



DIPLOMARBEIT Master's Thesis

Ableitung von Äquivalenzfaktoren zur Bewertung der Schädigung von Luftfahrzeugen bei der rechnerischen Dimensionierung von Flugbetriebsflächen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald Blab

und als verantwortlich mitwirkender Assistent

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Lukas Eberhardsteiner

am

Institut für Verkehrswissenschaften
Professur für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau

E 230

eingereicht an der
Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Ulrich Freudenthaler

0826133

Gudrunstraße 152/32
A – 1100 Wien

I DANKSAGUNG

Der größte Dank gilt meinen Eltern und meinen Schwestern, die mir all die Jahre des Studiums beiseite gestanden haben. Nicht zuletzt durch die konstante finanzielle Unterstützung war es mir möglich, mein Studium in so kurzer Zeit und mit äußerst zufriedenstellendem Erfolg abzuschließen. An dieser Stelle erwähne ich auch meine Großeltern, die durch ihre Fürsorge und ihr Zutun ebenfalls maßgebend zu meinem Gelingen beigetragen haben.

Dank und Anerkennung gilt Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Lukas Eberhardsteiner, der mich als Betreuer stets freundlich und mit Geduld bei der Erarbeitung meiner Diplomarbeit unterstützt hat und sich jederzeit meiner Fragen und Problemstellungen annahm. Auch bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald Blab bedanke ich mich an dieser Stelle für die professionelle Beratung und Zusammenarbeit.

Des Weiteren danke ich meinen Studienkollegen, die dazu beigetragen haben, das ansonsten so kräftezehrende Studium zu einem unvergesslichen Abschnitt meines Lebens zu machen. Beim Namen möchte ich vor allem Dominik Steinhauser und Michael Berger nennen, mit denen gemeinsam ich die größten Hürden erfolgreich bestritt und die ich inzwischen zu den Besten meiner Freunde zählen darf.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Schranz, M.Sc., der mir nicht nur die Möglichkeit gab, als Studienassistent am EDV-Zentrum zu arbeiten, sondern auch als wertvoller Ratgeber und Freund verlässlich zur Seite stand.

II KURZFASSUNG

Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte zeigen, dass die Flugzeugindustrie zu immer größer werdendem Fluggerät tendiert. Aktuell bildet der Airbus A380 mit einer Höchstmasse von 560 Tonnen die Spitze. In Kombination mit den ebenso komplexer werdenden Radkonfigurationen ergeben sich daraus sehr hohe Belastungen für den Oberbau von Flugbetriebsflächen. Da im Hinblick auf einen unterbrechungsfreien Betrieb unbedingt ausreichende Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten ist, muss einer korrekten Bemessung große Aufmerksamkeit zuteilwerden. Bisher zur Anwendung gekommene Verfahren ruhen meist auf empirischer Basis und führen wegen der notwendigen, hohen Systemreserven oft zu unwirtschaftlichen Bemessungsergebnissen. Deshalb wurde am Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien eine Österreichische Methode entwickelt, welche auf analytischen Ansätzen der konkreten mechanogenen und klimatischen Beanspruchungen beruht.

Diese Arbeit beschäftigt sich zunächst mit der historischen Anwendung von Bemessungsmethoden sowie den nationalen und internationalen Rahmenbedingungen. Eine Rolle spielt vor allem die ICAO, die internationale Zivilluftfahrtsbehörde, die etliche Vorgaben zur Bewertung der Tragfähigkeit, nicht aber zur Bemessung gibt. Außerdem wird genauer auf das gängige Bemessungsverfahren der USA eingegangen, da dort seit jeher große Bemühungen zur Vereinheitlichung sämtlicher Belange der Luftfahrt getätigt werden. Im Anschluss wird die Vorgehensweise der neuen Österreichischen Bemessungsmethode im Detail erläutert. Ein Hauptaugenmerk wird dabei auf die Ermittlung der Aggressivitätszahlen gelegt. Diese stellen einen wichtigen Bestandteil der Österreichischen Methode dar, da sie eine Gewichtung der Auswirkungen einzelner Flugzeugmuster ermöglichen. Es werden zu diesem Zweck die Rahmenbedingungen des Flughafens Wiens berücksichtigt und beispielhaft Berechnungen an halbstarren und starren Oberbauten durchgeführt. Nach einer Gegenüberstellung der Ergebnisse, mit jenen des Flughafens Wiens, können diesbezüglich Aussagen zur Plausibilität gemacht werden. Das letzte Kapitel der Arbeit behandelt die Ausbildung und Verteilung von Fugen bei starren Oberbauten.

III ABSTRACT

Developments in previous decades show that the aviation industry tends to produce aircraft increasing in size and weight. At the moment the Airbus A380 heads the list with some 560 tons maximum mass. In combination with quite complex types of landing gears these high masses lead to extensive loads on the pavements of airports. Correct pavement design is of significant importance as operation has to proceed unobstructed. Thus, sufficient usability must be ensured. Previously used methods are usually based on empirical research and therefore often result in uneconomic outcomes with high reserves. That is why the Institute of Transportation of the Vienna University of Technology developed an Austrian method which is based on an analytic approach regarding to the mechanical and climatical inputs.

At the beginning of this master thesis, a chapter presents general information of the historic usage of pavement design methods and the national and international conditions. The ICAO, the International Civil Aviation Organization, which gives requirements for pavement evaluation, not for design though, is of particular relevance. Furthermore the current design method of the USA is described, as aviation has always played a major role in this country. Afterwards the procedure of the new Austrian method is discussed in detail. The main chapter of this master thesis describes the determination of the aggressiveness factors. They represent a main part of the Austrian method since they allow the determination of the effects of different aircraft types. For this purpose the frame conditions of the Vienna International Airport are considered and examples are shown for semirigid and rigid pavements. After the comparison of the results with those of the Vienna Airport a conclusion regarding the plausibility can be given. The last chapter deals with types of joints and joint layout of rigid pavements.

IV ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

$A_{LFZ,i}$	Aggressivitätszahl des bemessungsrelevanten LFZ vom Typ i
AC	Asphalt Concrete
AC	Advisory Circular
ACN	Aircraft Classification Number
BLFZ	Bemessungsluftfahrzeug
C	(Teil-)Schädigungsrate
CBR	California Bearing Ratio
CDF	Cumulative Damage Factor
CG	Center of Gravity
DSWL	Derived Single Wheel Load
E	Elastizitätsmodul
ESWL	Equivalent Single Wheel Load
FAA	Federal Aviation Administration (USA)
FOD	Foreign Object Damage
FAARFIELD	FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSS	Frostschuttschicht
HFW	Hauptfahrwerk
ICAO	International Civil Aviation Organization
k	Bettungsmodul
LFZ	Luftfahrzeug
LEAP	Layered Elastic Analysis Program
MRGM	Maximum Ramp Gross Mass
MRW	Maximum Ramp Weight
μ	Querdehnzahl
n	Bemessungsperiode

NAPTF	National Airport Pavement Test Facility
N_{erf}	Anzahl der erforderlichen Lastwechsel
N_{zul}	Anzahl der zulässigen Lastwechsel
ÖAL	Österreichischer Arbeitskreis für Lärmbekämpfung
OK	Oberkante
p	Prognostizierte mittlere jährliche Zuwachsrage an Starts von LFZ
P/C	Pass-to-Coverage
PCA	Portland Cement Association
PCN	Pavement Classification Number
ST-Z	Zementstabilisierte Tragschicht
TS	Tragschicht
UP	Unterbauplanum
z	Zuwachsfaktor
ZGKK	Zentralgemischtes Kantkorn

V INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Zielsetzung.....	3
1.2	Begriffsbestimmungen.....	4
1.3	Fahrwerkskonfigurationen	5
2	BEMESSUNGSMETHODEN VON FLUGBETRIEBSFLÄCHEN	8
2.1	Allgemeines	8
2.2	Rechtliche Grundlagen.....	10
2.2.1	Internationale Bestimmungen	10
2.2.2	Nationale Bestimmungen.....	12
2.3	Geschichtliche Entwicklung.....	13
2.4	Bemessungsdiagramme.....	14
2.4.1	PCA – Methode	14
2.4.2	U.S. Army Corps of Engineers	16
2.4.3	Schlussfolgerung	18
2.5	USA	18
2.5.1	Rahmenbedingungen.....	20
2.5.2	Bemessungskonzept.....	21
3	ACN/PCN – METHODE	25
3.1	Einleitung	25
3.2	Bestimmung des ACN-Werts.....	29
3.3	Bestimmung des PCN-Wertes.....	32
3.3.1	Nutzung von Erfahrungen mit Luftfahrzeugen	32
3.3.2	Technische Bewertung	34
3.4	Überlastbetrieb.....	35
4	NEUE ÖSTERREICHISCHE BEMESSUNGSMETHODE.....	37
4.1	Bemessungskonzept.....	37
4.1.1	Einwirkungsseite.....	38
4.1.2	Widerstandsseite	39
4.1.3	Dimensionierung.....	39
4.2	Bemessungsluftfahrzeug.....	40
4.3	Untergrundtragfähigkeit.....	43
4.4	Halbstarre Bauweise	45
4.4.1	Schichtenaufbau	45
4.4.2	Spannungsermittlung.....	46
4.4.3	Festigkeitshypothese	48
4.4.4	Schadensmodell	49

4.4.5	Materialeigenschaften.....	50
4.4.6	Bemessung.....	51
4.5	Starre Bauweise.....	52
4.5.1	Schichtenaufbau.....	52
4.5.2	Spannungsermittlung.....	54
4.5.3	Schadensmodell.....	58
4.5.4	Bemessung.....	60
5	AGGRESSIVITÄTSZAHLEN FÜR HALBSTARRE AUFBAUTEN.....	62
5.1	Vorgehensweise.....	62
5.2	Eingangsparameter.....	64
5.2.1	Materialkennwerte.....	64
5.2.2	Schichtenaufbau.....	71
5.2.3	Belastungsdaten der Flugzeugflotte.....	72
5.3	Berechnungsergebnisse.....	74
5.4	Unterschiede zur Berechnung mit FAARFIELD.....	78
5.4.1	Elastizitätsmoduln.....	78
5.4.2	Schadensmodell.....	81
5.5	Gegenüberstellung.....	82
5.6	Bemessungsbeispiel.....	83
6	AGGRESSIVITÄTSZAHLEN FÜR STARRE AUFBAUTEN.....	87
6.1	Vorgehensweise.....	87
6.2	Eingangsparameter.....	87
6.2.1	Materialkennwerte.....	87
6.2.2	Schichtenaufbau.....	88
6.2.3	Belastungsdaten der Flugzeugflotte.....	89
6.3	Berechnungsergebnisse.....	90
6.4	Unterschiede zur Berechnung mit FAARFIELD.....	93
6.4.1	Elastizitätsmoduln.....	93
6.4.2	Schadensmodell.....	94
6.4.3	Plattenanordnung.....	95
6.5	Gegenüberstellung.....	96
7	FUGEN BEI STARREN OBERBAUTEN.....	98
7.1	Arten von Fugen.....	99
7.1.1	Scheinfugen.....	99
7.1.2	Pressfugen.....	101
7.1.3	Raumfugen.....	101
7.2	Fugenverschluss.....	103
7.2.1	Heißverguss.....	104
7.2.2	Kaltverguss.....	104

7.2.3 Fugenprofile.....	104
7.3 Anordnung von Fugen.....	105
8 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT.....	106
9 LITERATURVERZEICHNIS	107
10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	110
11 TABELLENVERZEICHNIS	112
ANHANG	113
Inputfile BLFZ (AC 35, Periode 1)	113

1 EINLEITUNG

Spätestens als im Jahre 1912 der Flughafen Wien-Aspern eröffnet wurde, begann in Österreich die Ära der Luftfahrt. Zunächst vorrangig für militärische Zwecke genutzt, wurden die Flugplätze erst nach und nach für den zivilen Luftverkehr freigegeben und es entstanden große Verkehrsflughäfen. Da in frühen Jahren die Größe und Masse der Flugzeuge noch unbedeutend klein und somit die Belastung der Start- und Landebahnen stark begrenzt war, musste der Bemessung zunächst keine große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Erst im Laufe der Entwicklung, vor allem in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg, wurden die Abflugmassen immer höher und die Fahrwerkskonfigurationen weitaus komplexer. Spätestens nach Indienststellung des „Jumbos“, der Boeing 747, im Jahre 1970, der sämtliche bis zu diesem Zeitpunkt gebauten Flugzeuge in Bezug auf Masse und Größe in den Schatten stellte, wurden die Anforderungen an die befestigten Flächen der Flughäfen ganz wesentlich erhöht und es mussten gezielte Methoden entwickelt werden, um der Beanspruchungen Herr zu werden und einen sicheren und wartungsfreien Flugbetrieb zu gewährleisten.

Während die korrekte und nachhaltige Bemessung von Straßen in Österreich von allgegenwertigem Interesse und großer Wichtigkeit ist, vor allem aus Sicht der Bevölkerung, scheinen Flugbetriebsflächen diesbezüglich einen Nischenplatz innezuhaben. Alleine das hochrangige Straßennetz der ASFINAG umfasst eine Länge von 2.178 km [ASFINAG, 2014], was jedoch nur in etwa 2 % der Gesamtlänge entspricht. Inklusive Land- und Gemeindestraßen, bedurften in Österreich insgesamt gut 124.587 Straßenkilometer [bmvit, 2014] einer Bemessung durch Straßenplaner. Im Gegensatz dazu gibt es lediglich 6 nennenswerte Verkehrsflughäfen, die von nationalen und internationalen Fluggesellschaften angefliegen werden, allen voran – mit großem Abstand – der Flughafen Wien-Schwechat. Dennoch ist die korrekte Ausführung von Flugbewegungsflächen, vor allem der Pisten, von großer, unter anderem wirtschaftlicher Bedeutung. Muss eine Straße wegen aufgetretener Schäden oder auch wegen planmäßiger Überholung gesperrt werden, so können durch Maßnahmen, wie dem Sperren eines Fahrstreifens oder schlimmstenfalls einer Umleitung des Verkehrs, die Unannehmlichkeiten stark in Grenzen gehalten werden. Müsste hingegen die Start- und Landebahn eines kommerziellen Verkehrsflughafens aus oben genannten Gründen gesperrt werden, würde dies nicht nur den Unmut der Fluggäste und Airlines nach sich ziehen, sondern würde wesentliche finanzielle Auswirkungen für den Flughafenbetreiber bedeuten. Besonders auf Flughäfen mit nur einer Start- und Landebahn würde dies einen vollständigen Verkehrsstillstand zur Folge haben. Aus diesem Grund muss die Sanierung,

die in regelmäßigen Abständen stattzufinden hat, abschnittsweise bei Nacht erfolgen, während tagsüber ein gefahrenfreier Flugbetrieb möglich sein muss. Diese notwendige Vorgehensweise führt zu längeren Bauzeiten und zu höheren Kosten, nicht zuletzt wegen der hohen Vorhaltekosten und der Zuschläge für Nacharbeit. Schon aus diesem Grund ist es von beachtlichem wirtschaftlichen Interesse, durch eine sinnvolle Bemessung für möglichst große Intervalle der Sanierungsarbeiten zu sorgen.

