT, HEIDRUN, EWERS, HANS-JÜRGEN, HÜTTL, REINHARD FRANZ, JÄNICKE, MARTIN, PLAßMANN, EBERHARD, REHBINDER, ECHARD, SUKOPP, HERBERT

(2000) [DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN]: Umweltgutachten 2000: Schritte ins nächste Jahrtausend. Wiesbaden.

BERLI, MARKUS, KULLI, BEATRICE, ATTINGER, KELLER, MARTIN, WERNER, LEUENBERGER, JÖRG, FLÜHELER, HANNES, SCHULIN, RAINER (1998): Zweiter Zwischenbericht zum FOGA Projekt. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens beim Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland. Institut für terrestrische Ökologie, Schlieren.

BERLI, MARKUS, KULLI, BEATRICE, ATTINGER, WERNER, LEUENBERGER, JÖRG, FLÜHELER, HANNES, SCHULIN, RAINER (1999a): Vierter Zwischenbericht zum FOGA Projekt. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens beim Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland. Institut für terrestrische Ökologie, Schlieren.

BERLI, MARKUS, KULLI, BEATRICE, ATTINGER, WERNER, LEUENBERGER, JÖRG, FLÜHELER, HANNES, SCHULIN, RAINER (1999b): Schlussbericht zum FOGA Projekt. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens beim Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland. Institut für terrestrische Ökologie, Schlieren.

BEW (1993): Richtlinien zum Schutz des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Bern.

BEW (1997): Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinie). Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Bern.

BLOCH, G. W., GERDSEN, G., ZIETSCH, R. (1992): Belastung und Beanspruchung durch Ganzkörperschwingungen beim Rücken mit unterschiedlichen Reifeninnendrücken. FTI, Nr. 6 +7, S. 45 – 48.

BOLLING, INGO (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Meß- und Rechenmethoden. Dissertation am Institut für Kraftfahrtechnik, Förderwesen und Agrartechnik der der TU München, 274 S.

BRAIS, SUZANNE (2001): Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. Soil Science Society of America Journal, 65, S. 1263 – 1271.

BUNDESPRESSEAMT (2001): Bundeskanzler Schröder: Nachhaltige Entwicklung wesentlicher Bestandteil der Modernisierungspolitik der Bundesregierung. Pressemitteilung Nr. 141/01.
http://www.bundesregierung.de/top/dokumente/Artikel/ix_35382.htm?template=single&id=35382&script=1&ixepf=_35382

- CALDERA, R., SOMMER, R. (1997): Messung von Radlastverteilungen mit Quarz-Kraftsensoren. Dokumentation der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur, 7 S.
- CANILLAS, EMMANUEL, SALOKHE, VILAS (2002): A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 65, S. 221 – 230.
- CHI, L., TESSIER, S., LAGUË, C. (1993): Finite-element prediction of soil compaction induced by various running gears. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 36, S. 629 – 636.
- CHEN, PETER PIN-SHAN (1976): The Entity-Relationship Model - Toward a Unified View of Data; in STONEBRAKER, MICHAEL (1988) (Editor): *Readings in Database Systems*; Morgan Kaufman Publishers Inc., San Mateo.
- CREČENKO, ALEXANDER (1995): Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics*, 32 (6), S. 325 – 333.
- CROKE, JACKY, HAIRSINE, PETER, FOGARTY, PETER (2001): Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*, 143, S. 3 – 12.
- DEUTSCHER FORST-ZERTIFIZIERUNGSRAT (DFZR) (o.J.): Pan-Europäische Waldzertifizierung - Kriterien, Empfehlungen und Indikatoren für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung auf regionaler Ebene (Indikatorenliste) in Deutschland.
Zu finden unter: <http://www.dfzr.de/deutschland/indikatorenlste.htm>
- DEUTSCHER FORST-ZERTIFIZIERUNGSRAT (DFZR) (2000): Pan-Europäische Forst-Zertifizierung - Systembeschreibung zur Zertifizierung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung in Deutschland.
Zu finden unter: http://www.dfzr.de/deutschland/systembe.htm#_Toc477753236
- DIETZ, PETER, KNIGGE, WOLFGANG, LÖFFLER, HANS (1984): *Walderschließung*. Verlag Paul Parey, Hamburg, 426 S.
- DISERENS, ETIENNE, SPIESS, ERNST (2004): Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Boden. TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Bericht Nummer 613, 16 S.
- DLZ (2001): Dlz-Reifenvergleichstest – Breite Schlappen bringen mehr - 13 Anhänger-Reifen im dlz-Vergleichstest. *dlz Agrarmagazin, Traktorenheft 2001*, S. 10 - 18.

- DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. Merkblatt 235, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser GmbH, Bonn, 7 S.
- EBEL, ANDREAS, JACKE, HERIBERT (2003): Marktanalyse der auf selbstfahrenden Forstmaschinen montierten Reifen. AFZ-Der Wald; 10, S. 482 – 484.
- EPPINGER, MARKUS, SCHACK-KIRCHNER, HELMER, HILDEBRAND, ERNST (2002): Rückegassen als Wurzelraum? AFZ-Der Wald; 10, S. 489 – 491.
- ERLER, JÖRN (2000): Verantwortung und Technikkommunikation im Wald. AFZ/Der Wald, Nr. 13, S. 672-673.
- EU-RICHTLINIE 92/43 EWG des Rates vom 21. 5. 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. Amtsblatt Nr. L 206 vom 22.7.1992, S. 0007 – 0050.
- FORBRIG, ANDREAS (2000): Konzeption und Anwendung eines Informationssystems über Forstmaschinen auf der Grundlage von Maschinenbuchführung, Leistungsnachweisen und technischen Daten. KWF-Bericht, Nr. 29, zugl. Dissertation der TU München, Groß-Umstadt, 213 S.
- FSC (2001): Deutscher FSC-Standard. FSC Arbeitsgruppe Deutschland e.V., Freiburg.
- FSC (2001b): Voraussetzungen und Barrieren einer gegenseitigen Anerkennung von Zertifizierungssystemen. Forst und Holz, 56. Jahrgang, Nr. 20, S. 657 – 660.
- GAERTIG, THORSTEN, SCHACK-KIRCHNER, HELMER, HILDEBRAND, ERNST (1999): Bodenbelüftung als Steuergröße des Feinwurzelwachstums in Eichenbeständen. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 170, 5-6, S. 81 – 87.
- GAERTIG, THORSTEN, SCHACK-KIRCHNER, HELMER, HILDEBRAND, ERNST (2001): Steuert Gasdurchlässigkeit im Boden Feinstwurzeldichte und Vitalität bei Eiche? AFZ-Der Wald, 25, S. 1344 – 1347.
- GAERTIG, THORSTEN, SCHACK-KIRCHNER, HELMER, HILDEBRAND, ERNST, v. WILPERT, KLAUS (2002): The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. Forest Ecology and Management, 159, S. 15 – 25.
- GAUER, JÜRGEN (1999): Bedeutung des Bundes-Boden-Schutzgesetzes für die Forstwirtschaft. AFZ/Der Wald, Nr. 10, S. 534 – 535.

- GERDSEN, GERD, GRAUPNER, JOCHEN (1998): Der Kontaktflächendruck bei Forstmaschinen – eine wichtige ökologische Kennziffer zur Beurteilung der Bodenpfleglichkeit. FTI, 3, S. 35 – 36.
- GIESEN, TILMANN (2003): Der Begriff der guten forstlichen Praxis in der Forstwirtschaft. AFZ/Der Wald, Nr. 8, S. 392 – 395.
- GRUNDGESETZ FÜR DIE BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND, vom 23. 5. 1949 (BGBl. S.1), zuletzt geändert durch Gesetz vom 19. 12. 2000 (BGBl I S. 1755).
http://www.bundestag.de/gesetze/gg/gg_03_01.pdf
- GYSI, M. (1999): Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und Pneuinnendruck. Agrarforschung Nr. 6, S. 9 – 12.
- GYSI, M. (2000): Soil Compaction due to Heavy Agricultural Wheel Traffic. Dissertation ETH Zürich.
- GYSI, M. (2001): Compaction of a eutric cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach. Soil & Tillage Research, 61, S. 133 –142.
- HAARLAA, RIKHO (2000): On the Basic Factors Affecting Mobility of a Tracked Vehicle. In: Joansson (ed.): Excavators and backhoe Loaders as Base Machines in Forest Operations. Proceedings from the second meeting of a Concerted Action. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Management and Products. Uppsala. Research Note Nu. 5.
- HÅKANSSON, I, MEDVEDEV, V. W. (1994): Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stress caused by heavy vehicles. Soil & Tillage Research, 35, S. 85 –97.
- HÅKANSSON, I, REEDER, R. C. (1994): Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. Soil Tillage Res. (29), S. 277 -- 304.
- HALLONGBORG, U. (1996): Super ellipse as tyre-ground contact area. Journal of Terramechanics, Vol. 33, No. 3, S. 125 – 132.
- HANKS, RONALD, J., ASHCROFT, GAYLEN, L. (1980): Applied Soil Physics. Soil Water and Temperature Applications. Springer-Verlag, Berlin. 159 S.
- HAMBERGER, JOACHIM (2001): GPS als Mittel zum umweltschonenden Maschineneinsatz: Navigation von Forstmaschinen und Dokumentation ihrer Fahrbewegungen. Dissertation der TU München, 193 S.
- HILDEBRAND, ERNST, E., PULS, CHRISTIAN, GAERTIG, THORSTEN, SCHACK-KIRCHNER, HELMER (2000): Flächige Bodenverformung durch Befahren. AFZ/Der Wald, 13, S. 683 – 686.

- HORN, R., ROSTEK, J. (2000): Subsoil compaction processes – state of knowledge. In: HORN, R., VAN DEN AKKER, J. J. H., ARVIDSSON, J. (Editors): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences, Catena Verlag, Reiskirchen.
- IKEDA, K., TOYOTA, K., KIMURA, M. (1997): Effects of soil compaction on the microbial populations of melon and maize rhizoplane. *Plant and Soil*, 189, S. 91 – 96.
- ISO 9241-10 (1996): Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 10: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-10:1996); Deutsche Fassung EN ISO 9241-10. Beuth-Verlag, Berlin.
- JÉGOU, DANIELLE, BRUNOTTE, JOACHIM, ROGASIK, HELMUT, CAPOWIEZ, YVAN, DIESTEL, HEIKO, SCHRADER, STEFAN, CLUZEAU, DANIEL (2002): Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology*, 38, S. 329 – 336.
- JENSEN, L. S., MCQUEEN, D. J., SHEPHERD, T. G. (1996): Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. I. Field measurements. *Soil & Tillage Research*, 38, S. 175 – 188.
- JONECK, MICHAEL (1997): Das Bundes-Bodenschutzgesetz – Anmerkungen zum Regierungsentwurf. *Zeitschrift für Umweltwissenschaften, insbesondere für Umweltchemie und Ökotoxikologie*, 9 (6), S. 417 - 420.
<http://www.ecomed.de/journals/uwsf/bodenwiss/umpol.htm>
- JORAJURIA, D., DRAGHI, L., ARAGON, A. (1997): The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium / Trifolium grassland. *Soil & Tillage Research*, 41, S. 1 – 12.
- JORDAN, D., LI, F., PONDER JR., F., BERRY, E. C., HUBBARD, V. C., KIM, K. Y.: (1999): *Applied Soil Ecology*, 13, S. 31 – 38.
- KANALI, C. L., KAUMBUTHO, P. G., MAENDE, C. M., KAMAU, J. (1996): Establishment of safe axle loads for sugarcane soils under varying moisture content. *Journal of terramechanics*, Vol. 33, 2, S. 81 – 90.
- KIRBY, J. M. (1989): Shear damage beneath agricultural tyres: theoretical study. *J. Agric. Res.*, 44, S. 217 – 230.
- KLINS, ULLRICH (2000): Die Zertifizierung von Wald und Holzprodukten in Deutschland. Eine forstpolitische Analyse. Dissertation der TU München, 306 S.
Zu finden unter: <http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/fw/2000/klins.html>

- KNOLMAYER, GERHARD; MYRACH, THOMAS (1990): Anforderung an Tools zur Darstellung und Analyse von Datenmodellen. In: HMD - Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik, 27 (1990) 152.
- KORTEN, SVEN (1999): Art und Höhe von Fäll- und Rückeschäden an der Naturverjüngung eines naturgemäß bewirtschafteten Fichten-Tannen-Buchen-Bestandes im Forstamt Griesbach. Diplomarbeit im Rahmen des Projektes A33 des Kuratoriums der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. 87 S.
- KOZLOWSKI, T., T. (1999): Soil compaction and growth of woody plants. Scandinavian Journal of Forest Research. Volume 14, Number 6, S. 619 ff.
- KRAMER, DOUGLAS (1996): The Java Platform. A white paper. JavaSoft, Mountain View, 24 S.
Zu finden unter: <ftp://ftp.javasoft.com/docs/papers/JavaPlatform.pdf>
- KREMER, JOHANN (1998): Befahrungsbedingte Strukturveränderungen von Waldböden und ihre Auswirkungen auf das Wachstum von Fichten, Kiefern und Buchen auf ausgewählten Standorten. Dissertation der LMU München, GCA-Verlag, Herdecke, 177 S.
- KREMER, JOHANN (2000): Tree Root Damages Due to Tracked Harvester Traffic in Forest Operations. In: Joansson (ed.): Excavators and backhoe Loaders as Base Machines in Forest Operations. Proceedings from the second meeting of a Concerted Action. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Management and products. Uppsala. Research Note Nu. 5.
- KREMER, JOHANN, MATTHIES, DIETMAR, WEIXLER, HELMUT, WARKOTSCH, WALTER (1998): Untersuchungen zur Bestandesentwicklung auf mechanisch belasteten Waldstandorten (Abschlußbericht zum Forschungsprojekt A 32 des Kuratoriums der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft). Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München, 174 S.
- KULLI, BEATRICE, BERLI, MARKUS, ATTINGER, WERNER, FLÜHELER, HANNES, SCHULIN, RAINER (1997): Erster Zwischenbericht zum FOGA Projekt. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens beim Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland. Institut für terrestrische Ökologie, Schlieren.
- LARINK, O, SCHRADER, S. (2000): Rehabilitation of degraded compacted soil by earthworms. In: HORN, R., VAN DEN AKKER, J. J. H., ARVIDSSON, J. (Editors): Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences, Catena Verlag, Reiskirchen.
- LEIPOLD, G. (o.J): Greenpeace: the phenomenon. <http://www.greenpeace.org/30th/gerd.html>

- LNV-BW (2001): Beschwerde wegen unvollständiger Gebietsvorschläge nach der FFH-Richtlinie 92/43/EWG. Beschwerdeschreiben vom 28.6.2001, Stuttgart. <http://lnv-bw.de/ffheube1.htm>
- LÖFFLER, HANS (1979): Forsttechnische Geländeklassifikation. FTI, 31, 12, S. 89 – 92.
- LÖFFLER, HANS (1992): Standortserkundung und forsttechnische Geländeklassifikation. Forstw. Cbl., 101, S. 69 – 80.
- LÖFFLER, HANS (1988): Bodenmechanik und Geländeklassifikation. Vorlesungsmanuskript. Eigenverlag, München.
- LOCKEMANN, PETER C; RADERMACHER, KLAUS (1990): Konzepte, Methoden und Modelle zur Datenmodellierung. In: HMD - Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik, 27 (1990) 152.
- LOOS, PETER (1992): Die Semantik eines erweiterten Entity-Relationship-Modells und die Überführung in SQL-Datenbanken. Forschungsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Saarbrücken, Heft 96.
- LOOS, PETER (1993): Representation of Data Structures Using the Entity Relationship Model and the Transformation in Relational Databases. Forschungsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Saarbrücken, Heft 100.
- MARTIN, JAMES (1977): Computer Database Organisation. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs.
- MARSHALL, T., J., HOLMES, J., W. (1988): Soil Physics. 2nd edn. Cambridge University Press. Cambridge, 374 S. [zitiert nach Whalley et al.]
- MARSHALL, V., G. (2000): Impacts of forest harvesting on biological processes in northern forest soils, Forest Ecology and Management 133, S. 43 – 60.
- MARSILI, ADOLFO, SERVADIO, PIERANNA (1996): Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. Soil & Tillage Research 37, S. 37 – 45.
- MATTHIES, DIETMAR (2000a): Abschlußbericht des Befahrungsvorversuches „Welter“. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, TU München, 39 S.
- MATTHIES, DIETMAR (2000b): Eine Qualitätsansprache der bundesländerspezifischen Bodenschutz-Konzepte zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 171, 3, S. 41 – 46.
- MATTHIES, DIETMAR (2002): Vorlesungsskriptum „Bodenphysik“. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, TU München.