Eine erhebliche Komplikation bei diesem Sachverhalt stellt jedoch die Tatsache dar, dass sich die Dimensionierung von Flugbetriebsflächen wesentlich von jener der Straßen unterscheidet. Ursache hierfür ist der grundlegend verschiedene Charakter der Belastung: Während Straßen durch vergleichsweise geringe Radlasten der LKWs von maximal 5,75 Tonnen beansprucht werden, belasten Flugzeuge die Pisten mit Radlasten von bis zu 26 Tonnen, wobei die Tendenz bei zukünftigen Flugzeugmustern eher als steigend zu sehen ist. Berücksichtigt man dabei die Größe der Räder und somit die Aufstandsfläche, ergeben sich auf Flugbetriebsflächen um knapp 50 % vergrößerte Kontaktspannungen. Im Gegensatz zur höheren Belastung, ist dafür die Anzahl der Lastübergänge stark vermindert. Sind auf hochrangigen Straßen bis zu 2.000 Fahrzeuge pro Stunde denkbar, so sind die Flugbewegungen pro Piste aufgrund betrieblicher und sicherheitsbezogener Einschränkungen auf ca. 60 pro Stunde beschränkt. Darüber hinaus ist die Überrollungshäufigkeit auf Start- und Landebahnen wesentlich geringer. Sämtliche KFZ haben im Wesentlichen eine ähnliche Spurweite und überrollen die Fahrstreifen entlang derselben Linie, worin auch die Entstehung der Spurrinnen begründet liegt. Flugzeuge hingegen weisen, unter anderem in Abhängigkeit ihrer Größe, sehr unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen und Spurweiten auf. Die breite Streuung der Belastung ist in Abbildung 1 ersichtlich.



Abbildung 1: Spurverteilung auf einer Landebahn

Aufgrund dieser Unterschiede können die gebräuchlichen Verfahren zur Dimensionierung von Straßen nicht in derselben Art und Weise bei Flugbetriebsflächen angewendet werden.

Da in Österreich jedoch eher selten ein Flughafen gebaut oder erneuert wird, gibt es kaum Firmen oder Institutionen, die sich auf diesen Fachbereich spezialisiert haben.

Initiiert vom Betreiber des Flughafen Wiens, der diesen Nachteil erkannt hatte, wurde im Jahr 2010 eine Projektgruppe ins Leben gerufen, die sich dieser Problemstellung annehmen sollte. Ziel war ein möglichst realitätsnahes und wirtschaftliches Modell zur Bemessung von Flugbewegungsflächen, besonders im Hinblick auf die geplante dritte Piste am Flughafen Wien-Schwechat. Unter der Leitung der *Flughafen Wien AG* wurde vom Projektteam eine neue Österreichische Bemessungsmethode zur Dimensionierung von Flugbetriebsflächen entwickelt. Beteiligt daran waren vor allem Mitarbeiter des Instituts für Verkehrswissenschaften (Fachbereich für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau) und des Instituts für Geotechnik (Professur für Grundbau, Boden- und Felsmechanik) der TU Wien sowie ein externer Konsulent aus der Privatwirtschaft.

1.1 Zielsetzung

Ausgehend von Bestimmungen der internationalen Zivilluftfahrtsbehörde, der *International Civil Aviation Organization* (ICAO), bedürfen nur Bewegungsflächen für Verkehrsflugzeuge mit einer höchsten zulässigen Startmasse von mindestens 5.700 kg eines bemessungstechnischen Nachweises; bei Flächen für Luftfahrzeuge mit Massen unterhalb dieses Wertes wird lediglich eine Benützungsbewilligung gefordert – sie werden somit außer Betracht gelassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, zunächst einen grundsätzlichen Überblick über verschiedene Befestigungsarten und Bemessungsmethoden für Flugbetriebsflächen zu schaffen. Dabei werden starre und halbstarre Aufbauten betrachtet. Flexible Aufbauten und insbesondere Pflasterbefestigungen bleiben aufgrund der geringen Relevanz unberücksichtigt. Neben einem kurzen geschichtlichen Abriss soll in erster Linie auf die Regularien der US-amerikanischen Federal Aviation Administration (FAA) eingegangen werden. Dies liegt darin begründet, dass aufgrund der sehr hohen Anzahl an Verkehrsflughäfen in den USA seit vielen Jahrzehnten Bemühungen zur Vereinheitlichung angestellt werden; selbst die ICAO verweist beispielhaft auf die Bemessungsmethoden der USA. Besondere Aufmerksamkeit soll schließlich der neuen Österreichischen Bemessungsmethode zuteilwerden. Neben der allgemeinen Vorgehensweise wird die Ermittlung der Aggressivitätszahlen erläutert und am konkreten Beispiel des Flughafen Wiens aufgezeigt. Das abschließende Kapitel behandelt die Ausbildungsmöglichkeiten sowie die Verteilung von Fugen in starren Oberbauten.

Nicht Teil dieser Arbeit soll die Projektierung von Flugbewegungsflächen sein. Diesbezüglich kann auf die Richtlinien der ICAO verwiesen werden.

1.2 Begriffsbestimmungen

- „LUFTFAHRZEUGE sind Fahrzeuge, die sich zur Fortbewegung von Personen oder Sachen in der Luft ohne mechanische Verbindung mit der Erde eignen, gleichgültig, ob sie schwerer als Luft (zum Beispiel Flugzeuge, Segelflugzeuge, Hänge- oder Paragleiter, Schwingenflugzeuge, Hubschrauber, Tragschrauber und Fallschirme) oder leichter als Luft (zum Beispiel Luftschiffe und Freiballone) sind.“ [LFG, 1957]
- „FLUGHAFEN ist ein öffentlicher Flugplatz, der für den internationalen Luftverkehr bestimmt ist und über die hierfür erforderlichen Einrichtungen verfügt.“ [LFG, 1957]
- FLUGBETRIEBSFLÄCHEN sind sämtliche Bereiche auf der „airside“ eines Flughafens, die planmäßig zum Bewegen von Luftfahrzeugen vorgesehen sind. Dazu gehören Pisten, Rollwege, das Vorfeld und in weiterer Hinsicht auch die Bodenbeläge der Hangars, welche identisch zum Vorfeld zu bemessen sind.
- VORFELD: Eine definierte Fläche auf einem Flughafen, die für die Abfertigung von Luftfahrzeugen bestimmt ist. Es dient als Abstellfläche für Luftfahrzeuge und ermöglicht das Ein- und Aussteigen von Fluggästen am Terminal sowie das Be- und Entladen mit Fracht. Neben der Betankung werden auch Wartungsarbeiten durchgeführt.
- ROLLWEGE: Festgelegte Strecken auf einem Flughafen, die zum planmäßigen Rollen von Luftfahrzeugen bestimmt sind. Sie verbinden verschiedene Bereiche, wie zum Beispiel die Pisten mit dem Vorfeld. Darüber hinaus unterscheidet man Schnellabrollwege und Standplatzrollgassen (am Vorfeld).
- PISTEN (Start- und Landebahnen): „Auf Flugplätzen festgelegte Flächen für den Start und die Landung von Luftfahrzeugen.“ [ZFV, 1972]
- SCHULTERN: „Eine an den Rand eines Belages angrenzende Fläche, die so hergerichtet ist, dass sie einen Übergang zwischen dem Belag und der angrenzenden Oberfläche herstellt.“ [ICAO, 2009]
- OBERBAU: Als Oberbau bezeichnet man den schichtenweisen Aufbau von Verkehrsflächen. Maßgebend sind die Anordnung und die Dicken der zur Anwendung kommenden Schichten sowie die verwendeten Materialien. Die Wahl auf eine Ausführungsvariante fällt immer auch unter Berücksichtigung des vorhandenen Untergrunds und dessen Eigenschaften.

1.3 Fahrwerkskonfigurationen

Da das Fahrwerk die Schnittstelle zwischen Flugzeug und Flugbetriebsfläche darstellt, ist dessen Ausführung von besonders großer Bedeutung für die Belastung und somit die Dimensionierung des Oberbaus. Nicht nur die Größe des Flugzeugs und das damit einhergehenden Gewicht, auch die Anordnung der Fahrwerksbeine und die Anzahl und Größe der Räder beeinflussen die resultierenden Einwirkungen; maßgebend ist also stets die ungünstigste Kombination aus Gewicht und Fahrwerkskonfiguration. Vorweg soll gesagt sein, dass im Folgenden nur Fahrwerkstypen gängiger Verkehrsflugzeuge aufgezeigt werden. Militärflugzeuge, vor allem militärische Frachtmaschinen sowie Spezialtransporter, weisen teils beträchtliche Unterschiede an den Fahrwerken auf, mit anderer Anordnung und meist einer größeren Anzahl an Rädern. Der Grund dafür ist im abweichenden Anwendungsgebiet zu finden: Zum einen sind die Lasten oft wesentlich höher und darüber hinaus müssen auch Flugplätze ohne präparierte Pisten angeflogen werden können. Eine Relevanz für Verkehrsflughäfen ist nicht gegeben.

Während Flugzeuge in frühen Jahren der Luftfahrt fast ausschließlich über Spornradfahrwerke verfügten, finden heute bei Verkehrsflugzeugen (von wenigen Ausnahmen abgesehen) nur noch Bugradfahrwerke Anwendung. Der große Vorteil dieser Bauweise ist die horizontale Lage des Rumpfs am Boden und der damit verbundene höhere Passagierkomfort sowie eine bessere Sicht der Piloten nach außen beim Manövrieren und bei Start- und Landevorgängen.

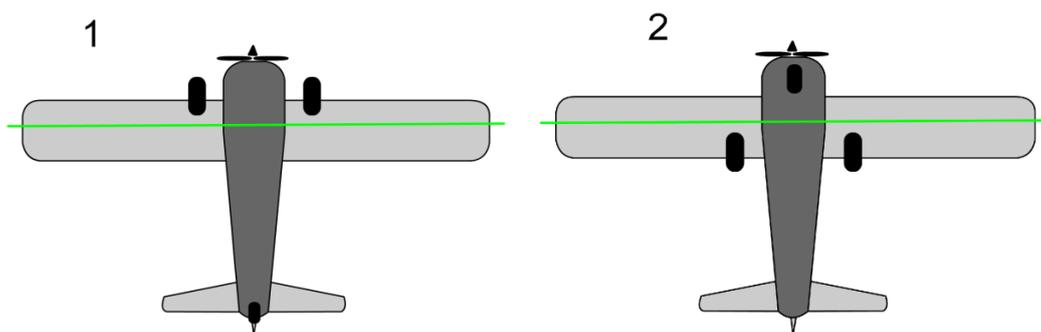


Abbildung 2: Fahrwerksarten – (1) Spornradfahrwerk, (2) Bugradfahrwerk

In Abbildung 2 sind das Spornradfahrwerk und das Bugradfahrwerk am Beispiel eines kleinen Flugzeuges dargestellt; die grüne Linie zeigt dabei die Lage des Schwerpunkts im Rumpf. Das Bugradfahrwerk besteht im Wesentlichen aus dem Hauptfahrwerk und dem Bugfahrwerk. Das Hauptfahrwerk befindet sich dabei sehr nahe hinter bzw. über dem Schwerpunkt des Flugzeugs und hat somit den mit Abstand größten Teil der Last

abzutragen. Bei gängigen Großflugzeugen beträgt der Anteil der vom Hauptfahrwerk abgetragenen Last an der Gesamtlast ca. 95 %. Aus diesem Grund und um eine stabile Dreipunktauflage zu gewährleisten, bestehen Hauptfahrwerke aus mindestens zwei Fahrwerksbeinen mit jeweils ein bis sechs Rädern. Das Bugradfahrwerk ist entsprechend kleiner ausgeführt und besteht in der Regel aus lediglich einem Fahrwerksbein mit zwei Rädern; bei kleinen Regionalflugzeugen oft auch nur aus einem Einzelrad.

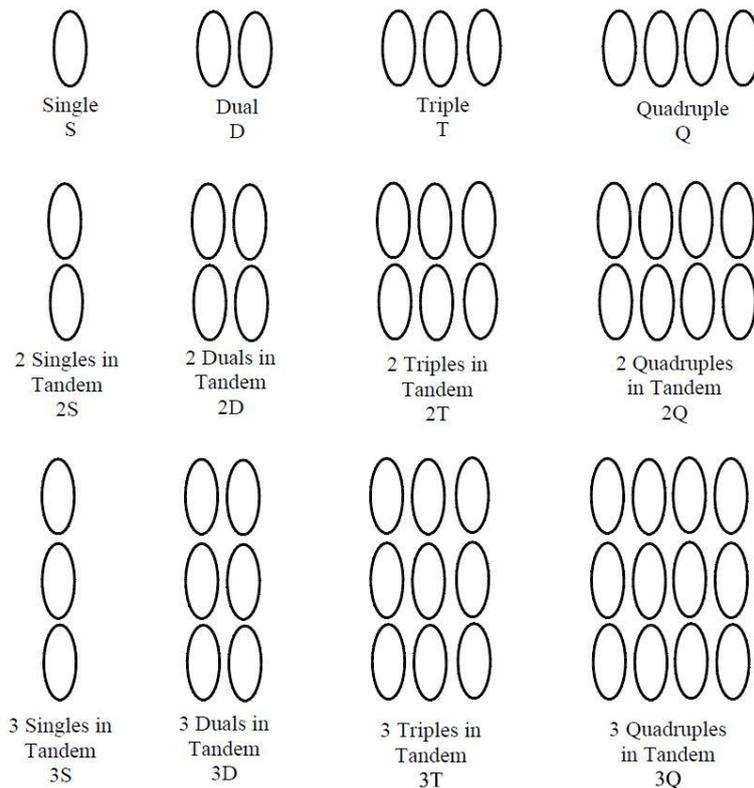


Abbildung 3: Mögliche Radanordnung [FAA, 2009]

Abbildung 3 zeigt verschiedene Möglichkeiten der Radanordnung an einem Fahrwerksbein auf, die Bezeichnungen dafür entsprechen der Definition der FAA. Für zivile Verkehrsflugzeuge sind, abgesehen vom Einzelrad, nur die Variationen der zweiten vertikalen Spalte von links von Interesse. Im Deutschen lässt sich für diese drei gängigen Varianten folgende Nomenklatur einführen: (von oben nach unten) Doppelrad, Doppelradtandem und Doppelradtridem. Die restlichen Fälle sind, wie erwähnt, an Militär- und Spezialtransportfluggerät zu finden.