- MATTHIES, DIETMAR, HAUSER, H., KREMER, JOHANN (2000): Ableitung von bodenmechanischen und klimatischen Klassifikationschlüsseln zur Erstellung von Bodengefährdungsklassen. (Kuratoriumsprojekt ST 84). Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, TU München, 22 S.
- MATTHIES, DIETMAR, HAMBERGER, JOACHIM, KREMER, JOHANN, ZIESAK, MARTIN (1999): Abschlußbericht zum Projekt „Informationssystem zum bodenverträglichen Einsatz von Forstmaschinen.“ Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, TU München, 45 S.
- MATTHIES, DIETMAR, OHRNER, GUNTHER, KREMER, JOHANN, KAISERAUER, JÖRG, WOLF, BETTINA, BLASCHKE, MARKUS, UHL, ENNO (2003): Vergleichende Studie zur Auswirkung von Rad- und Raupenfahrwerken auf das Wurzelsystem und den Boden (Kuratoriumsprojekt A 34). Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Sachgebiet IV, 138 S.
- MCKYES, E, NEGI, S, DOUGLAS, E., TAYLOR, F., RAGHAVAN, V. (1979): The effect of machinery traffic and tillage operations on the physical properties of a clay and on yield of silage corn. J. Agric. Eng. Res., 24, S. 143 – 148.
- MENABB, D. H. (1993): Soil care – plan now or pay later. Canadian Forest Industries, June, S. 33 – 37.
- MENG, W. (1978): Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte. Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Dissertation an der Universität Freiburg. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, 159 S.
- MELLEGREN, P. G. (1980): Terrain classification for Canadian forestry. Canadian Pulp and Paper Association, Montreal. W.S.I. 2840. 13 S. Zitiert nach: MAKKONEN, I. (1988): Review of forwarders. FERIC, Technical Note TN-123, 12 S.
- MICROSOFT (1993): Microsoft Windows Interface Application Design Guide, ohne Ort.
- MILLER, JOSEF (2001): Erster Pilot-Management-Plan für ein bewaldetes Natura 2000-Gebiet. FORSTINFO der Bayerischen Staatsforstverwaltung, November 25, S. 1-2.
- MÜLLER, TASSILO (1987): Bodenphysikalische und bodenmechanische Informationen der forstlichen Standortskarte. Forstw. Cbl., 107, S. 104 – 111.
- MYERS, G. J. (1991): Methodisches Testen von Programmen. Oldenbourg, München, 171 S.

- NATURSCHUTZVERBÄNDE NRW (Hrsg.) (1999): FFH- und Vogelschutzgebiete in Nordrhein-Westfalen 1998: Schattenliste der anerkannten Naturschutzverbände BUND, NABU und LNU. Oberhausen.
- NEGI, S. C., MCKYES, E., RAGHAVAN, V., TAYLOR, F. (1981): Relationships of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. *J. Terramech.*, 18, S. 81 – 90.
- NLF (1992): Umweltschonender Maschineneinsatz. Merkblatt Nr. 28. Niedersächsische Landesforstverwaltung (NLF). 36 S. + Anhang.
- O’SULLIVAN, M. F., SIMOTA, C. (1995): Modelling the environmental impacts of soil compaction: a review. *Soil & Tillage Research* 35, S. 69 – 84.
- O’SULLIVAN, M. F., HENSHALL, J. K., DICKSON, J. W. (1999): A simplified method for estimating soil compaction. *Soil & Tillage Research* 49, S. 325 – 335.
- PAGEL, BERND-UWE, SIX, HANS-WENER (1994): Software Engineering. Band 1: Die Phasen der Softwareentwicklung. Addison-Wesley Publishing Company, Bonn, 884 S.
- PAUSCH, REINHARD (2002): Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayerischer Mittelgebirge. Dissertation der TU München, 301 S.
- PRESSESTELLE DER LANDESREGIERUNG SCHLESWIG-HOLSTEIN (2001): Erläuterungen zum Landesbodenschutzgesetz. Nr. 5/2001.
http://www.schleswig-holstein.de/landsh/aktuelles/themen/2001/thema_r_146.html
- PREUHSLER, TEJA, KENNEL, MARTIN (2001): Bayerische Waldklimastationen. Forstliche Umweltvorsorge in Bayern. Poster der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
- PRÖLL, WILFRIED (2001): Das Gebirgsland Österreich hat bereits 150 Harvester. *AFZ / Der Wald*, Nr. 15, S. 795 – 796.
- PRÖLL, WILFRIED (2002): 192 Harvester in Österreich. *Arbeit im Wald*, Nr. 7, S. 1 – 3.
- RADFORD, B. J., WILSON-RUMMENIE, A. C., SIMPSON, G. B., BELL, K. L., FERGUSON, M. A. (2001): Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in central Queensland. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, S. 1869 – 1872.
- RAGHAVAN, V., MCKYES, E., BAXTER, R., GENDRON, G. (1979): Traffic—soil—plant (maize) relations. *J. Terramech.*, 16, S. 181 – 189.
- REINHARDT, DIETER W. (1995): Niederquerschnitt-Niederdruck-Breitreifen. *AFZ*, Nr. 9, S. 461 – 462.

- RUSSEL, R., S., GOSS, M., J. (1974): Physical aspects of soil fertility – The response of roots to mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Sci.*, 22, S. 305 - 318. [zitiert nach Whalley et al.]
- SAARILAHTI, MARTTI (2002): Modelling of the wheel and tyre. 1. Tyre and soil contact – Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. In: Haarla, R. Salo, J. (eds.): Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (ECOWOOD), Helsinki, 43 S.
- SALM, CHRISTOPH, HÄUSLER, STEPHAN (1997): Bodenverträglichkeit von Landmaschinen. Erarbeitung und Anwendung eines Kriterienkataloges. Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel, Amt für Umweltschutz und Energie, Solothurn, 26 S.
- SASHA, DENNIS E. (1992): Database Tuning - A Principled Approach. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs.
- SAUTER, U. H., BUSMANN, CHR. (1994): Bestandesschäden bei der Durchforstung von Fichtenbetänden mit Kranvollerntern unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rückegassenabstände. *FTI*, 12, S. 137 –141.
- SCHLOTTER, VOLKMER, KUTZBACH, HEINZ DIETER (2001): Innenkontur eines Traktorreifens auf festem und nachgiebigem Boden. *Agrartechnische Forschung (7)*, Heft 1, S. 23 – 27.
- SCHARDT, MARKUS (2003): Untersuchungen zur wassergehalts- und belastungsabhängigen Stabilität biogener Makroporen. Diplomarbeit der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, TU München, 149 S.
- SCHWANGHART, H. (1991): Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tyres in soft soil. *Journal of Terramechanics*, Vol. 28, No. 4, S. 309 –318.
- SCOTT, SIR PETER (O.J.): WWF's 40th Anniversary 1961 – 2001. http://www.panda.org/40th_ann.htm
- SETÄLÄ, H., HAIMI, J., SIIRA-PIETKÄINEN, A. (2000): Sensitivity of soil processes in northern forest soils: are management practices a threat? *Forest Ecology and Management*, 133, S. 5 – 11.
- SHARMA, A. K., PANDEY, K. P. (1996): A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. *Journal of Terramechanics*, 33 (5), S. 253 – 264.
- SHARRATT, B., VOORHEES, W., MCINTOSH, G., LEMME, G. (1998): Persistence of soil structural modifications along a historic waggon trail. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 62, Issue 3, S. 774 –777.

- SMITH, COLIN (1999): Site Damage and Long-term Productivity of Forest Plantations in South Africa: Impacts of Harvesting Operations and Suggested Management Strategies. Institute for Commercial Forestry Research (ICFR), Handbook Series No. 1/99, 44 S.
- SOANE, B. D., VAN OUWERKERK, C. (1995): Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil & Tillage Research*, 35, S. 5 – 22.
- SONDERHOFF, WINFRIED (1988): Messungen zum Status der Bodenverdichtung und Bedeutung von Mechanisierungsverfahren. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 142 S.
- STONEBRAKER, MICHAEL (1988) (Editor): *Readings in Database Systems*; Morgan Kaufman Publishers Inc., San Mateo.
- STRATMANN, JOSEF (2001): Forderungen des Waldbaus an die Forsttechnik. S. 87 – 88. In: MORAT, JOACHIM (Redaktion): 13. KWF-Tagung 2000, Arbeitskreise, Groß-Umstadt.
- Sun (o.J.): *The Java Language: An Overview*. A white paper. JavaSoft, Mountain View, 8 S.
Zu finden unter: <ftp://ftp.javasoft.com/docs/papers/java-overview.ps>
- Sun (1999): *Java Look and Feel Design Guidelines*. SunMicrosystems, Palo Alto.
Zu finden unter: <http://java.sun.com/products/jlf/ed1/dg/index.htm>
- THUVESEN, DAG (1997): Transient steering of tracked vehicles on hard ground. *Machine and Vehicle Design*. Chalmers University of Technology. Göteborg. Thesis for the degree licentiate of engineering.
- VOSSSEN, GOTTFRIED (2000): *Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbank-Managementsysteme*. Oldenbourg-Verlag, München, 788 S.
- WÄSTERLUND, I. (1988): Die Auswirkungen der Befahrung auf bodenbiologische Prozesse, Vitalität und Ertrag. In: KWF: Bodenschäden durch Forstmaschinen. Dokumentation einer Arbeitstagung des KWF vom 21. – 23. 9. 1987, Groß-Umstadt, S. 51 – 68.
- WEIGER, F. (1988): Bodenschäden durch Befahrung – ein Überblick. In: KWF: Bodenschäden durch Forstmaschinen. Dokumentation einer Arbeitstagung des KWF vom 21. – 23. 9. 1987, Groß-Umstadt, S. 1 – 10.
- WEIßBACH, MICHAEL (2001): Neue Reifenkonzepte zur Bodenschonung. *Landtechnik* (2). S. 72 – 73.
- WEIßBACH, MICHAEL, ISENSEE, EDMUND (2000): Gute fachliche Praxis beim Einsatz leistungsfähiger Erntetechnik. *Landtechnik* (1), S. 12 – 13.
- WHALLEY, W. R., DUMITRU, E., DEXTER, A. R. (1995): Biological effects of soil compaction. *Soil & Tillage Research* 35. S. 53 – 68.

- WIBORNY, WERNER (1990): Datenmodell "Betriebliches Vorschlagswesen" der BMW AG - Das Fachproblem und seine Datenmodellierung nach BMW-Konventionen. In: HMD - Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik, 27 (1990) 152.
- WONG, J. W. (1993): Theory of ground vehicles (2nd. Ed.). John Wiley & Sons, New York. [zitiert nach THUVESEN, 1997]
- YOUNG, I. M. (1998): Biophysical interaction at the root-soil interface: a review. Journal of Agricultural Science, 130, S. 1 –7.
- ZIESAK, MARTIN, MATTHIES, DIETMAR (2001): Untersuchungen zur last- und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen. FTI, Nr. 9 + 10, S. 104 – 110.

8.2 Literaturstellen aus dem Internet

- BUND <http://www.bund.net/wir/geschichte/anfang.shtml>
- ROBIN-WOOD <http://www.umwelt.org/robin-wood/german/allgemei.htm>
- SUN JDBC Types of JDBC technology drivers.
<http://java.sun.com/products/jdbc/driverdesc.html>
- SUN JDBC-ODBC JDBC-ODBC Bridge Driver.
<http://java.sun.com/j2se/1.3/docs/guide/jdbc/getstart/bridge.doc.html - 996747>
- NATUROPA <http://www.nature.coe.int/english/cadres/naturopa.htm>
- UMWELT BAY <http://www.umweltministerium.bayern.de/wir/history/geschich.htm>
- UMWELT BUND 15 Jahre Bundesumweltministerium.
<http://www.bmu.de/files/15JahreBMU.pdf>
- UMWELT BW http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/uvm/home/t_uvm.html
- UMWELTGESCH Umweltschutzgeschichte Deutschland und weltweit.
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/umweltschutzgeschichte-deutschland.htm>
- FSC DEUTSCHLAND <http://www.fsc-deutschland.de/index1.htm>

9 Anlagen

9.1 Anlage 1: Ausschnitt aus der PEFC-Kriterienliste

Pan-Europäische Waldzertifizierung

Kriterien, Empfehlungen und
Indikatoren für eine nachhaltige
Waldbewirtschaftung auf regionaler Ebene
(Indikatorenliste)
in Deutschland

Ausschnitt:

Quelle: DFZR (o.J.)

A. Einführung

Die zentrale Grundlage der Begutachtung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung im PEFC bilden die Kriterien, Indikatoren und operativen Empfehlungen, die auf den Ministerkonferenzen von Helsinki und Lissabon sowie auf jeweils folgenden Expertentreffen erarbeitet wurden.

Die Kriterien sind nach sechs Unterkapiteln geordnet.

In der Kopfzeile der Indikatorenblöcke befinden sich jeweils die mit der Originalnummer versehene Empfehlungen zu den Kriterien. Diese operativen Empfehlungen werden zitiert, um den inhaltlichen Bezug der Indikatoren kenntlich zu machen und die Indikatorenliste zu strukturieren. Sie stellen keine zusätzlichen Anforderungen dar, die im Rahmen des regionalen Waldberichts zu überprüfen wären. Bei verschiedenen Empfehlungen ist eine mit "E" gekennzeichnete Zeile eingefügt, die Erläuterungen zum Umgang mit den jeweiligen Indikatoren und zu bestehenden Überschneidungen mit anderen Empfehlungen enthält.

In den weiteren Zeilen werden die einzelnen Indikatoren mit den jeweiligen Messgrößen (Kennzahlen) genannt. Im Falle von deskriptiven Indikatoren entfällt diese Maßgröße.

Die vorliegende Indikatorenliste orientiert sich zunächst an allen 44 operationalen Empfehlungen von Lissabon. Die dargestellten Indikatoren werden zwei Gruppen zugeordnet:

1. die mit "R" gekennzeichneten Indikatoren dienen ausschließlich der Beschreibung von nicht durch die Forstwirtschaft beeinflussbaren Rahmenbedingungen,
 2. die mit "S" gekennzeichneten Indikatoren sind systemrelevant und dienen der Zertifizierungsstelle als Grundlage für die Zertifizierung.
- Sofern möglich und sinnvoll sollen in den regionalen Waldberichten konkrete messbare Ziele festgelegt werden.

Bei der regionalen Zertifizierung nach PEFC Deutschland wird zunächst ein Regionaler Waldbericht erstellt. In diesem Waldbericht werden die in dieser Indikatorenliste aufgeführten Indikatoren für nachhaltige Waldbewirtschaftung für die

jeweilige Region beschrieben. Bei positivem Ausgang der Überprüfung des Regionalen Waldberichtes durch einen unabhängigen Zertifizierer können die Waldbesitzer der betreffenden Region sich am Zertifizierungssystem freiwillig beteiligen, wenn sie sich verpflichten, die Bedingungen der "Leitlinie für nachhaltige Waldbewirtschaftung zur Einbindung der Waldbesitzer in den regionalen Rahmen" einzuhalten.