In Abbildung 4 sind verschiedene gängige Fahrwerkskonfigurationen typischer Verkehrsflugzeuge dargestellt. Erkennbar ist die zunehmende Komplexität der Hauptfahrwerke bei zunehmender Größe der Flugzeuge. Dies deutet auch auf den Mehraufwand und die entstehenden Schwierigkeiten bei der Bemessung des Oberbaus hin: Denn während bei einfacher Radbelastung lediglich eine Einzellast anzusetzen ist, entstehen

bei Radanordnungen, wie beispielsweise der des A380, komplizierte Überlagerungen, die eines ausgeklügelteren Berechnungsmodells bedürfen. Beherrschbar werden solche Problemstellungen letztendlich durch die Anwendung moderner, computergestützter Verfahren, wie der Finite-Elemente-Methode oder der Mehrschichtentheorie. Auch bei sehr großen Linienflugzeugen besteht das Bugradfahrwerk lediglich aus einer Doppelbereifung. Es fällt kaum ein nennenswerter Gewichtsanteil auf dieses Fahrwerksbein, es dient hauptsächlich der Stabilisierung sowie der Steuerung des Flugzeugs am Boden. Aus diesem Grund ist es für die Bemessung nicht relevant und bleibt unberücksichtigt. Jahrelange Erfahrungen bestätigen die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise [FAA, 2009].

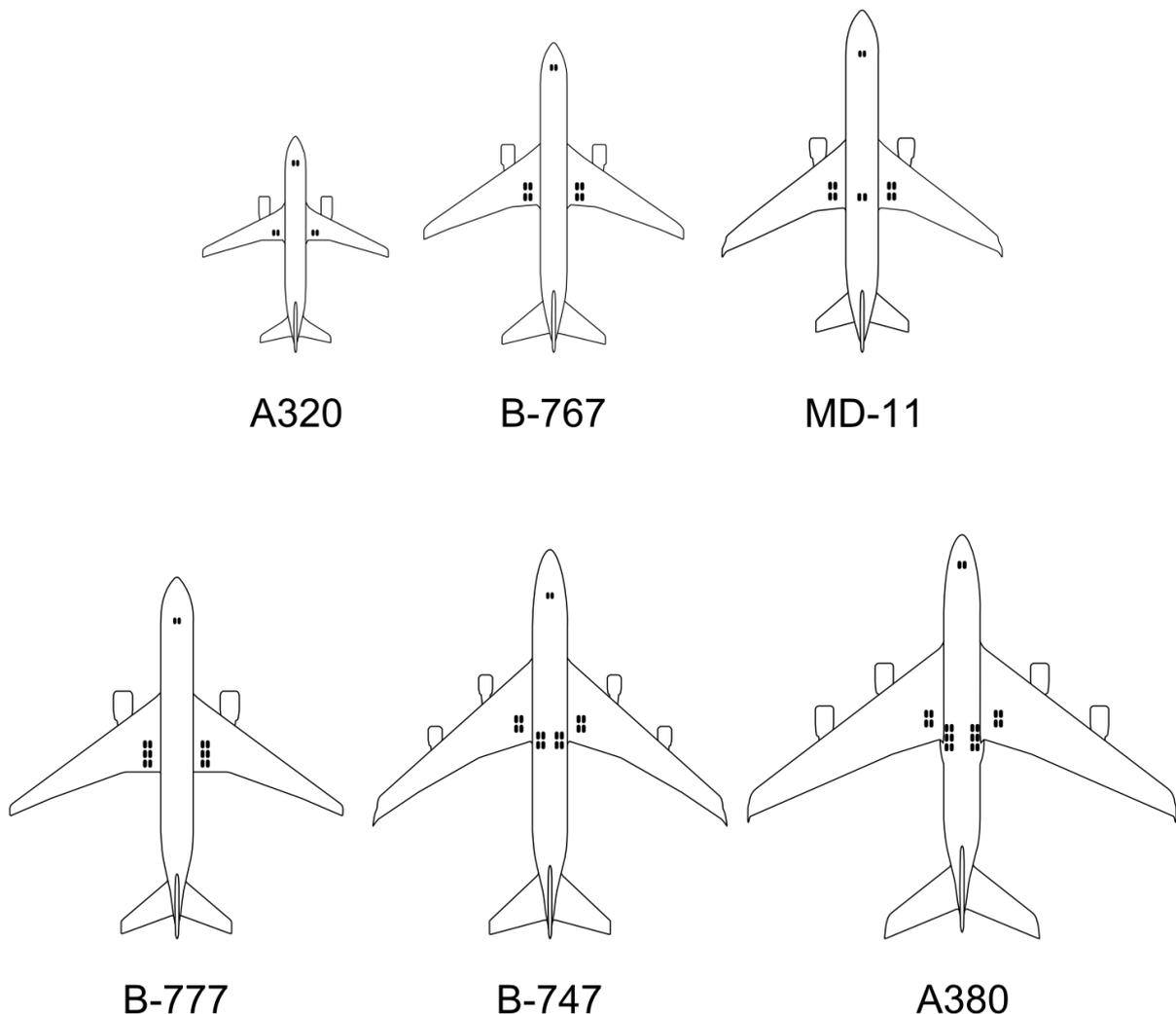


Abbildung 4: Beispiele von Fahrwerksanordnungen

2 BEMESSUNGSMETHODEN VON FLUGBETRIEBSFLÄCHEN

2.1 Allgemeines

Der Begriff der Bemessung umfasst sämtliche Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit der Dimensionierung des Oberbaus. Ausgehend vom vorhandenen Untergrund und sonstigen Umgebungsbedingungen sowie vom zu erwartenden Belastungsaufkommen, müssen Art und Schichtenabfolge ebenso wie zu verwendende Materialien des Oberbaus festgelegt werden, mit dem Ziel, einen reibungslosen Betrieb für eine definierte Lebensdauer zu gewährleisten. Im Fall von Flugbetriebsflächen ist der Vorgang der Bemessung (engl.: pavement design) nicht mit dem der Bewertung (engl.: evaluation) zu verwechseln. Die Tragfähigkeitsbewertung wird von der ICAO im Rahmen der ACN/PCN – Methode gefordert und ist in Kapitel 3 beschrieben.

Die Basis einer jeden Bemessungsmethode bildet die Bestimmung der maßgebenden Beanspruchung. Je nach Verhalten des Aufbaus, starr oder flexibel, sind dies Spannungen oder Verzerrungen, die aus den äußeren Einwirkungen, unter Berücksichtigung des Temperaturverhaltens ermittelt werden müssen. Die Modellvorstellungen und Vorgehensweisen, die dabei zur Anwendung kommen, haben sich im Laufe der Zeit geändert und werden heute von computergestützten Methoden angeführt. Auch die Form der Lastaufbringung und deren Zusammensetzung konnte im Laufe der Zeit der Realität näher gebracht werden. Die unterschiedlichen Methoden, mit welchen ein zu erwartendes Verkehrsaufkommen bei der Bemessung berücksichtigt wird, reichen von der ursprünglichen Wahl eines kritischen Luftfahrzeugs (LFZ) bis hin zum umfangreichen Berücksichtigen einer gesamten Flotte und variieren bei den aktuell zur Anwendung kommenden Verfahren.

Um die ermittelten Beanspruchungen sinnvoll in einem Bemessungskonzept berücksichtigen zu können, wird ein Instrument benötigt, das deren Einfluss auf die strukturelle Lebensdauer bestimmt. Hierfür kommen empirische Ermüdungs- bzw. Versagenshypothesen zur Anwendung. Diese können ihren Ursprung sowohl in Materialprüfungen in Labors haben oder aber aus lange andauernden Großversuchen am tatsächlichen Aufbau stammen. Ein ansehnliches Beispiel für letztere Möglichkeit stellt die *National Airport Pavement Test Facility* (NAPTF) der FAA dar. In dieser Einrichtung werden seit 1999 umfangreiche Tests mit verschiedenen Radkonfigurationen und Aufbauten durchgeführt, die unter anderem als Basis für das US-amerikanische Bemessungskonzept dienen. In Abbildung 5 ist ein

möglicher Versuchsaufbau an der NAPTF am Beispiel der Fahrwerksanordnung eines Frachtflugzeugs dargestellt.



Abbildung 5: Versuchsaufbau an der NAPTF [FAA, 2014]

Die Frage, warum es weltweit eine Vielzahl verschiedener Herangehensweisen an die Problemstellung zur Bemessung von Flugbetriebsflächen gibt und keine Bemühungen, beispielsweise durch die ICAO, bekannt sind, eine international einheitliche Methode einzuführen, lässt sich nur schwer beantworten. In der aktuellen (!) Auflage ihres Handbuchs zu Themen des Oberbaus aus dem Jahr 1983 (siehe Abschnitt 2.2.1) verweist die ICAO empfehlend auf Beispiele einiger Mitgliedsstaaten. Darin könnte ein erster Schritt gesehen werden, eine Vielzahl an Vorgehensweisen auf einige wenige und später vielleicht noch stärker zu reduzieren. Auch wird im besagten Dokument öfters darauf hingewiesen, dass vorliegende Verfahren als nicht vollständig ausgereift anzusehen sind und dass Mitgliedsstaaten eingeladen sind, Neuerungen bekanntzugeben, um die Allgemeinheit davon profitieren zu lassen. Die Tatsache, dass seit nunmehr über 30 Jahren keine Aktualisierung dieses selbstgenannten „Provisoriums“ erschienen ist, führt zu dem Schluss, dass weder aus internationaler Sicht noch seitens der Mitgliedsstaaten Interesse daran besteht, sich einer einheitlichen Herangehensweise bezüglich dieser Aufgabe anzunähern. Ein möglicher Grund dieser Situation könnte sein, dass die Bemessungsmethoden häufig stark an den Methoden aus dem Straßenbau des jeweiligen Landes orientiert sind, wie dies auch bei der Österreichischen Methode der Fall ist. Auch haben die klimatischen Bedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Beanspruchung und somit den Aufbau und die Bemessung von Flugbetriebsflächen. In Regionen mit regelmäßiger Frosteinwirkung müssen bei der Dimensionierung anderer Schwerpunkte gesetzt werden, als bei Gebieten mit wesentlich höheren Maximaltemperaturen, was unter Umständen für die Verwendung unterschiedlicher Bemessungsverfahren sprechen könnte. Einen weiteren Grund könnte man im nötigen finanziellen Aufwand finden, was bei regionalen Flughäfen in ärmeren Regionen durchaus

als Argument gewertet werden kann. Auch das nötige Know-how ist mancherorts nicht vorhanden und kann wiederum aufgrund fehlender Mittel nicht importiert werden.

Ungeachtet der Vielzahl an Methoden empfiehlt es sich, sich an den Vorgehensweisen der USA zu orientieren. Nicht ohne Grund gilt die USA seit jeher als große Nation der Luftfahrt; so wurden auch im Bereich der Flughäfen viele Bemühungen angestellt. Schon die ICAO verwies dazumal auf die Methode der FAA, welche glücklicherweise nicht ungeändert blieb, sondern stetig dem technischen Fortschritt gemäß aktualisiert wurde und heute eine moderne, öffentlich einsehbare Alternative darstellt. Aus diesem Grund wird der FAA-Methode in der vorliegenden Arbeit ein eigenes Kapitel gewidmet (siehe Abschnitt 2.5).

2.2 Rechtliche Grundlagen

Die Tragfähigkeit und in weiterem Sinne die Beschädigungsfreiheit von Pisten spielen eine wichtige Rolle bezüglich der Wirtschaftlichkeit; schließlich führen längere Wartungsintervalle zu seltener auftretenden Unterbrechungen und damit einhergehend zu einer geringeren finanziellen Belastung für den Flughafenbetreiber. Doch auch die Sicherheit wird wesentlich davon beeinflusst. Um eine unnötige Gefährdung bei Start- und Landevorgängen zu vermeiden, die ohnehin als die riskantesten Phasen bei der Durchführung eines Fluges gelten, müssen die geforderten Eigenschaften des Oberbaus über den gesamten Benutzungszeitraum gewährleistet sein. Dies betrifft in erster Linie die Ebenheit und Unversehrtheit der obersten Schichte. Befinden sich beispielsweise aufgrund einer schadhafte Oberfläche Bruchstücke auf der Piste, besteht erhöhtes Risiko des Ansaugens von Fremdkörpern in die Triebwerke (eng.: FOD – Foreign Object Damage) und damit eine akute Gefährdung von Passagieren. Aus Gründen wie diesen, werden in internationalen und nationalen Verordnungen Empfehlungen und Verpflichtungen bezüglich der Tragfähigkeit von Start- und Landebahnen formuliert.

2.2.1 Internationale Bestimmungen

Als die Luftfahrt Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts in zunehmendem Maße wuchs und immer mehr Flüge über die nationalen Grenzen hinaus führten, wurde der Bedarf einer übergeordneten Organisation laut, die für eine weitgehende Vereinheitlichung des Luftverkehrs sorgen sollte. In diesem Sinne ging im Jahre 1944 aus dem Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) mit Hauptsitz in Montreal hervor, die mittlerweile eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen darstellt. Unterzeichneten zunächst 52 Staaten das Abkommen, verfügt die

Organisation inzwischen über 191 Mitgliedsstaaten, die sich allesamt verpflichten, die verbindlichen Normen auf ihren Gebieten umzusetzen. Die ICAO setzt sich zum Ziel, sämtliche Belange der Luftfahrt international zu vereinheitlichen. Die Regularien zum internationalen Luftfahrtübereinkommen werden in insgesamt 18 Anhängen (engl.: Annex) zusammengefasst und reichen von der Lizenzierung von Luftfahrtpersonal über Telekommunikation bis hin zur Sicherheit beim Lufttransport. Bestandteil ist auch das Durchsetzen einer einheitlichen Ausführung aller betreffenden Anlagen von Flughäfen, um Piloten weltweit eine unmissverständliche Navigation am Boden und dadurch einen sicheren Flugbetrieb zu gewährleisten. Ebenso unerlässlich ist die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Flugbetriebsflächen, weshalb die ICAO bestimmte Anforderungen an die Tragfähigkeit von Pisten, Rollwegen und Vorfeldern stellt. Flughäfen und deren Bewegungsflächen fallen in den Geltungsbereich von *Annex 14: „Aerodromes – Flugplätze“*, welcher weiter in *Volume I* und *Volume II* unterteilt ist. *Volume I*, mit der Bezeichnung *„Aerodrome Design and Operations – Gestaltung und Betrieb von Flugplätzen“*, verweist desweiteren auf verschiedene Handbücher. Diese sind als Erweiterung des *Annex 14* anzusehen, um die darin enthaltenen Vorgaben ausführlicher zu beschreiben. Maßgebend für die Planung und Ausführung von Flugbetriebsflächen ist das *„Aerodrome Design Manual“*, welches in 6 Teile gegliedert ist. *Part 3 – „Pavements“* beschäftigt sich dabei mit dem Oberbau, der Tragfähigkeit und damit im Zusammenhang stehenden Themenstellungen. Während ein Großteil dieses Handbuchs in den Jahren 2005 und 2006 überarbeitet und aktualisiert wurde, liegt *Part 3* nach wie vor in seiner zweiten Ausgabe aus dem Jahr 1983 vor.