Die Kriterien dieser Leitlinie sind im Kopf der Indikatorenblöcke in den mit "E" gekennzeichneten Zeilen zitiert und mit kursiver Schrift kenntlich gemacht.

B. Kriterien, Empfehlungen und Indikatoren

2. Erhaltung der Gesundheit und Vitalität von Forstökosystemen

2.2.b

Geeignete Waldbewirtschaftungsmaßnahmen, wie z.B. die Wiederaufforstung und Aufforstung mit Baumarten und Provenienzen, die den Standortbedingungen angepasst sind, oder der Einsatz von Pflege-, Ernte- und Transportverfahren, die Baum- und/oder Bodenschäden auf ein Mindestmaß reduzieren, sollen angewendet werden. Das Auslaufen von Öl aufgrund von Waldbewirtschaftungsarbeiten oder die fahrlässige Müllentsorgung auf Waldflächen soll unbedingt vermieden werden.

E

Flächiges Befahren wird grundsätzlich unterlassen. Für den Maschineneinsatz wird ein dauerhaftes Feinerschließungsnetz aufgebaut, das einem wald- und bodenschonenden Maschineneinsatz Rechnung trägt. Der Rückegassenabstand darf grundsätzlich 20 m nicht unterschreiten. Bei verdichtungsempfindlichen Böden sind größere Abstände anzustreben. Fällungs- und Rückeschäden am bestehenden Bestand und an der Verjüngung werden durch pflegliche Waldarbeit vermieden.

Im Falle eines Maschineneinsatzes erfolgt die Verwendung biologisch abbaubarer Öle, sofern technisch sinnvoll und möglich. Beeinträchtigungen von Gewässern im Wald werden vermieden.

	Indikatoren	Kennzahlen	S/R
38	Kataloge / Empfehlungen für die Baumartenwahl (Standortkartierung)		S
39	Anteil der durch die Standortkartierung erfassten Fläche	%	S
40	Technischer Vorschriften und Prüfungen für eingesetztes Gerät		S
41	Empfehlungen für die Durchführung von Ernte- und Bringungsmaßnahmen		S
42	Abbaubare Betriebsmittel		S

5. Erhaltung und angemessene Verbesserung der Schutzfunktionen bei der Waldbewirtschaftung (vor allem Boden und Wasser)

5.1.a

Die Waldbewirtschaftungsplanung soll danach streben, die Schutzfunktionen, die Wälder für die Gesellschaft erbringen, zu bewahren und zu verbessern. Zu diesen

Schutzfunktionen gehören der Schutz der Infrastruktur vor Bodenerosion, Schutz der Wasserressourcen sowie Schutz vor schädlichen Auswirkungen des Wassers, wie z.B. Überschwemmungen oder Lawinen.

E

Auf die Schutzfunktionen wird bei der Waldbewirtschaftung besondere Rücksicht genommen.

S/R	95	Besondere Bewirtschaftungsregelungen in ausgewiesenen Schutzgebieten	S
-----	----	--	---

5.2.a

Besondere Sorgfalt soll den waldbaulichen Arbeiten auf empfindlichen Böden und in erosionsanfälligen Gebieten gelten sowie in Gebieten, in denen die Arbeiten eine massive Erosion von Bodenmaterial in die Wasserläufe zur Folge haben könnten. Ungeeignete Verfahren, wie z.B. das Tiefpflügen, sowie der Einsatz ungeeigneter Maschinen sollen auf diesen Flächen vermieden werden. Besondere Maßnahmen zur Reduzierung des Drucks der Tierpopulationen auf die Wälder sollen ergriffen werden.

E

Kahlschlägen im Bodenschutzwald werden unterlassen. Auf eine flächige, in den Mineralboden eingreifende Bodenbearbeitung, wird verzichtet.

Aussagen zum Umgang mit Wild werden bereits unter 4.2.g gefordert.

9.2 Anlage 2: Berechnung der gefitteten Werte für Reifen T2

Rank 17 Eqn 1402 Chebyshev X,Y Rational Order 2/3

r² Coef Det DF Adj r² Fit Std Err F-value
 0.9995295099 0.9978043795 28.274588143 849.77729657

Parm	Value P> t	Std Error	t-value	95.00% Confidence Limits	
a	0.116421114 0.99873	68.87483835	0.001690329	-191.110786	191.3436287
b	-0.34759083 0.99875	207.7647546	-0.001673	-577.195026	576.4998446
c	0.415477191 0.98741	24.74766025	0.016788544	-68.2950429	69.12599728
d	1.084114021 0.96550	23.56000553	0.046015016	-64.3289479	66.49717598
e	-0.53097002 0.98916	36.72663407	-0.01445736	-102.500453	101.4385133
f	-0.10552076 0.99865	58.50268185	-0.00180369	-162.535005	162.3239638
g	-0.05926786 0.99793	21.48416115	-0.00275868	-59.7088619	59.59032615
h	-0.20911193 0.99842	99.01470658	-0.00211193	-275.118009	274.6997852
i	0.058924992 0.99753	17.87526783	0.003296454	-49.5707748	49.68862481
j	-0.04354868 0.99933	48.88589445	-0.00089082	-135.772551	135.6854536
k	0.005582002 0.99980	20.52787185	0.000271923	-56.9889273	57.00009126

X at Fn Zmin Y at Fn Zmin Fn Zmin
 1 3 566.00249342
 X at Fn Zmax Y at Fn Zmax Fn Zmax
 7 0.8 73755.208784

Procedure

GaussElim

r² Coef Det DF Adj r² Fit Std Err
 0.9995295099 0.9978043795 28.274588143

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Statistic	P>F
Regr	6793564.4 0.00000	10	679356.44	849.777	
Error	3197.8093	4	799.45233		
Total	6796762.2	14			

Description: C:\Programme\TableCurve3D\CLIPBRD.WK1

X Variable:

Xmin: 1 Xmax: 7 Xrange: 6
 Xmean: 2.9333333333 Xstd: 1.8695555876

Y Variable:

Ymin: 0.8 Ymax: 3 Yrange: 2.2
Ymean: 1.7733333333 Ystd: 0.8713426968

Z Variable:

Zmin: 566.92 Zmax: 2666.56 Zrange: 2099.64
Zmean: 1528.3186667 Zstd: 696.76611397

Date

Aug 20, 2003

Time

3:34:45 PM

File Source

d:\daten\reifendaten\t2 flaeche gefitte

9.3 Anlage 3: Herleitung der Kontaktflächenberechnung

Deskriptive Statistiken

	Mittelwert	Standardabweichung	N
KONTAKTFLÄCHE	1746,474	787,6628	246
BREITE	641,0528	78,2932	246
Durchmesser	1374,870	180,8232	246
PR	14,2927	2,7247	246
INNENDRUCK	1,732	,829	246
LAST	3,057	1,845	246
Breite*Durchmesser	881,8964	157,3432	246
Last^2	12,7337	13,5953	246
1/Last	,5069	,3402	246
Last ^ 3	63,0783	92,6094	246
Innendruck ^ 2	3,6829	3,2423	246
Last / Innendruck ^2	1,6500	1,5583	246
Innendruck ^ 3	9,0224	10,5703	246
1 / Innendruck	,7272	,3356	246
PR ^ 2	211,6748	85,6771	246
Innendruck / Last	,8263	,7187	246
Last / Innendruck	2,0158	1,2575	246

Modellzusammenfassung^f

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers	Änderungsstatistiken					Durbin-Watson-Statistik
					Änderung in R-Quadrat	Änderung in F	df1	df2	Änderung in Signifikanz von F	
1	,982 ^a	,964	,962	152,9563	,964	447,571	14	231	,000	
2	,982 ^b	,964	,962	152,6312	,000	,015	1	233	,902	
3	,982 ^c	,964	,963	152,3154	,000	,037	1	234	,848	
4	,982 ^d	,964	,963	152,1718	,000	,559	1	235	,455	
5	,982 ^e	,964	,963	152,3495	,000	1,549	1	236	,214	1,087

a. Einflussvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Last ^ 3, Innendruck / Last, 1 / Innendruck, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^2, PR, LAST, INNENDRUCK

b. Einflussvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Last ^ 3, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^2, PR, LAST, INNENDRUCK

c. Einflussvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^2, PR, LAST, INNENDRUCK

d. Einflussvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, PR, LAST, INNENDRUCK

e. Einflussvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, BREITE, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, PR, LAST, INNENDRUCK

f. Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE

Aufgenommene/Entfernte Variablen^b

Modell	Aufgenommene Variablen	Entfernte Variablen	Methode
1	Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Last ^ 3, Innendruck / Last, 1 / Innendruck, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^ 2, PR, LAST, INNENDRUCK		Eingeben
2		1 / Innendruck	Rückwärts (Kriterium: Wahrscheinlichkeit von F-Wert für Ausschluß >= ,100).
3		Last ^ 3	Rückwärts (Kriterium: Wahrscheinlichkeit von F-Wert für Ausschluß >= ,100).
4		Last / Innendruck ^ 2	Rückwärts (Kriterium: Wahrscheinlichkeit von F-Wert für Ausschluß >= ,100).
5		Innendruck ^ 3	Rückwärts (Kriterium: Wahrscheinlichkeit von F-Wert für Ausschluß >= ,100).

a. Toleranz = ,000 erreichte Grenzen.

b. Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE

ANOVA^f

Modell		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
1	Regression	146596718,638	14	10471194	447,571	,000 ^a
	Residuen	5404387,176	231	23395,615		
	Gesamt	152001105,814	245			
2	Regression	146596364,586	13	11276643	484,053	,000 ^b
	Residuen	5404741,228	232	23296,298		
	Gesamt	152001105,814	245			
3	Regression	146595508,272	12	12216292	526,565	,000 ^c
	Residuen	5405597,542	233	23199,989		
	Gesamt	152001105,814	245			
4	Regression	146582541,456	11	13325686	575,468	,000 ^d
	Residuen	5418564,358	234	23156,258		
	Gesamt	152001105,814	245			
5	Regression	146546666,598	10	14654667	631,384	,000 ^e
	Residuen	5454439,216	235	23210,380		
	Gesamt	152001105,814	245			

a. Einflußvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Last ^ 3, Innendruck / Last, 1 / Innendruck, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^ 2, PR, LAST, INNENDRUCK

b. Einflußvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Last ^ 3, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^ 2, PR, LAST, INNENDRUCK

c. Einflußvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, Last / Innendruck ^ 2, PR, LAST, INNENDRUCK

d. Einflußvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, Innendruck ^ 3, BREITE, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, PR, LAST, INNENDRUCK

e. Einflußvariablen : (Konstante), Last / Innendruck, PR ^ 2, Durchmesser, BREITE, Innendruck / Last, 1/Last, Breite*Durchmesser, PR, LAST, INNENDRUCK

f. Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE

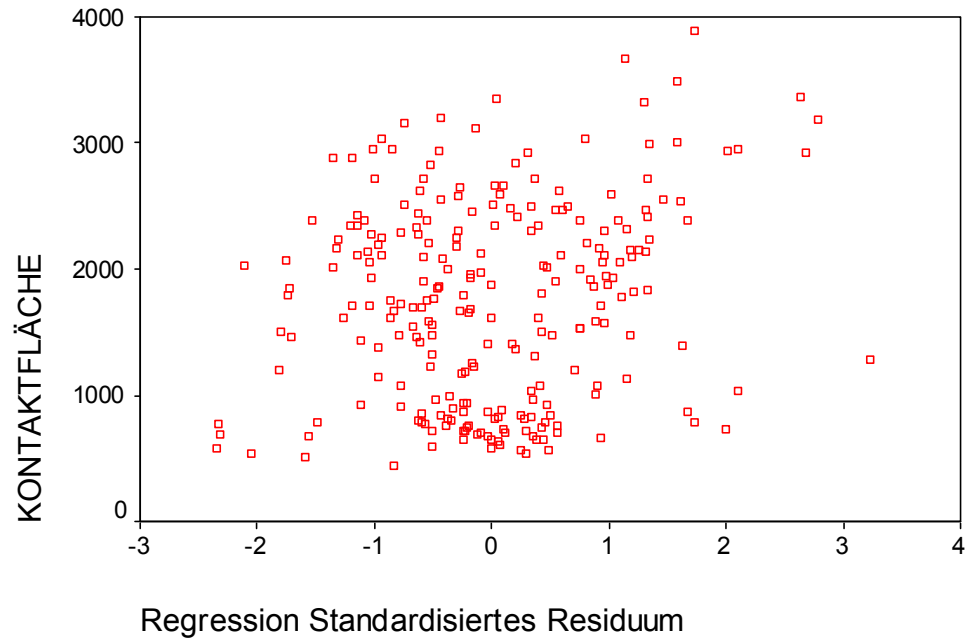
Koeffizienten^a

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B		Korrelationen			Kollinearitätsstatistik		
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze	Nullter Ordnung	Partiell	Teil	Toleranz	VIF	
	1	(Konstante)	393,059			775,552		,613	-1135,000	1921,118			
	BREITE	3,736	,756	,371	4,944	,000	2,247	5,225	,051	,309	,061	,027	36,659
	Durchmesser	2,351	,351	,540	6,699	,000	1,660	3,043	,172	,403	,083	,024	42,182
	PR	-257,090	51,316	-,889	-5,010	,000	-358,198	-155,982	,007	-,313	-,062	,005	204,736
	INNENDRUCK	-350,754	294,636	-,369	-1,190	,235	-931,271	229,763	-,147	-,078	-,015	,002	624,456
	LAST	184,837	106,317	,433	1,739	,083	-24,637	394,312	,806	,114	,022	,002	402,791
	Breite*Durchmesser	-2,861	,558	-,571	-5,131	,000	-3,959	-1,762	,150	-,320	-,064	,012	80,606
	1/Last	-849,679	174,405	-,367	-4,872	,000	-1193,307	-506,052	-,853	-,305	-,060	,027	36,860
	Last ^ 3	-,119	,684	-,014	-,173	,863	-1,466	1,229	,600	-,011	-,002	,024	42,018
	Last / Innendruck ^ 2	-46,746	91,801	-,092	-5,09	,611	-227,621	134,128	,668	-,033	-,006	,005	214,295
	Innendruck ^ 3	7,309	10,787	,098	,678	,499	-13,945	28,563	-,133	,045	,008	,007	136,149
	1 / Innendruck	39,290	319,390	,017	,123	,902	-589,999	668,580	,152	,008	,002	,008	120,325
	PR ^ 2	7,447	1,631	,810	4,565	,000	4,233	10,661	,003	,288	,057	,005	204,567
	Innendruck / Last	213,674	99,873	,195	2,139	,033	16,895	410,454	-,769	,139	,027	,019	53,950
	Last / Innendruck	314,181	175,594	,502	1,789	,075	-31,788	660,151	,908	,117	,022	,012	510,616
2	(Konstante)	461,101	542,488		,850	,396	-607,731	1529,933					
	BREITE	3,737	,754	,371	4,956	,000	2,251	5,223	,051	,309	,061	,027	36,657
	Durchmesser	2,352	,350	,540	6,715	,000	1,662	3,042	,172	,403	,083	,024	42,174
	PR	-257,029	51,205	-,889	-5,020	,000	-357,915	-156,142	,007	-,313	-,062	,005	204,716
	INNENDRUCK	-381,445	156,402	-,401	-2,439	,015	-689,595	-73,296	-,147	-,158	-,030	,006	176,710
	LAST	189,294	99,741	,443	1,898	,059	-7,219	385,808	,806	,124	,023	,003	356,015
	Breite*Durchmesser	-2,862	,556	-,572	-5,144	,000	-3,958	-1,766	,150	-,320	-,064	,012	80,593
	1/Last	-850,849	173,775	-,367	-4,896	,000	-1193,229	-508,469	-,853	-,306	-,061	,027	36,751
	Last ^ 3	-,130	,676	-,015	-,192	,848	-1,463	1,203	,600	-,013	-,002	,024	41,278
	Last / Innendruck ^ 2	-39,614	71,028	-,078	-5,58	,578	-179,556	100,327	,668	-,037	-,007	,008	128,831
	Innendruck ^ 3	8,424	5,837	,113	1,443	,150	-3,075	19,923	-,133	,094	,018	,025	40,028
	PR ^ 2	7,445	1,628	,810	4,574	,000	4,238	10,652	,003	,288	,057	,005	204,557
	Innendruck / Last	215,399	98,675	,197	2,183	,030	20,986	409,812	-,769	,142	,027	,019	52,887
	Last / Innendruck	302,788	148,866	,483	2,034	,043	9,486	596,090	,908	,132	,025	,003	368,566
3	(Konstante)	458,992	541,254		,848	,397	-607,386	1525,369					
	BREITE	3,744	,752	,372	4,982	,000	2,264	5,225	,051	,310	,062	,027	36,565
	Durchmesser	2,355	,349	,541	6,743	,000	1,667	3,043	,172	,404	,083	,024	42,101
	PR	-256,619	51,055	-,888	-5,026	,000	-357,207	-156,032	,007	-,313	-,062	,005	204,360
	INNENDRUCK	-364,522	128,844	-,384	-2,829	,005	-618,369	-110,674	-,147	-,182	-,035	,008	120,421
	LAST	172,270	45,330	,403	3,800	,000	82,961	261,580	,806	,242	,047	,014	73,841
	Breite*Durchmesser	-2,867	,555	-,573	-5,170	,000	-3,959	-1,774	,150	-,321	-,064	,012	80,399
	1/Last	-855,619	171,629	-,370	-4,985	,000	-1193,763	-517,476	-,853	-,310	-,062	,028	35,997
	Last / Innendruck ^ 2	-46,258	61,874	-,092	-,748	,455	-168,162	75,647	,668	-,049	-,009	,010	98,171
	Innendruck ^ 3	8,121	5,606	,109	1,448	,149	-2,925	19,166	-,133	,094	,018	,027	37,085
	PR ^ 2	7,433	1,623	,809	4,579	,000	4,235	10,631	,003	,287	,057	,005	204,233
	Innendruck / Last	204,861	81,779	,187	2,505	,013	43,740	365,982	-,769	,162	,031	,027	36,477
	Last / Innendruck	319,837	119,139	,511	2,685	,008	85,109	554,565	,908	,173	,033	,004	237,047
4	(Konstante)	500,743	537,857		,931	,353	-558,919	1560,404					
	BREITE	3,738	,751	,372	4,978	,000	2,258	5,217	,051	,309	,061	,027	36,560
	Durchmesser	2,350	,349	,539	6,737	,000	1,663	3,037	,172	,403	,083	,024	42,087
	PR	-255,793	50,994	-,885	-5,016	,000	-356,260	-155,326	,007	-,312	-,062	,005	204,265
	INNENDRUCK	-373,107	128,210	-,393	-2,910	,004	-625,700	-120,514	-,147	-,187	-,036	,008	119,465
	LAST	200,460	25,137	,469	7,975	,000	150,937	249,983	,806	,462	,098	,044	22,749
	Breite*Durchmesser	-2,857	,554	-,571	-5,159	,000	-3,948	-1,766	,150	-,320	-,064	,012	80,356
	1/Last	-914,876	152,087	-,395	-6,015	,000	-1214,511	-615,240	-,853	-,366	-,074	,035	28,320
	Innendruck ^ 3	6,174	4,960	,083	1,245	,214	-3,598	15,945	-,133	,081	,015	,034	29,082
	PR ^ 2	7,406	1,621	,806	4,568	,000	4,212	10,601	,003	,286	,056	,005	204,137
	Innendruck / Last	232,936	72,578	,213	3,209	,002	89,945	375,926	-,769	,205	,040	,035	28,785
	Last / Innendruck	236,018	40,261	,377	5,862	,000	156,698	315,337	,908	,358	,072	,037	27,121
5	(Konstante)	282,607	509,099		,555	,579	-720,373	1285,588					
	BREITE	3,769	,751	,375	5,017	,000	2,289	5,249	,051	,311	,062	,027	36,519
	Durchmesser	2,368	,349	,544	6,788	,000	1,681	3,056	,172	,405	,084	,024	42,013
	PR	-257,325	51,039	-,890	-5,042	,000	-357,878	-156,772	,007	-,312	-,062	,005	204,146
	INNENDRUCK	-229,118	55,340	-,241	-4,140	,000	-338,145	-120,092	-,147	-,261	-,051	,045	22,206
	LAST	180,630	19,466	,423	9,279	,000	142,280	218,981	,806	,518	,115	,073	13,611
	Breite*Durchmesser	-2,895	,554	-,578	-5,230	,000	-3,986	-1,805	,150	-,323	-,065	,012	80,109
	1/Last	-793,935	117,139	-,343	-6,778	,000	-1024,711	-563,159	-,853	-,404	-,084	,060	16,761
	PR ^ 2	7,462	1,623	,812	4,599	,000	4,266	10,659	,003	,287	,057	,005	203,982
	Innendruck / Last	173,318	54,593	,158	3,175	,002	65,764	280,873	-,769	,203	,039	,062	16,249
	Last / Innendruck	271,594	28,387	,434	9,567	,000	215,668	327,520	,908	,529	,118	,074	13,452

a. Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE

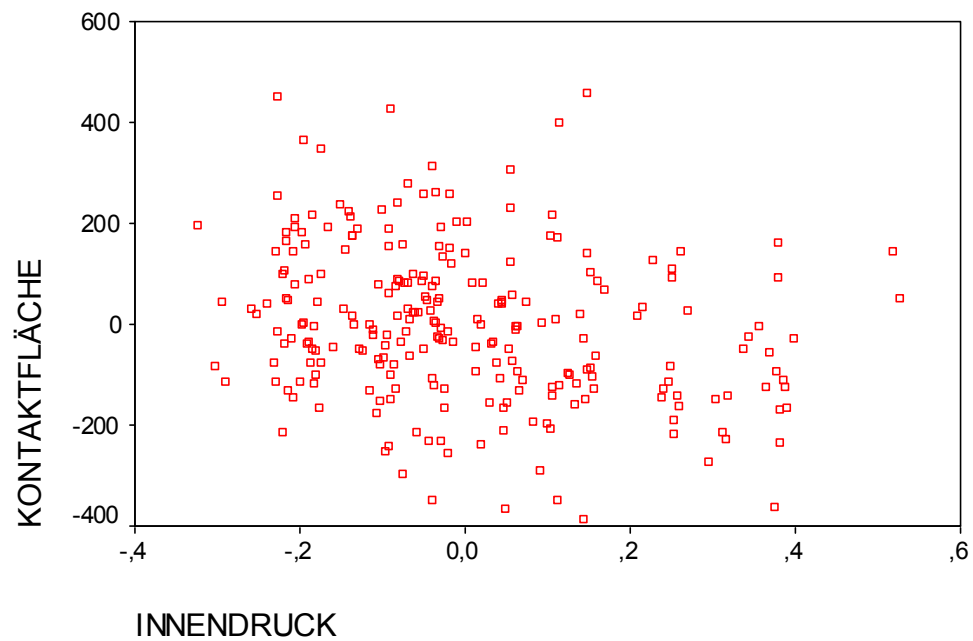
Streudiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



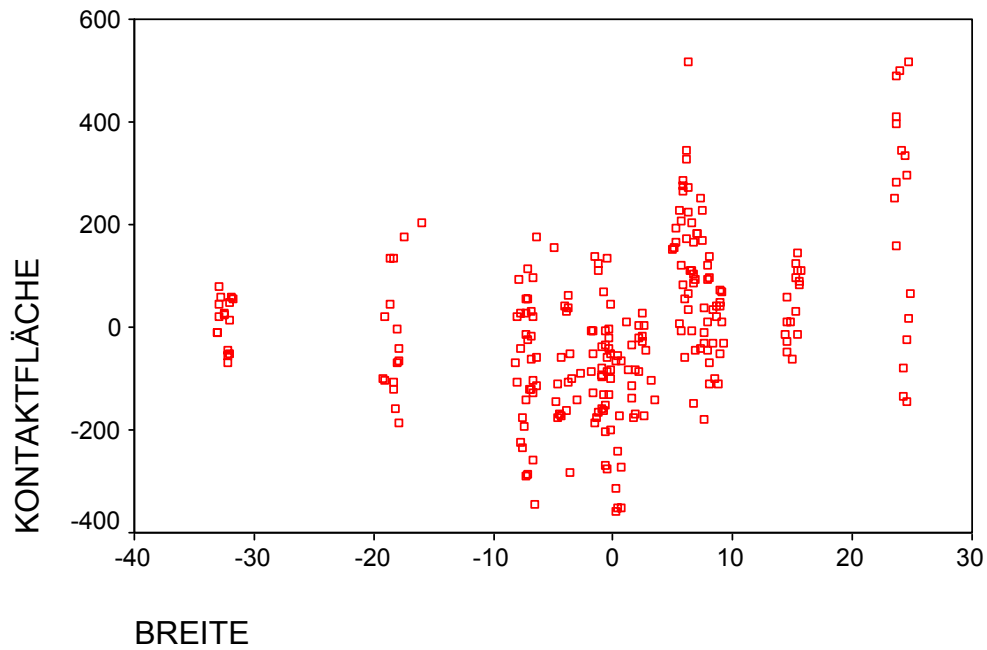
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



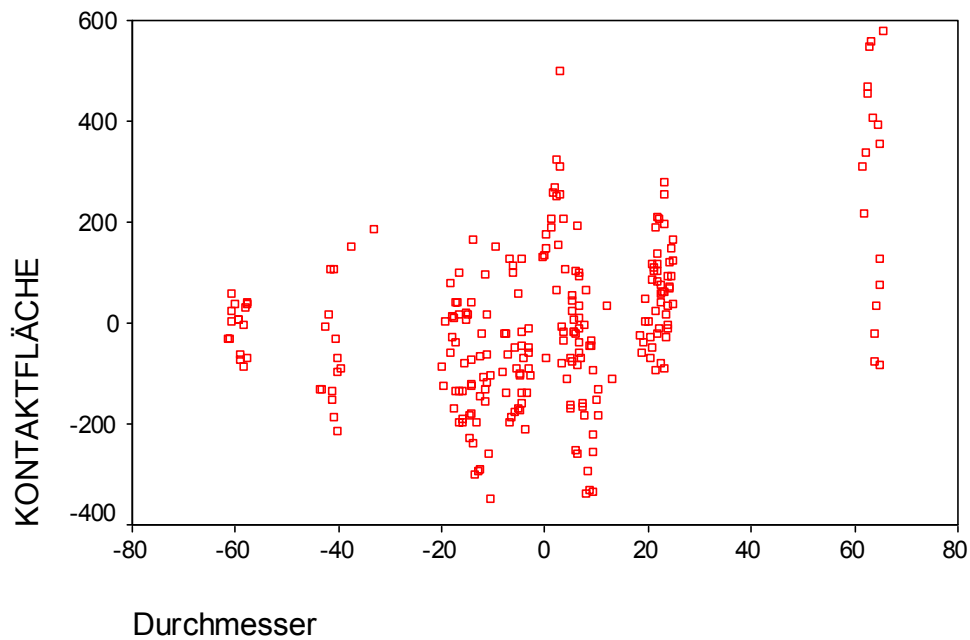
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



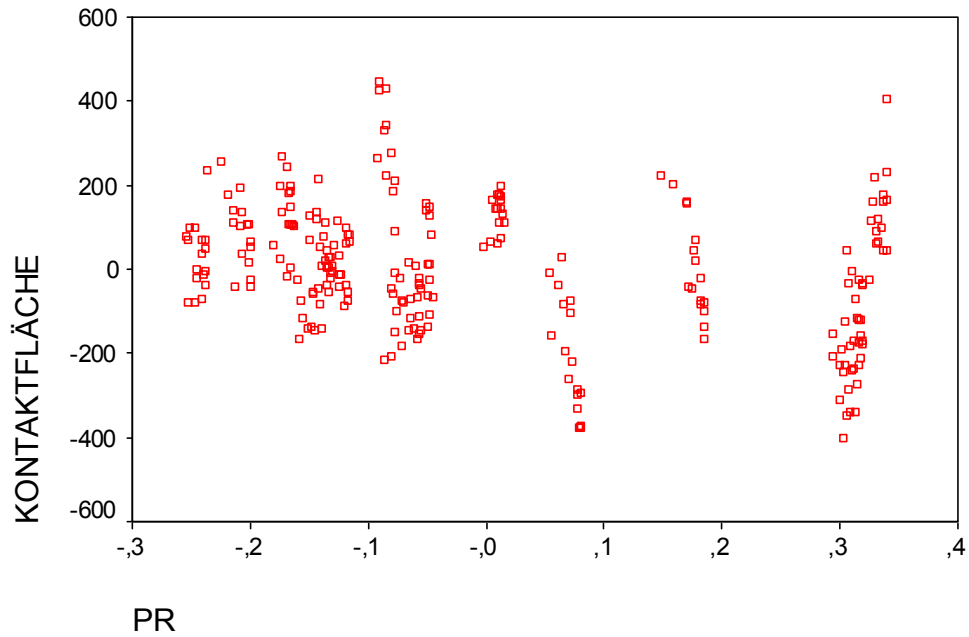
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



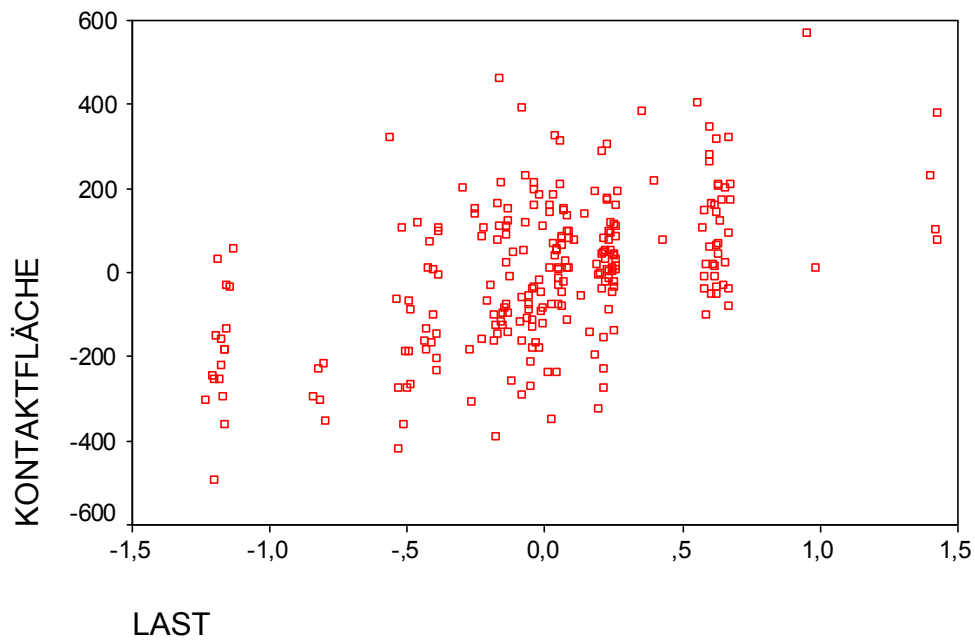
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