Die ICAO empfiehlt im *Annex 14, Volume I*, dass Flugbetriebsflächen dem Verkehr durch Flugzeuge, für die sie bestimmt sind, ohne Beschädigung standhalten sollen. Darüber hinaus ist die Tragfähigkeit von Belägen zu bestimmen. Bei Flughäfen, die für Luftfahrzeuge mit Maximalmassen von mehr als 5.700 kg zugelassen sind, ist diese Tragfähigkeit bekanntzugeben. Dabei muss von der ACN/PCN – Methode Gebrauch gemacht werden, auf welche im Kapitel 3 näher eingegangen wird. Die Besonderheit am *„Aerodrome Design Manual, Part 3 – Pavements“* ist, dass keine eigentlichen Bemessungsmethoden vorgegeben werden; es bleibt den Mitgliedstaaten somit selbst überlassen, eigens entwickelte Verfahren anzuwenden. Von der ICAO wird lediglich die Bekanntgabe der Tragfähigkeit der Start- und Landebahnen in Form von PCN-Werten gefordert. Welche Methode zu deren Ermittlung angewandt wird, steht wiederum frei.

Im besagten Dokument werden beispielhaft die Methoden verschiedener Länder aufgezeigt. Da das Erscheinungsdatum der letzten gültigen Ausgabe jedoch im Jahr 1983 liegt, muss davon ausgegangen werden, dass die beschriebenen Methoden teils noch deutlich älter sind. Berücksichtigt man im Gegensatz die rasante Entwicklung der Flugzeugindustrie in den

letzten Jahrzehnten und darüber hinaus die inzwischen vorhandenen Möglichkeiten moderner computerbasierter Verfahren, wie zum Beispiel der Finite-Elemente-Methode, muss man zu dem Schluss kommen, dass eine sinnhafte Anwendung derart veralteter Methoden aus wirtschaftlicher Sicht nicht mehr zu empfehlen ist. In abschließenden Worten wird im Kapitel zur Bemessung in „*Part 3 – Pavements*“ zusammengefasst, dass die vorliegenden Verfahren als „Methoden der 1. Generation“ anzusehen sind und dass die Inhalte des Dokuments „angemessen aktualisiert“ werden. Da nach nun über 30 Jahren von Angemessenheit keine Rede mehr ist, scheint die Notwendigkeit einer zeitgemäßen Österreichischen Methode als angebracht.

2.2.2 Nationale Bestimmungen

Die Zuständigkeit für sämtliche Belange der zivilen Luftfahrt obliegt in Österreich dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) als oberste Behörde. Die rechtlichen Grundlagen sind unter anderem im Luftfahrtgesetz (LFG) verankert, das in der aktuellen Fassung des „Bundesgesetzes vom 2. Dezember 1957 über die Luftfahrt“ vorliegt. Unter zahlreichen weiteren Gesetzen und Verordnungen ist an dieser Stelle auch die „Zivilflugplatz-Verordnung“, in der Fassung aus 1972, zu nennen.

Die Zivilflugplatz-Verordnung regelt, dass auf Flughäfen „mindestens eine befestigte Piste, eine befestigte Abstellfläche und ein befestigter Rollweg vorhanden sein“ [ZFV, 1972] müssen. Bezüglich der Tragfähigkeit für befestigte Flugbetriebsflächen wird ausschließlich die folgende Angabe gemacht: „Die Tragfähigkeit von Bewegungsflächen, mit Ausnahme des Sicherheitsstreifens, muß für das Gesamtgewicht jener Arten von Luftfahrzeugen ausreichen, für welche die Bewegungsflächen bestimmt sind. Diese Tragfähigkeit ist in der Benützungsbewilligung [...] sowohl als höchstzulässiges Gesamtgewicht als auch je Hauptfahrwerksbein, getrennt nach Arten der in Betracht kommenden Fahrwerke (Einzelrad-, Doppelrad- und Doppelradtandem-Fahrwerk), in Kilopond festzusetzen“ [ZFV, 1972]. Auf die Tragfähigkeit der Schultern wird nicht näher eingegangen, sie werden diesbezüglich lediglich als „Übergang zum angrenzenden Gelände“ [ZFB, 1972] bezeichnet. Dass auch diese Verordnung einer Überarbeitung bedarf, verdeutlicht das Fehlen des Doppelradtridem-Fahrwerks bei obiger Aufzählung. Diese Radkonfiguration stellt aktuell die komplexeste bei zivilen Verkehrsflugzeugen dar und ist inzwischen recht häufig anzutreffen.

2.3 Geschichtliche Entwicklung

Vor allem vor der Zeit leistungsfähiger Computer, musste die für die Bemessung relevante Berechnung von Spannungen und Verzerrungen mittels verschiedenartiger Modellannahmen durchgeführt werden. Im Bereich des Straßen- und somit des Flugbetriebswesens etablierten sich vor allem zwei analytische Methoden: die Theorie nach Westergaard und die Theorie nach Boussinesq. Die Westergaard'sche Theorie betrachtet eine starre Platte auf einer elastischen Bettung (sog. Winkler-Bettung) und kommt bei starren Oberbauten zur Anwendung. Der Ansatz nach Boussinesq liefert Ergebnisse für Spannungen und Verzerrungen in einem homogen-isotrop-elastischen Halbraum und wird bei flexiblen Oberbauten angewandt. Beide Methoden gehen von linear-elastischem Materialverhalten aus und bedürfen einer Rückführung der Radlasten komplexer Radkonfigurationen auf eine äquivalente Einzelradlast, wofür ein kritisches Bemessungsflugzeug bestimmt werden muss. Bei diesen analytischen Verfahren werden die Spannungen und Dehnungen direkt ermittelt, ohne nötige Iteration, was den Vorteil bringt, dass relativ einfach exakte Lösungen gefunden werden können. Die Lösungen sind jedoch nur so präzise wie die Eingangswerte, die der Berechnung zugrunde liegen. Dabei weicht die Annahme eines linear-elastischen Materials vor allem bei flexiblen Aufbauten von der Realität ab. Ein weiterer Nachteil ist die Notwendigkeit einer Einzellast. Fahrwerksanordnungen moderner Großraumflugzeuge können so nur unzureichend genau wiedergegeben werden.

Die Methoden, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, sind nur computergestützt anwendbar. Dies betrifft in erster Linie die Mehrschichtentheorie und die Finite-Elemente-Methode. Die Mehrschichtentheorie nach Burmister kommt vorrangig bei flexiblen Oberbauten zur Anwendung und wird in Kapitel 5 genauer beschrieben. Die dreidimensionale Finite-Elemente-Methode stellt ein numerisches Verfahren dar und wird primär bei starren Aufbauten angewandt. Der große Vorteil dieser beiden Methoden liegt in der Möglichkeit, den geschichteten Aufbau für die Berechnung analog zum realen Aufbau zu gestalten. Dabei können jeder Schicht verschiedene, realistische Materialkennwerte zugeordnet werden, bei Anwendung der FEM darüber hinaus auch unterschiedliche Materialmodelle (z.B. viskoelastisches Verhalten). Einen weiteren Vorteil dieser modernen Verfahren bietet die Belastungsanordnung. Anstatt aufwendige Fahrwerks- und Radkombinationen auf Einzelradlasten reduzieren zu müssen, können diese entsprechend der tatsächlichen Anordnung und Lastverteilung auf die Struktur aufgebracht werden. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, die gesamte auftretende Flugzeugflotte realitätsnah zu berücksichtigen.