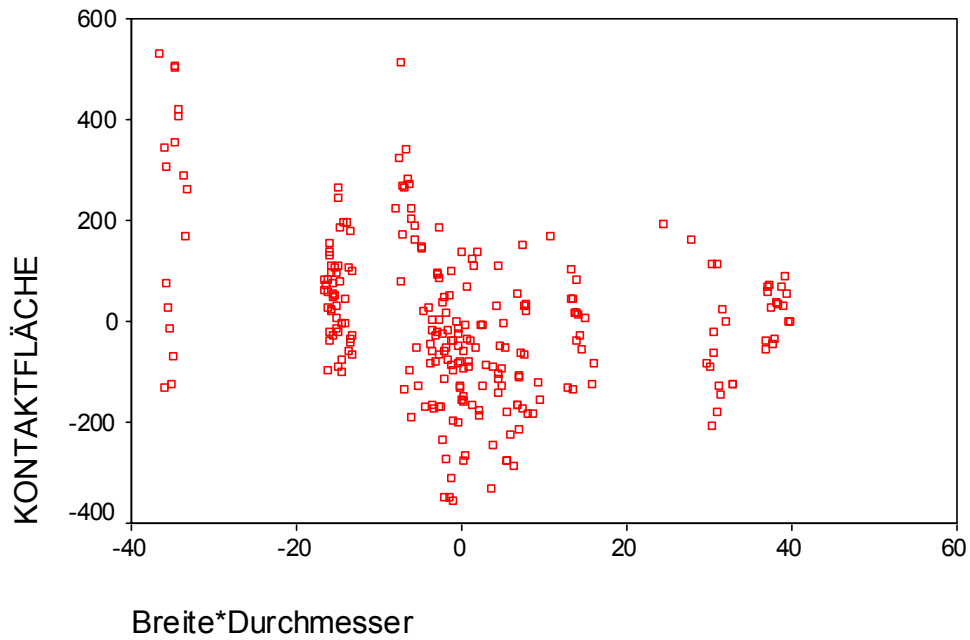
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



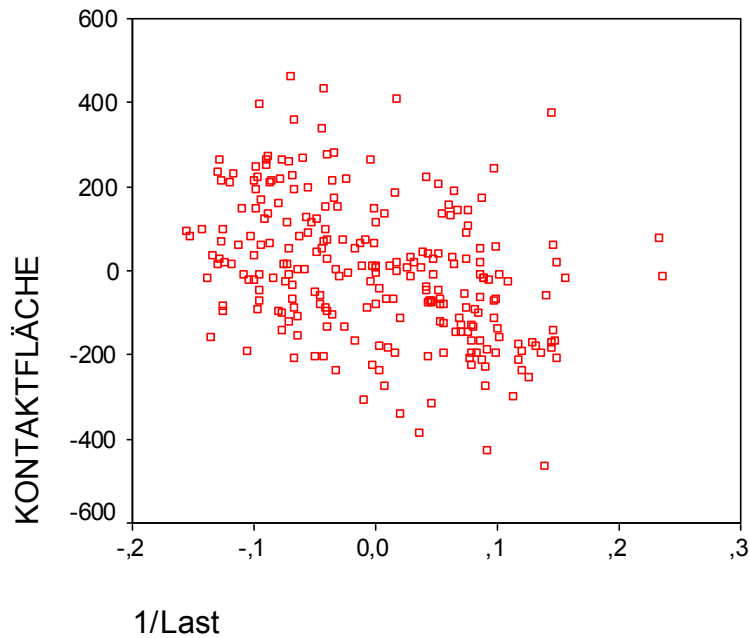
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



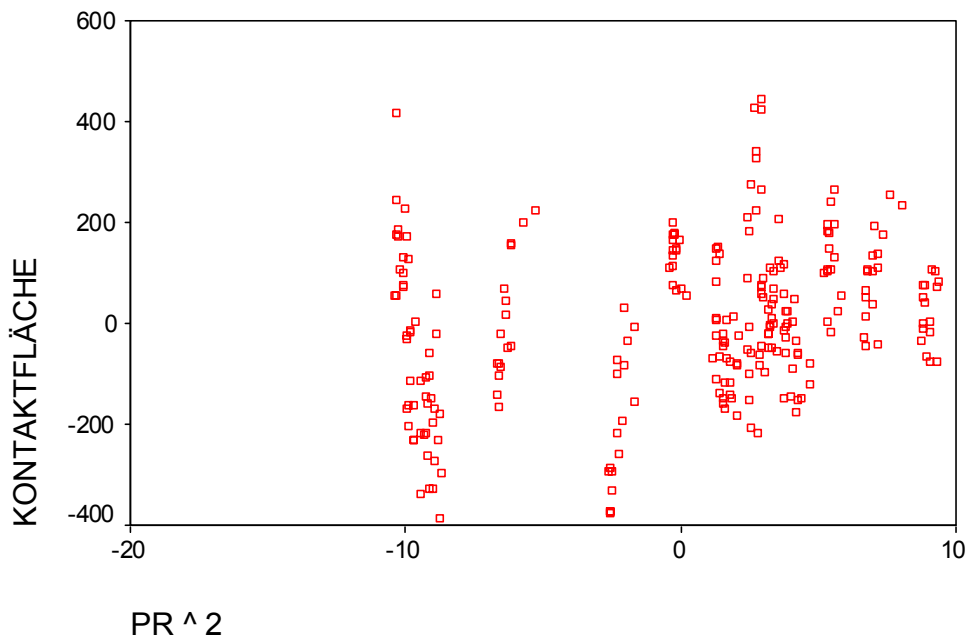
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



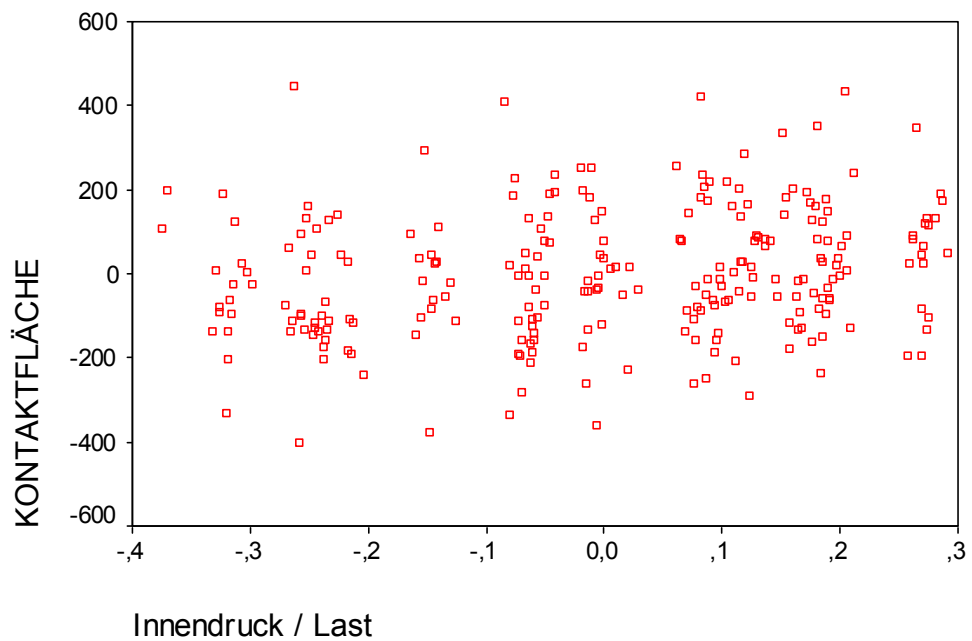
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



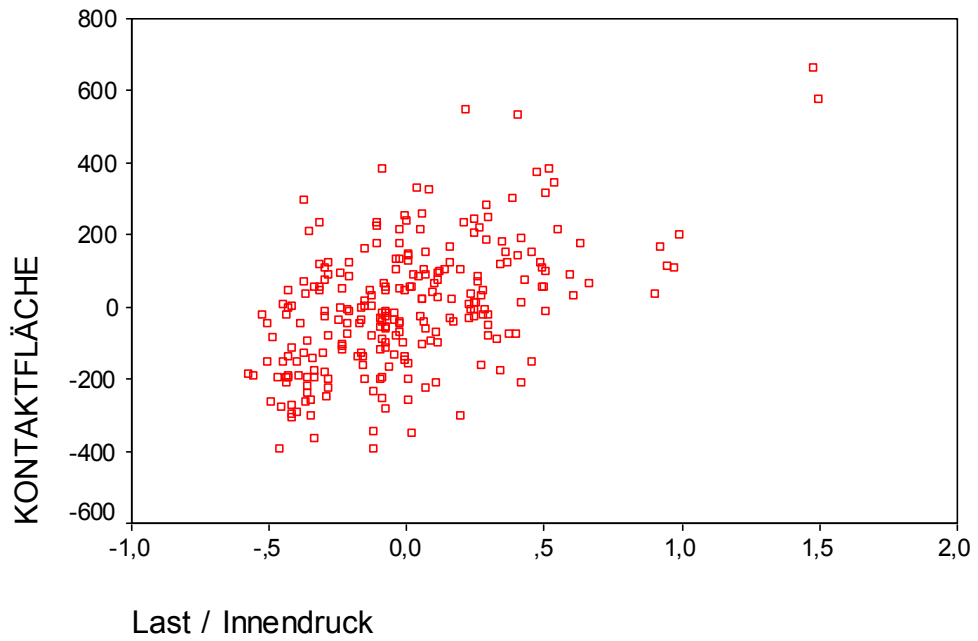
Partielles Regressionsdiagramm

Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



Partielles Regressionsdiagramm

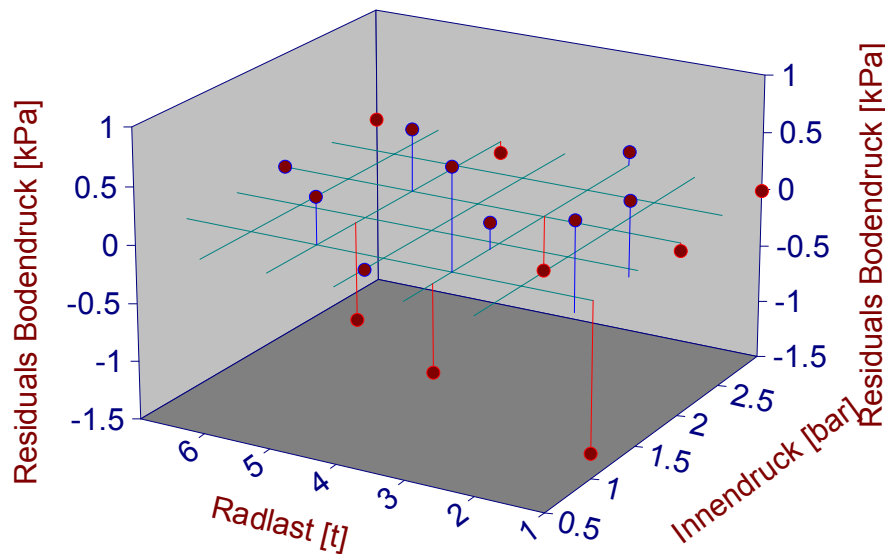
Abhängige Variable: KONTAKTFLÄCHE



9.4 Anlage 4: Reifenindividuelle Druckermittlung für Reifen N5

Residuen für Anpassungsgleichung vom Rang 1:

Reifen: N5
 Rank 1 Eqn 443 Chebyshev X, LnY Bivariate Polynomial Order 4
 $r^2=0.99995254$ DF Adj $r^2=0.99924057$ FitStdErr=1.6411772 Fstat=3009.6443

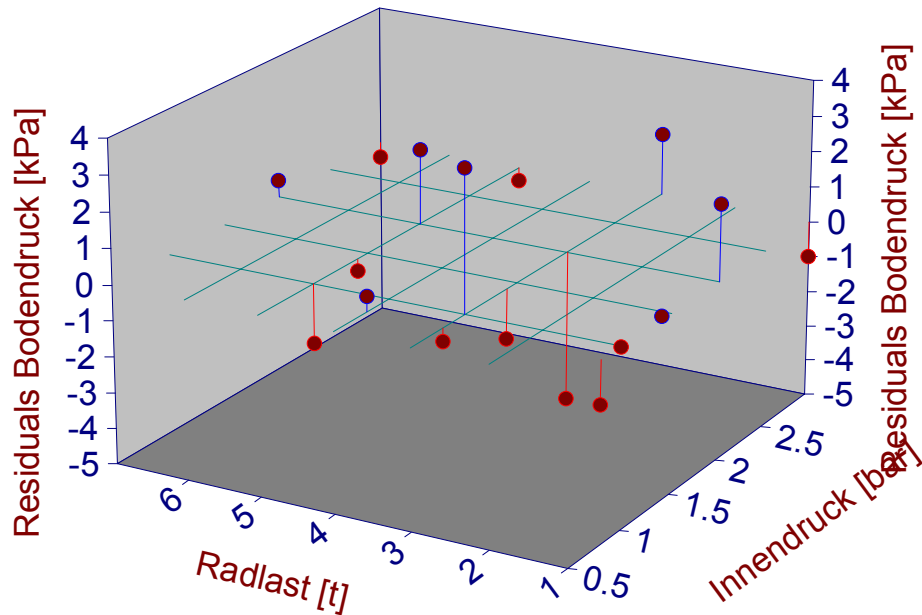


XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %	95.00% Confidence Lim		95.00% Prediction Lim	
1	3	7	388.45727	388.45727	-1.11e-16	-2.86e-17	381.39585	395.51869	378.47092	398.44362
2	3	5	321.44005	321.54193	-0.101878	-0.031694	314.49409	328.58977	311.56517	331.51868
3	3	3	246.10336	245.98756	0.1158052	0.0470555	238.95069	253.02443	236.01855	255.95657
4	3	1	148.80952	148.82345	-0.013928	-0.009359	141.76402	155.88288	138.83851	158.8084
5	2	7	345.67901	345.67901	2.22e-16	6.423e-17	338.6176	352.74043	335.69266	355.66536
6	2	5	290.27576	289.73241	0.5433476	0.1871832	283.06794	296.39689	280.02268	299.44214
7	2	3	214.82277	215.29176	-0.468992	-0.218316	208.88107	221.70246	205.75444	224.82909
8	2	1	132.89037	132.96472	-0.074355	-0.055952	125.97067	139.95877	123.02589	142.90355
9	1.4	5	254.97195	255.82093	-0.848981	-0.33297	249.77428	261.86759	246.5244	265.11747
10	1.4	3	196.07843	195.85656	0.2218674	0.1131524	190.32359	201.38954	186.88564	204.82748
11	1.4	1	119.61722	118.99011	0.6271132	0.5242666	112.42319	125.55703	109.34708	128.63314
12	1	5	225.83559	225.42808	0.4075107	0.1804457	218.58711	232.26905	215.59637	235.25979
13	1	3	183.82353	182.94903	0.8744956	0.4757256	176.95633	188.94174	173.6875	192.21057
14	1	1	111.48272	112.76473	-1.282006	-1.14996	107.04367	118.48578	103.6766	121.85285
15	0.8	4	193.51717	193.51717	4.857e-16	2.51e-16	186.45576	200.57859	183.53082	203.50352
16	0.8	3	169.68326	170.42643	-0.743176	-0.437978	163.74935	177.10352	160.70805	180.14482
17	0.8	1	106.04454	105.30136	0.7431758	0.7008147	98.624279	111.97845	95.582976	115.01975

Residuen für die verwendete Anpassungsgleichung vom Rang 20:

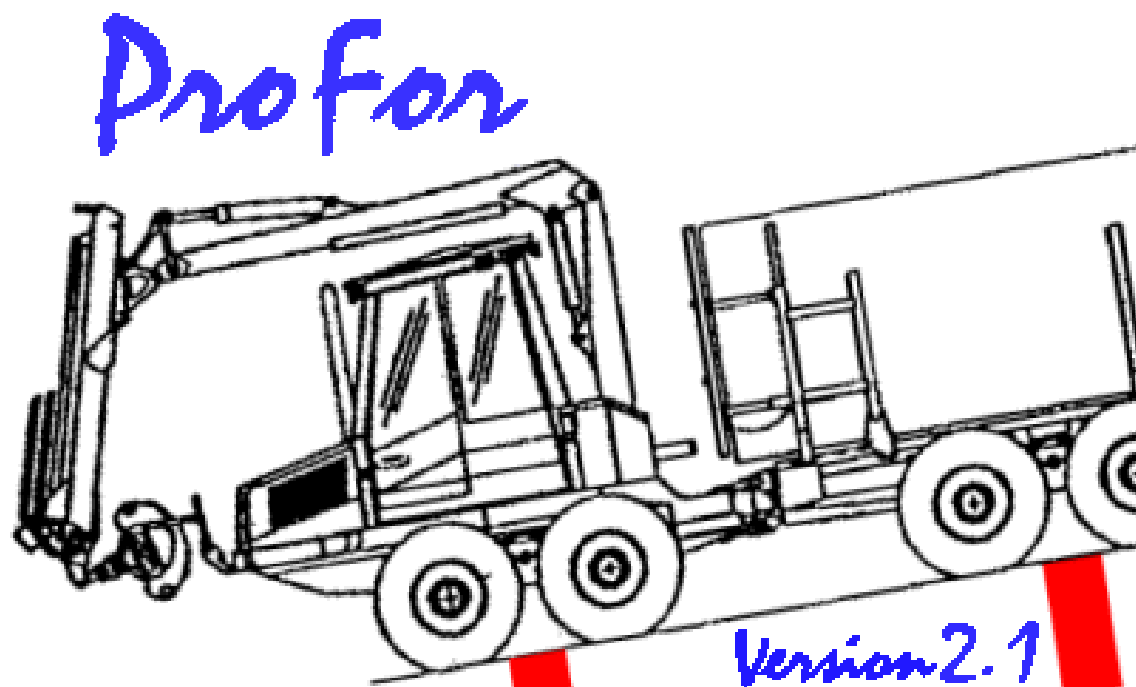
Reifen: N5

Rank 20 Eqn 310 $z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx+gx^3+hy^3+ixy^2+jx^2y$
 $r^2=0.99953863$ DF Adj $r^2=0.99876967$ FitStdErr=2.7350451 Fstat=1685.0115
 $a=59.434151$ $b=8.2870047$ $c=32.180803$ $d=-1.0794825$ $e=-4.107319$
 $f=19.044594$ $g=0.71862014$ $h=0.14149898$ $i=0.23082221$ $j=-3.3572055$



Rank 20 Eqn 310 $z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx+gx^3+hy^3+ixy^2+jx^2y$										
XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %	95.00% Confidence Lim		95.00% Prediction Lim	
1	3	7	388.45727	388.88709	-0.429825	-0.110649	382.72164	395.05255	379.9518	397.82239
2	3	5	321.44005	321.7973	-0.357253	-0.111141	316.75763	326.83698	313.59822	329.99639
3	3	3	246.10336	244.36857	1.7347909	0.7049034	238.77863	249.95851	235.82024	252.91691
4	3	1	148.80952	149.80895	-0.999424	-0.671613	143.46363	156.15426	140.74861	158.86928
5	2	7	345.67901	345.22347	0.4555456	0.1317828	339.07282	351.37411	336.29838	354.14855
6	2	5	290.27576	288.19054	2.0852197	0.7183582	282.94962	293.43146	279.86625	296.51484
7	2	3	214.82277	218.9721	-4.149327	-1.931512	214.67804	223.26616	211.20901	226.73519
8	2	1	132.89037	130.77618	2.1141807	1.590921	125.31913	136.23324	122.31414	139.23823
9	1.4	5	254.97195	255.2908	-0.318845	-0.125051	251.05431	259.52729	247.5594	263.0222
10	1.4	3	196.07843	197.44436	-1.36593	-0.696624	193.16942	201.7193	189.69183	205.1969
11	1.4	1	119.61722	119.51251	0.1047166	0.0875431	115.22235	123.80267	111.75157	127.27345
12	1	5	225.83559	227.4762	-1.64061	-0.726462	222.52654	232.42586	219.33214	235.62027
13	1	3	183.82353	179.89687	3.9266609	2.1361035	176.32162	183.47211	172.50708	187.28666
14	1	1	111.48272	111.49349	-0.010767	-0.009658	107.56053	115.42644	103.92415	119.06282
15	0.8	4	193.51717	193.10564	0.4115344	0.2126604	188.70264	197.50864	185.28176	200.92952
16	0.8	3	169.68326	170.06094	-0.377682	-0.222581	165.9687	174.15318	162.40763	177.71425
17	0.8	1	106.04454	107.22752	-1.182985	-1.115555	102.09742	112.35762	98.97255	115.4825

9.5 Anlage 5: Handbuch des Programmes ProFor



Hinweise
zum
Installieren und Bedienen
des
Programmes
ProFor
für MS-Windows 9X und Windows NT
M. Ziesak

ACHTUNG

Die Seitennummerierung entspricht jener des Originalhandbuches!

Inhaltsüberblick

1	Voraussetzungen	3
2	Installieren	3
2.1	Installieren der „Java runtime environment“	3
2.2	Installieren des Programms „ProFor“	4
2.3	Installieren eines Browsers	6
3	Bedienungsanleitung „ProFor“	6
3.1	Aufruf des Programms	6
3.2	Voreinstellungen und Optionen des Programms, Hilfesystem	6
3.3	Berechnungen erstellen	9
3.3.1	Eingabe Bodendaten	9
3.3.2	Eingabe Gerätedaten	10
3.4	Rechnergebnisse ansehen, drucken, speichern und laden	11
3.5	Softwareupdate und Datenaktualisierung	12
3.6	Das Verwalten eigener Maschinen- und Reifendaten	13

1 Voraussetzungen

Um das Programm „ProFor“ einsetzen zu können, muß ein Rechner zur Verfügung stehen, der ein Betriebssystem nutzt, für welches ein sogenanntes „Java runtime environment“¹ („JRE“) existiert. Für alle heute gängigen Betriebssysteme stehen derartige JREs in der Regel sogar kostenfrei zur Verfügung.

Die vorliegende Beschreibung des Installationsvorganges beschränkt sich allerdings in ihrer Erläuterung auf die aktuellen Betriebssysteme des Herstellers Microsoft, also „Windows 9X“, „Windows NT“ (ab Version 3.51), „Windows XP“ usw..

Sämtliche Programme, die für den Einsatz unter diesen Microsoft Betriebssystemen benötigt werden, sind auf der CD enthalten.

2 Installieren

Anmerkung: Die Reihenfolge der im folgenden aufgeführten Installationsschritte 2.1 bis 2.3 ist frei wählbar.

2.1 Installieren der „Java runtime environment“

Im Verzeichnis „JRE“ der Installations-CD ist die Datei „j2re-1_3_1-win-i.exe“ zu finden. Wird diese Datei gestartet (z.B. durch doppelten Mausklick im Dateimanager oder Explorer) so wird der Installationsvorgang für das „Java runtime environment“ begonnen. Zunächst werden die Lizenzbedingungen vorgestellt (Abb. 1), anschließend kann das Zielverzeichnis festgelegt werden (Abb. 2). Weitere Angaben sind von Nutzerseite nicht zu treffen.

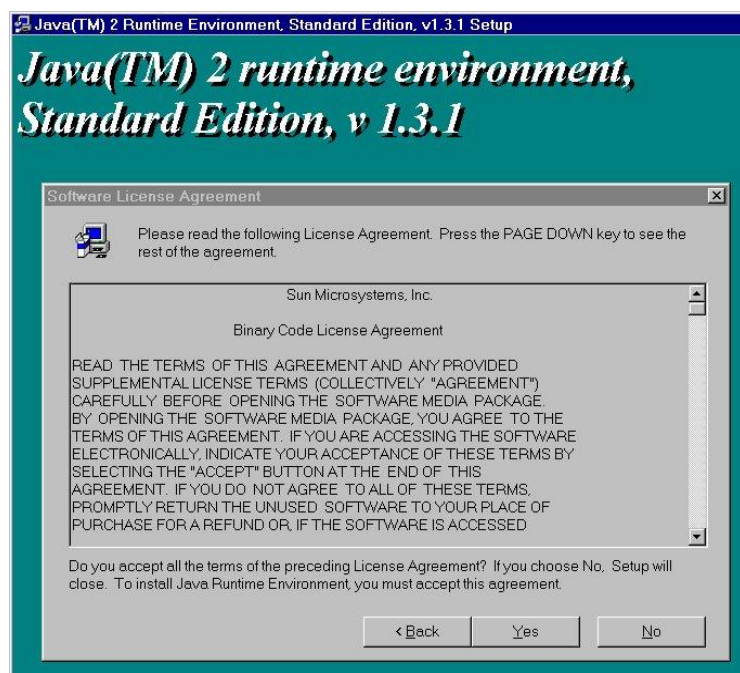


Abb. 1: Installieren der Java runtime environment

¹ Das „Java runtime environment“ ist ein Computerprogramm, das den Einsatz von in der Programmiersprache „JAVA“ entwickelten Programmen ermöglicht.

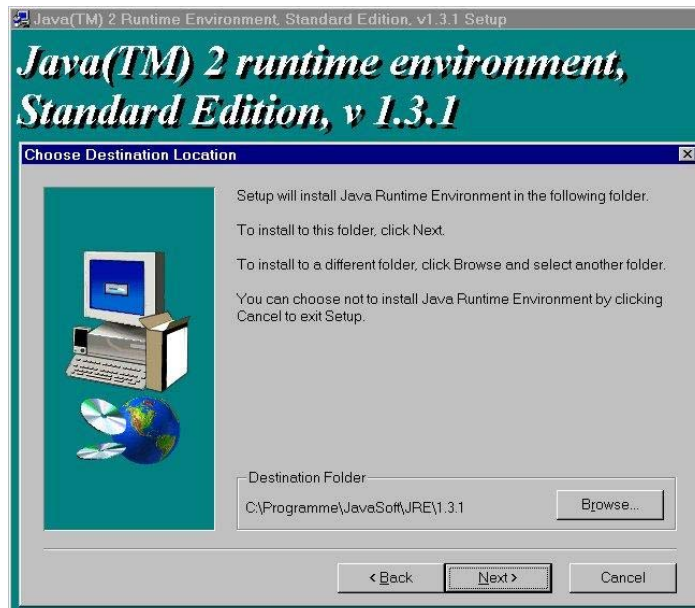


Abb. 2: Installieren der JRE, hier Auswahl des Zielverzeichnisses

Anmerkung 1: Weiterführende Produkthinweise zu der soeben installierten JRE der Firma „Sun“ sind jederzeit aktuell im Internet unter

<http://java.sun.com/j2se>

zu finden.

Anmerkung 2: Das Programm „ProFor“ nutzt die Java (TM) 2 runtime environment, Standard Edition, Version 1.3.1. Sollten Sie also bereits eine ältere JRE auf Ihrem Rechner installiert haben, so müssen Sie diesen Installationsschritt auf jeden Fall vornehmen, da ein fehlerfreies Funktionieren von „ProFor“ erst mit der genannten, aktuellen JRE sichergestellt ist!

2.2 Installieren des Programms „ProFor“

Die Installationsroutine für das Programm „ProFor“ ist im gleichnamigen Verzeichnis der CD zu finden.

Nach dem Aufruf der Datei "ProFor V2.1.EXE" beginnt der Installationsvorgang (Abb. 3). Folgen Sie nun schrittweise den Anweisungen.

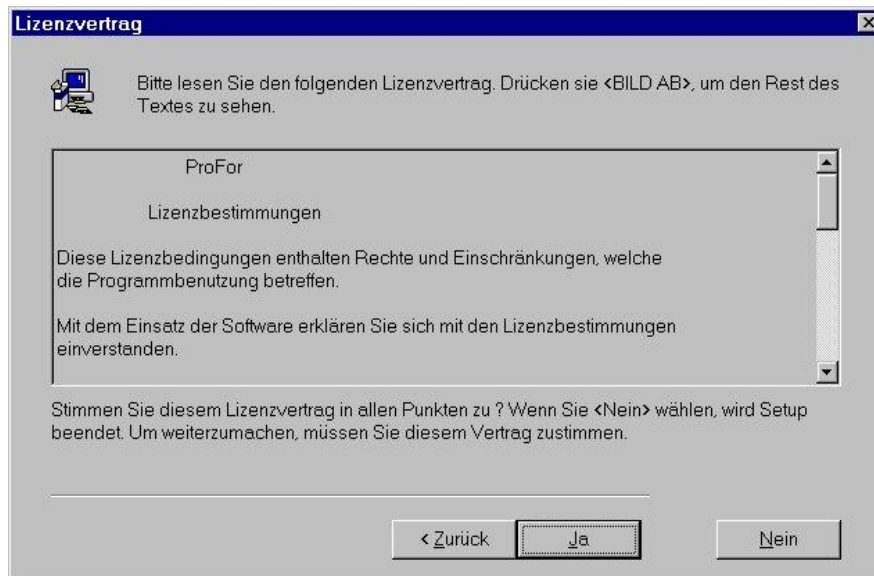
Zunächst muß man den Lizenzvertrag lesen und akzeptieren (Abb. 4), um dann das Zielverzeichnis zu wählen und schließlich die gewünschte Programmgruppe, der die Symbole zugeordnet werden sollen, zu bestimmen.

Nach Abschluß des Setup-Vorganges sollte an Ihrem Rechner die von Ihnen angegebene Programmgruppe (Abb. 6), und auf dem Desktop ein neues Symbol zu finden sein (Abb. 5).



Abb. 3: Nach dem Start der Setup-Routine für das Programm „ProFor“

Falls Sie das Programm zu einem späteren Zeitpunkt von Ihrem Rechner wieder entfernen wollen, so können Sie dies über das „Uninstall“-Programm machen. Dieses



ist in der von Ihnen während der Installation von „ProFor“ angegebenen Programmgruppe zu finden (siehe Abb. 6).

Abb. 4: Dialog während des Setupvorganges, hier zum Lizenzvertrag

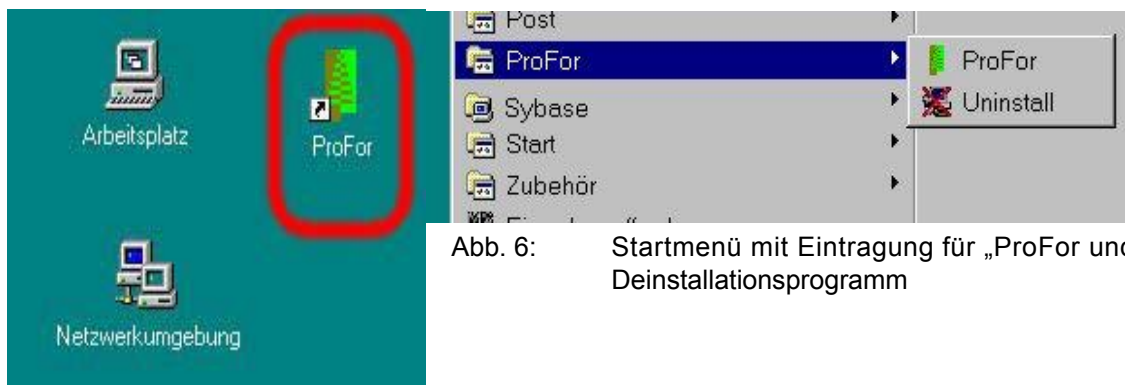


Abb. 6: Startmenü mit Eintragung für „ProFor und Deinstallationsprogramm

Abb. 5: Desktop mit Icon „ProFor“ (rot markiert)

2.3 Installieren eines Browsers

Da in den meisten Fällen bereits mit dem Betriebssystem ein Browser² installiert sein dürfte, wird auf eine ausgiebige Beschreibung des Setup-Vorganges verzichtet. Sollte auf Ihrem Rechner noch kein Browser installiert sein, so können Sie vom Verzeichnis „Browser“ der CD die deutsche Version 4.72 des „Netscape Communicator“ installieren (Verzeichnis „Browser“, Datei „cc32d472.exe“). Folgen Sie einfach den Anweisungen während des Installationsvorganges.

Anmerkung: Das Programm ProFor funktioniert auch ohne Browser. Der Browser wird nur zum Anzeigen der Hilfetexte benötigt. In der Wahl des Browserherstellers sind Sie frei, auch die Produkte anderer Hersteller sind geeignet (z.B. von der Firma Microsoft der „Internet Explorer“).

3 Bedienungsanleitung „ProFor“

Die Bedienung des Programms „ProFor“ entspricht den üblichen Standards der Windowsprogramme. Deshalb sei für die Grundoperationen wie Aktivieren oder Schließen eines Dialogfenster, usw. auf die Windows-Dokumentation verwiesen.

3.1 Aufruf des Programms

Der Programmaufruf kann über das Desktop-Icon (Abb. 5) oder über den Menüeintrag im Startmenü (Abb. 6) erfolgen.

Anmerkung: Hinter dem einfachen Doppelklick auf das Symbol verbirgt sich folgender Aufruf der „Java runtime environment“:
`javaw -cp Forst.jar Forst`

3.2 Voreinstellungen und Optionen des Programms, Hilfesystem

Nach dem allerersten Aufruf des Programms, sollte zunächst im Optionendialog (Menüaufruf über Daten -> Optionen) der Pfad zum (gegebenenfalls wie unter 2.3) installierten Browser angegeben werden (wie in Abb. 7). Ohne diese Angabe kann das kontextsensitive Hilfesystem nicht geladen werden!

Alle im „Optionen - Voreinstellungen“-Dialog getätigten Eingaben werden dauerhaft gespeichert. Deshalb langt die einmalige Angabe des Browserpfades aus.

Folgende Einstellungen können mit Hilfe diesen Dialoges festgehalten werden:
Registerfeld „Allgemein“:

- Angabe des Pfades zum Browser

² Ein Browser ist ein Computerprogramm, welches unter anderem das Betrachten von Dokumenten, meist aus dem Internet, ermöglicht.

- Angabe der WWW-Adresse für die Programm- und Datenaktualisierung über das Internet
Hier sollten im Regelfall keine Änderungen vorgenommen werden.
- Die Position aller verschiebbaren oder in der Größe veränderbaren Fenster kann gespeichert werden. Dabei merkt sich das Programm immer die kurz vor dem Schließen eines Fensters eingenommene Position. Sollen die Fensterpositionen dauerhaft, also auch über die Programmlaufzeit hinaus, gespeichert werden, so muß das Kästchen auch bis zum Programmende markiert bleiben.

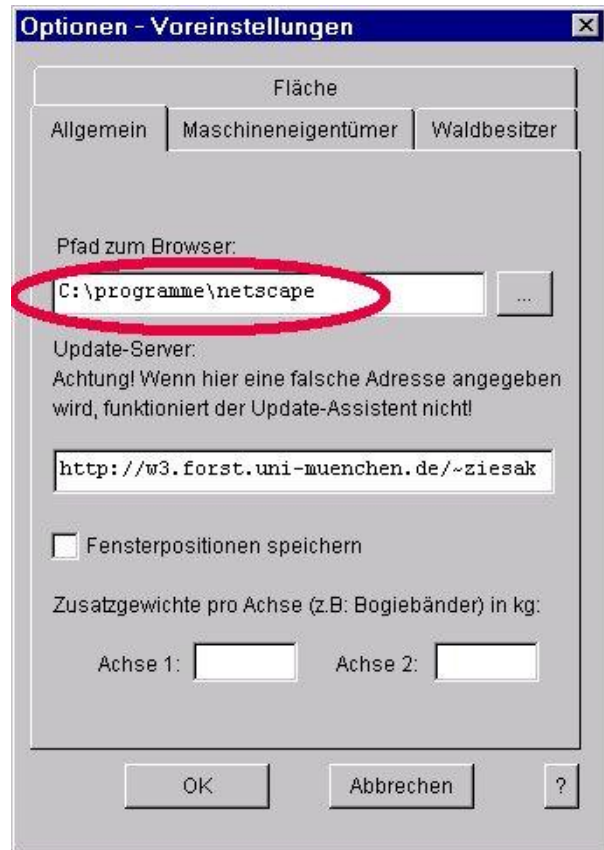


Abb. 7: Dialog zu den Voreinstellungen, markiert ist die Pfadangabe zum Browser

Registerfelder „Maschineneigentümer“, „Waldbesitzer“, „Fläche“:

Alle hier eingetragenen Werte finden keinen Eingang in die Berechnung, sie werden aber bei den beschreibenden Textangaben zu einem Einsatz für alle folgenden Berechnungen übernommen:

Name, Straße, Ort, Telefon, Fax; Forstamt, Revier, Distrikt, Abteilung, Unterabteilung, Bestand, Teilfläche und Kommentar

Mit dem Button „Felder löschen“ werden alle Eintragungen einer Seite gelöscht.



Die **Onlinehilfe** kann überall dort aufgerufen werden, wo dieser Button dargestellt ist (siehe Abb. 7 rechts unten).

Ist die Onlinehilfe geöffnet, so können Sie über die durch Unterstreichung markierten Verweise (siehe Abb. 8) im Hilfesystem navigieren.

Anmerkung: Ein mehrfaches Anklicken des „?“-Buttons öffnet auch mehrere Browser-Fenster, bei bereits geöffneter Hilfe sollten Sie also die Verweise des Hilfesystems nutzen.

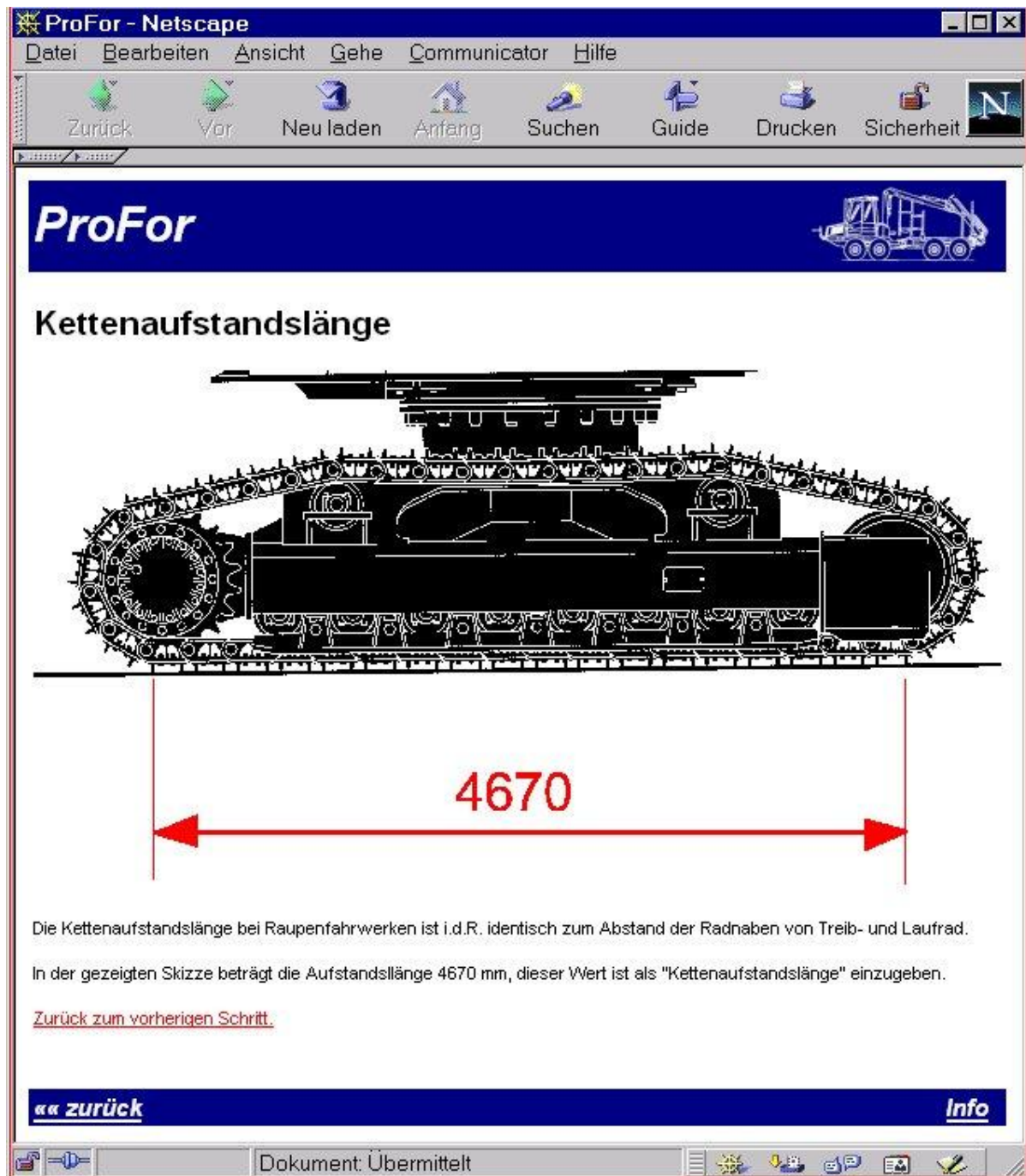


Abb. 8: Eine Beispielseite der Online-Hilfe.
Navigationsverweise sind durch Unterstreichung und gegenüber dem Standardtext veränderte Farbgebung markiert (z.B. „Zurück zum vorherigen Schritt“)

3.3 Berechnungen erstellen

In beliebiger Reihenfolge müssen vom Nutzer Angaben zum geplanten Befahrungsstandort, sowie zu der vorgesehenen Maschinenkonfiguration gemacht werden.

3.3.1 Eingabe Bodendaten

Im Dialogfeld Bodendaten (Aufruf über die Menüpunkte Daten -> Bodendaten...) wird im Registerfeld „Boden“ für die zur Befahrung vorgesehene Fläche folgendes eingegeben (siehe Abb. 9 und 10):

1. die Bodenarten*haupt*gruppe,
2. die Bodenarten*unter*gruppe,
3. der Humusgehalt,
4. die Wechselfeuchte,
5. der Skelettgehalt und
6. die Hangneigung.

Beachten Sie, daß bei der Eingabe exakt die oben aufgeführte Reihenfolge eingehalten werden muß. Dazu erscheinen die nötigen Auswahllisten erst

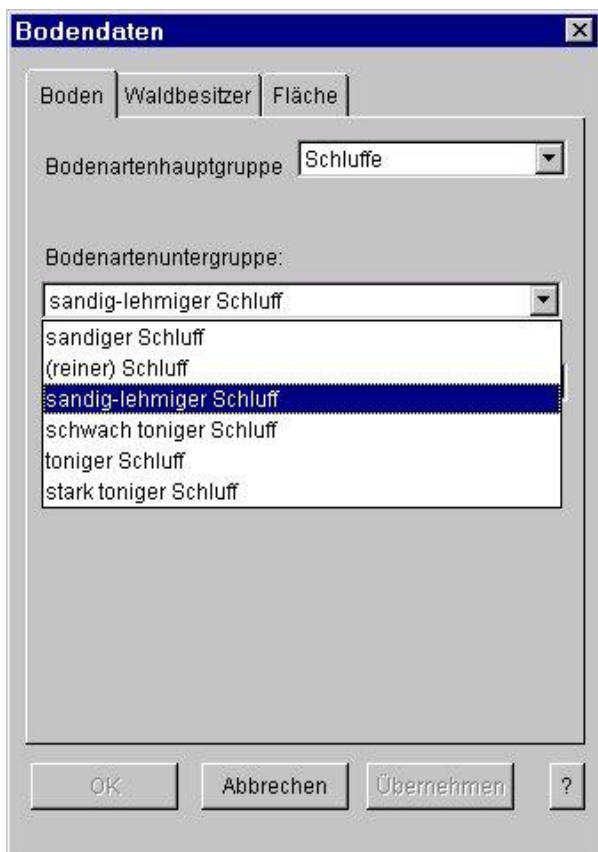


Abb. 9: Dialogfenster Boden, abgeschlossen ist die Wahl der Bodenartenhauptgruppe, die Bodenartenuntergruppe wird gerade gewählt

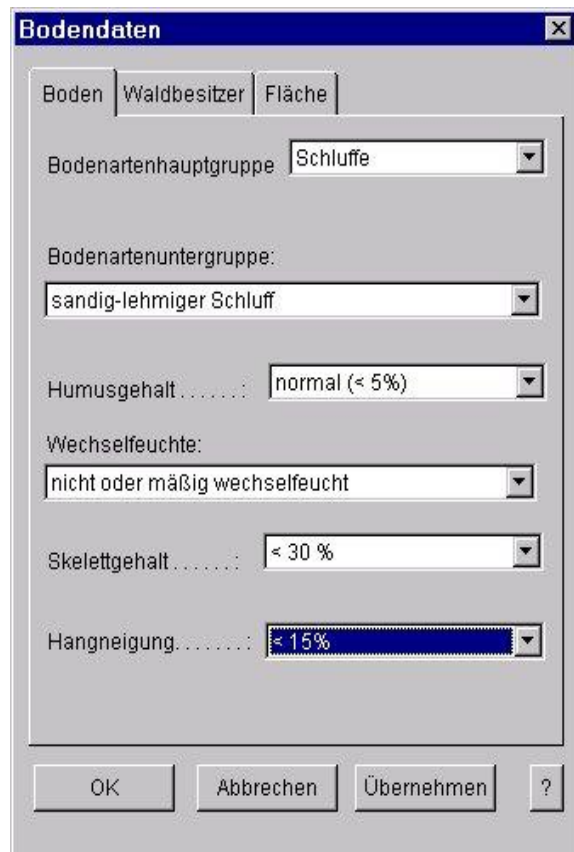


Abb. 10: Alle Charakteristika des Bodens sind eingegeben und die Knöpfe „OK“ und „Übernehmen“ sind nun aktiv.

nacheinander. Im Beispiel aus Abbildung 9 ist die Bodenartenhauptgruppe bereits gewählt, zur Auswahl geöffnet ist die Untergruppen-Liste, und das nachfolgende Merkmal (Humusgehalt) wird erst nach getätigter Untergruppenwahl gezeigt werden. Elemente werden nur dann dem Nutzer zur Auswahl vorgegeben, wenn diese einen Einfluß auf die Befahrungssituation haben. So ist z.B. bei Feuchtböden keine Unterscheidung nötig bei den Merkmalen Bodenartenuntergruppe, Humusgehalt, Wechselfeuchte, Skelettgehalt und Hangneigung, deshalb erscheinen sie auch nicht. Eine Berechnung kann erst ausgelöst werden, wenn alle nötigen Eigenschaften des Standortes angegeben wurden, erst dann werden die Buttons „OK“ und „Übernehmen“ aktiviert (wie in Abb. 10).

Mit „**Übernehmen**“ werden die getätigten Daten übernommen, und sofern bereits Gerätedaten eingegeben wurden, auch eine neue Berechnung durchgeführt. Das Fenster „Bodendaten“ bleibt für eine weitere Dateneingabe weiterhin offen.

Mit „**OK**“ werden die Daten ebenfalls übernommen, das Dialogfenster wird geschlossen und mit „**Abbrechen**“ wird das Fenster ohne Datenübernahme geschlossen.

Die optionalen Angaben zum Waldbesitzer und zur Fläche können in die weiteren Registerfelder eingetippt werden.

3.3.2 Eingabe Gerätedaten

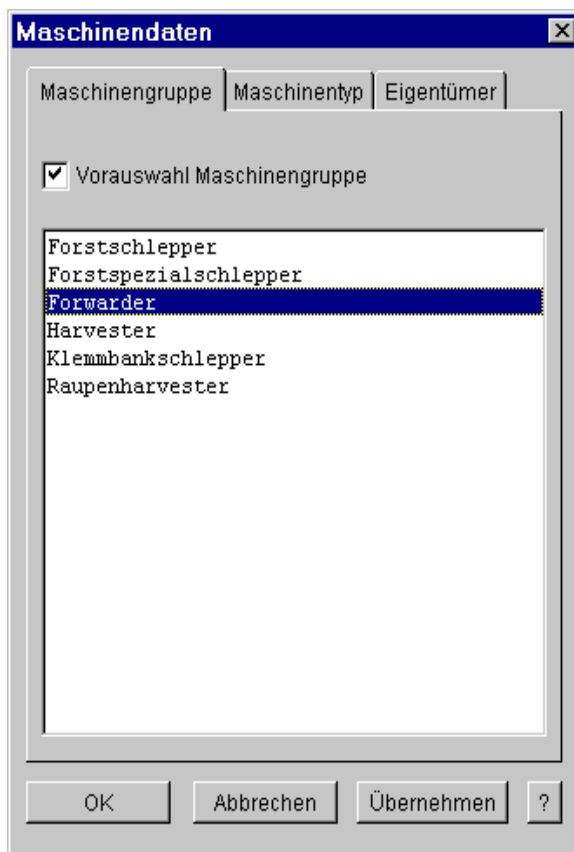


Abb. 11: Dialogfenster zur Aktivierung und Auswahl von Maschinengruppen (gewählt sind im Bild „Forwarder“)

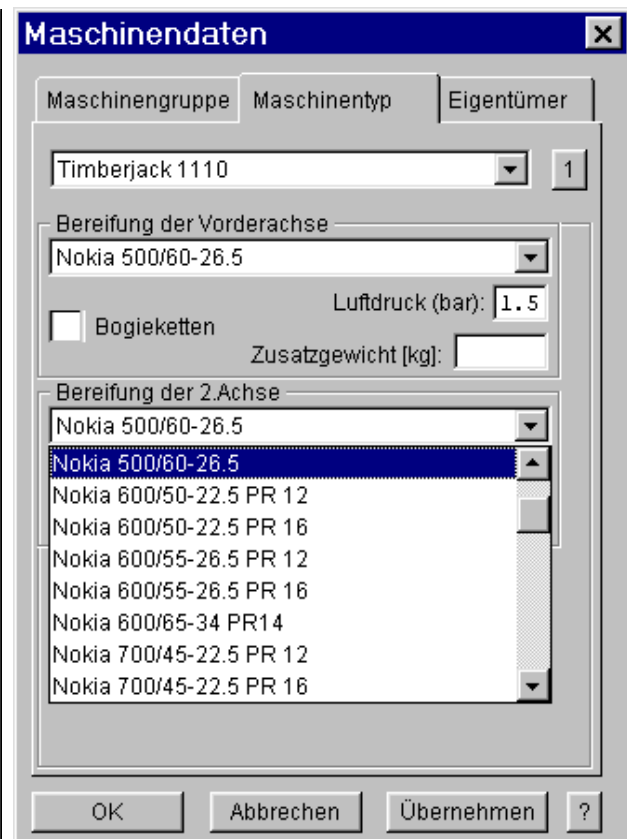


Abb. 12: Zuordnung von Reifen für eine zuvor ausgewählte Maschine. Hier werden gerade die Reifen der Hinterachse gewählt.


Im Dialogfeld Gerätedaten (Aufruf über Daten -> Gerätedaten...) kann im Registerfeld „Maschinengruppe“ eine Vorauswahl anhand der angezeigten Gerätetypen erfolgen (Abb. 11).

Die Auswahl der Maschine, sowie die Zuordnung der Bereifung an die Achsen und die Angabe des Reifeninnendruckes erfolgt unter dem Registerfeld „Maschine“ (Abb. 12). Beachten Sie, daß die Werte für den Reifenfülldruck im Bereich von 0,6 bis 5,0 bar liegen!

Zusatzgewichte verändern die Achslast der Forstmaschinen. Angaben hierzu sind z.B. beim Einsatz von Bogiebändern oder bei vom Maschinenbesitzer vorgenommenen Modifikationen sinnvoll.

WICHTIG: Die Nummerierung der Achsen erfolgt immer in Hauptfahrtrichtung (die Vorderachse ist somit die erste Achse).



Mit dem Schalter  (bzw. nach Umschalten mit „2“) (siehe Abb. 12, rechts oben) kann für eine gewählte Maschine eine weitere Bereifungs-, Luftdruck- oder Zusatzgewichtsvariante errechnet werden. Eine Alternativberechnung wird nur gerechnet, wenn die zweite Seite geöffnet ist (also der Schalter „2“ anzeigt) und die Originalkonfiguration in mindestens einem Wert (z.B. Luftdruck) verändert wurde.

Mit „**Übernehmen**“ werden die getätigten Daten übernommen, und sofern bereits Bodendaten eingegeben wurden, wird auch neu gerechnet. Das Fenster „Gerätedaten“ bleibt für eine weitere Dateneingabe offen.

Mit „**OK**“ werden die Daten ebenfalls übernommen, nun wird das Dialogfenster geschlossen und mit „**Abbrechen**“ wird das Fenster ohne Datenübernahme geschlossen.

Die optionalen Angaben zum Gerätebesitzer können unter dem Register „Maschineneigentümer“ eingetippt werden.

3.4 Rechnergebnisse ansehen, drucken, speichern und laden

Das Rechenergebnis wird im Hauptfenster angezeigt (Abb. 13). Zunächst werden die vom Nutzer angegebenen Geräte-, Reifen- und Standortdaten angezeigt, es folgen die errechneten Bodendrücke pro Achse und anschließend wird der bei Befahrung maximal tolerierbare Wassergehalt angezeigt.

Das Kalkulationsergebnis kann

- ausgedruckt werden (Menü Datei -> Drucken...),
- auf einem Datenträger unter einem vom Nutzer frei wählbaren Namen gespeichert werden (Menü Datei -> Speichern unter...) oder
- unter einem bereits zuvor angegebenen Dateinamen gespeichert werden (Menü Datei -> Speichern).

Auf einem Datenträger gespeicherte Rechenergebnisse werden über Datei -> Öffnen... erneut angezeigt.

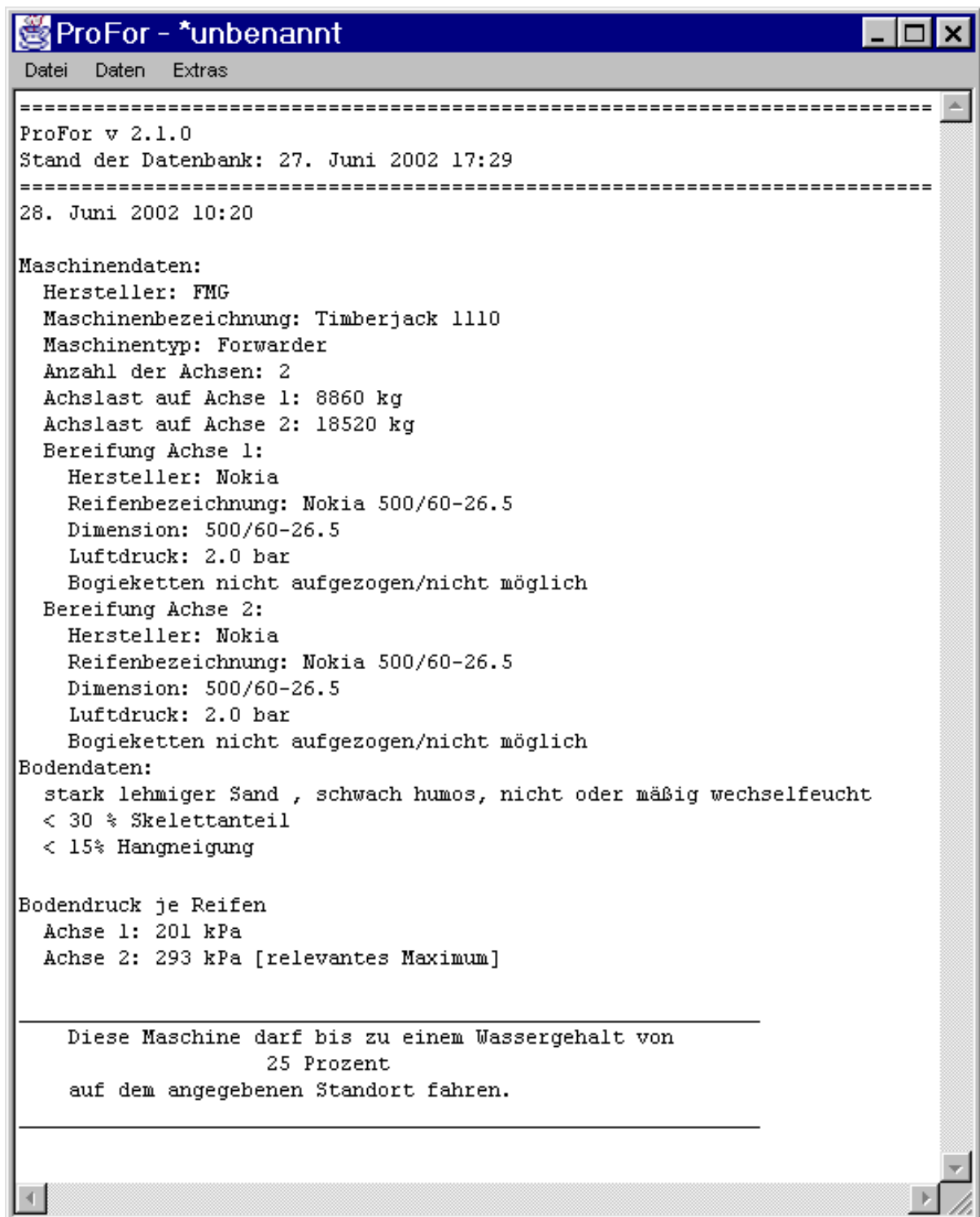


Abb. 13: Hauptfenster mit Rechenergebnis

3.5 Softwareupdate und Datenaktualisierung

Das Programm bietet zwei Wege für eine Aktualisierung des Datenbestandes und / oder der Programmversion selbst an:

1. über Datenträger (Diskette, CD, ...) oder
2. über das Internet.

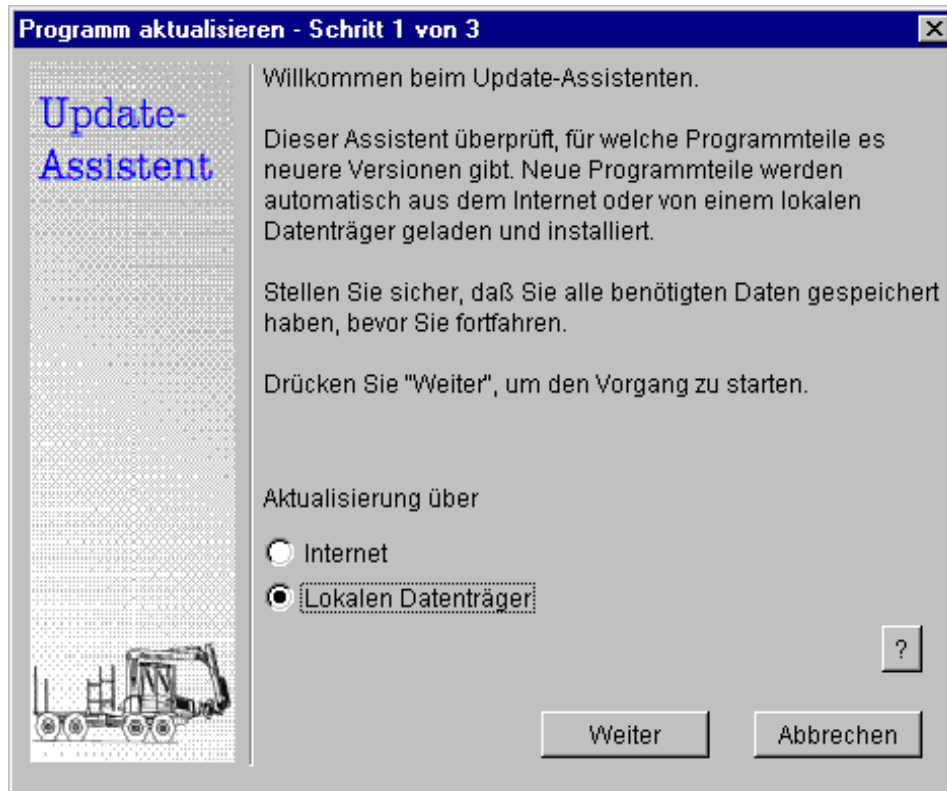


Abb. 14: Der „Update-Assistent“ zur Aktualisierung von Daten und Programm

Unter Extras -> Programm aktualisieren... wird der Update-Assistent aktiviert (Abb. 14). Je nach Situation kann hier nach einem Update über das Internet gesucht werden oder von einem lokalen Datenträger eine Aktualisierung vorgenommen werden. Folgen Sie hierzu den Anweisungsschritten des Updateassistenten.

Anmerkung: Das Update über das Internet klappt nur bei funktionierender Internetanbindung des Rechners!

3.6 Das Verwalten eigener Maschinen- und Reifendaten

Um eigene Daten zu Maschinen und Reifen verwalten zu können, bietet das Programm unter Daten -> Dateneingabe die Möglichkeit einen zusätzlichen, eigenen Datenbestand aufzubauen und zu verwalten. Dieser, vom Nutzer zu pflegende Datensatz ergänzt den nicht veränderbaren, mit dem Programm ausgelieferten Datenbestand.

Alle vom Nutzer angelegten Daten stehen transparent und gleichwertig in der Auswahl der Maschinen und Reifen zur Verfügung.

Allerdings werden in der Ergebnisdarstellung vom Nutzer eingegebene Daten durch ein *-Zeichen kenntlich gemacht.

Alle Tätigkeiten zur Datenmanipulation, das sind das Anlegen neuer Datensätze, sowie das Verändern und Löschen bereits bestehender Datensätze werden von einem „Dateneingabe-Assistenten“ (Abb. 15) unterstützt. Diesem „Assistenten“ müssen Sie

zunächst mitteilen, was Sie bearbeiten wollen: Maschinen- oder Reifen.

Im Folgedialog wird bei allen Tabellen (Maschinendaten, Reifendaten) festgehalten, ob Sie Daten neu eingeben wollen, ob Sie an bereits zuvor von Ihnen eingegebenen Daten Veränderungen vornehmen wollen oder, ob früher gespeicherte Daten gelöscht werden sollen.

Ein Ändern oder Löschen ist erst dann möglich, wenn ein Datensatz angewählt wurde (siehe Abb. 16, gewählt ist „Timberjack 1010“).



Abb. 15: Dateneingabe Assistent - Anfangsdialog zur Wahl der zu bearbeitenden Tabelle



Abb. 16: Dateneingabe Assistent - Wahl der Bearbeitungsart

Dateneingabe

Daten-eingabe Assistent

Maschine:

Maschinengruppe: Forwarder

Name:

Hersteller: FMG

Anzahl der Achsen: 2

Kettenfahrzeug:

Zurück Weiter Abbrechen

Abb. 17: Eingabe von Maschinendaten, hier mit noch nicht aktivem „Weiter“-Button

Dateneingabe

Daten-eingabe Assistent

Achse 1

Anzahl der Reifen: 2

Achslast (kg): 8000

Bogieachse:

Bogiebänder möglich:

Radnabenabstand (mm):

Zurück Weiter Abbrechen

Abb. 18: Fortsetzung der Maschinendateneingabe, „Weiter“-Button aktiv

In den nun folgenden Dialogen werden Sie vom Dateneingabe Assistenten aufgefordert, Daten einzugeben, bzw. zu ändern.

Beachten Sie, daß der Button zum Weiterschalten („Weiter“) grundsätzlich erst dann aktiv wird, wenn alle Felder ausgefüllt sind. In Abb. 17 fehlt z.B. noch die Angabe des Maschinennamens, der Button „Weiter“ ist noch in grauer Farbe als nicht bedienbar dargestellt.

Beachten Sie, daß weitergehende Erläuterungen zu den Einzelfeldern über die Onlinehilfe abrufbar sind.