Einen Nachteil birgt die FEM als numerische Methode jedoch insofern, als dass keine exakte Lösung möglich ist. Spannungen und Dehnungen werden iterativ berechnet, bis ein ausreichend hoher Grad an Genauigkeit erreicht wird. Des Weiteren muss, um die Realität angemessen abbilden zu können, ein entsprechend feines Netz an Elementen gewählt werden. Diese beiden Eigenschaften bewirken den Bedarf einer großen Rechenkapazität, die von modernen Computern in der Regel jedoch erbracht wird, sodass die Berechnungsergebnisse ohne größeren Zeitaufwand ermittelt werden können.

2.4 Bemessungsdiagramme

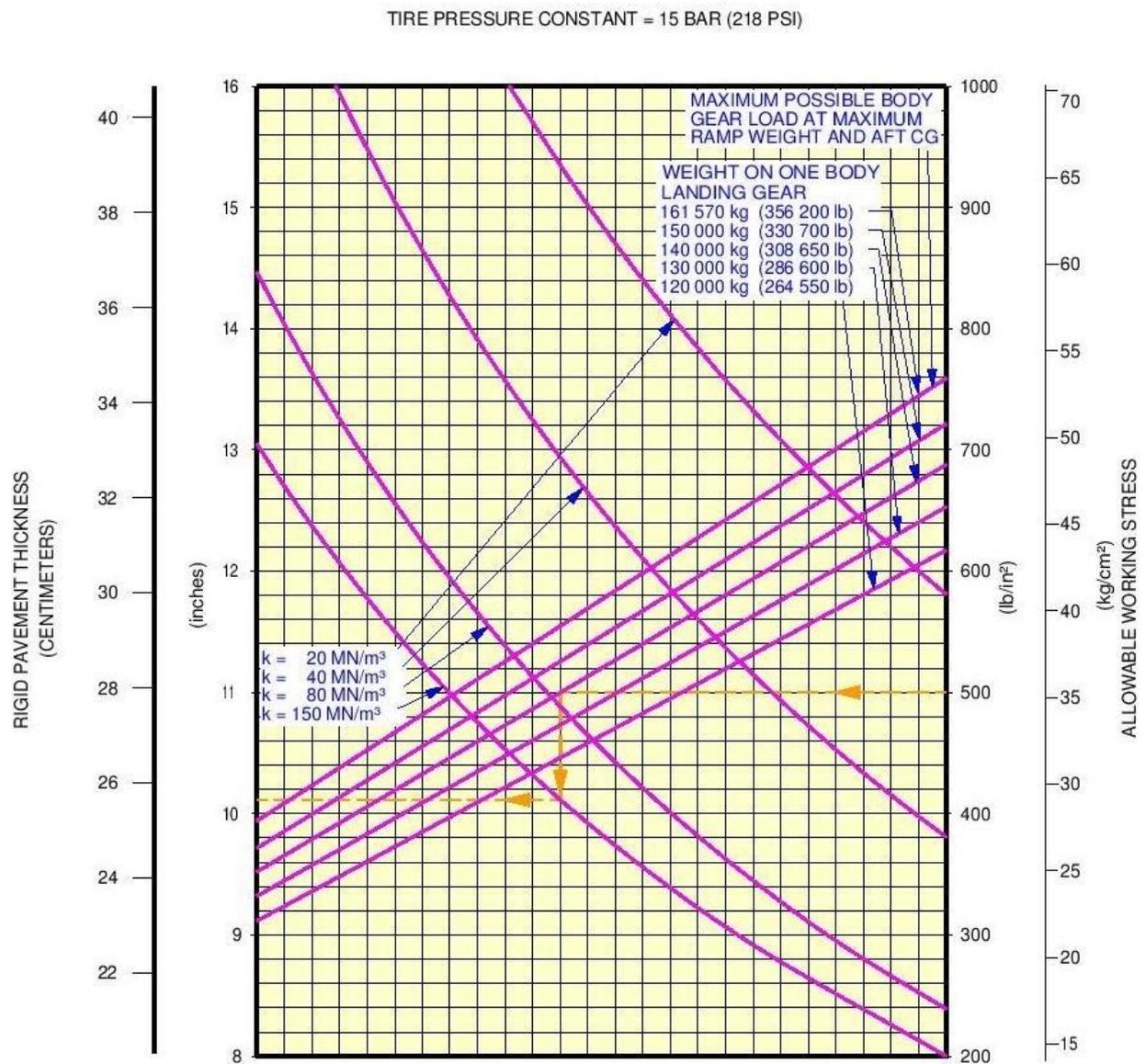
Flugzeughersteller veröffentlichen in den Datenblättern ihrer einzelnen Flugzeugmuster vielfältige Angaben, die den Kunden und Flughafenbetreibern zur Verfügung stehen. Dies betrifft neben geometrischen Informationen und Hinweisen zum Betrieb auch Anforderungen an die Flughäfen bezüglich der Tragfähigkeit der Bewegungsflächen. In diesem Zusammenhang werden von manchen Herstellern auch Bemessungsdiagramme zur Dimensionierung von Oberbauten angeboten. Die beiden Hersteller von Großraumflugzeugen, Airbus und Boeing, stellen jeweils Diagramme auf Basis derselben Bemessungsmethoden zur Verfügung. Zur Anwendung kommen unter anderem die PCA-Methode für starre Aufbauten und die Methode des *U.S. Army Corps of Engineers* für flexible Aufbauten.

2.4.1 PCA – Methode

Die Methode der *Portland Cement Association* (PCA-Methode) [Packard, 1995] wurde in den 1950er Jahren entwickelt und findet in weiterentwickelter Form auch heute noch Anwendung. Die Bemessungsdiagramme der Hersteller Airbus und Boeing werden nach dem Westergaard'schen Ansatz in Übereinstimmung mit der PCA-Methode ermittelt, wobei von der computerisierten Variante Gebrauch gemacht wird. Als Eingangswerte zur Ermittlung der Betonplattendicke müssen der Bettungsmodul k des Untergrunds, die zulässige Biegespannung des Plattenwerkstoffs und die Belastung durch das betrachtete Hauptfahrwerksbein bekannt sein.

In Abbildung 6 ist ein solches Diagramm für einen Airbus A380-800 dargestellt. Aufgrund der Komplexität des Hauptfahrwerks dieses Flugzeugs (siehe Abbildung 12 auf Seite 41), müssen Diagramme sowohl für die Rumpffahrwerksbeine als auch für die Tragflächenfahrwerksbeine getrennt angegeben werden, da eine unterschiedliche Anzahl an Rädern und verschiedene Laststufen vorliegen. Das hier gezeigte Diagramm gilt für eine

Maximalmasse des LFZ von 571.000 kg und bezieht sich auf ein Rumpffahrwerksbein mit sechs Rädern. In oranger Farbe ist im Diagramm ein mögliches Bemessungsbeispiel eingezeichnet: Die Ausgangswerte bilden ein Bettungsmodul von $k = 150 \text{ MN/m}^3$, eine zulässige Betonspannung von 36 kg/cm^2 (500 lb/in^2) und eine Last auf das Fahrwerksbein von 140.000 kg . Folgt man der Richtung des orangefarbenen Pfeils, erhält man als Ergebnis eine geforderte Plattendicke von $25,6 \text{ cm}$.



Rigid Pavement Requirements - 6 Wheel Bogie
MRW 571 000 kg - A380-800 Models

Abbildung 6: Bemessung starrer Oberbauten nach der PCA-Methode für Airbus A380-800 [Airbus, 2012]

2.4.2 U.S. Army Corps of Engineers

Die Methode des *U.S. Army Corps of Engineers* wurde zu Zeiten des zweiten Weltkriegs eingeführt und zunächst in erster Linie zur Bemessung von Militärflughäfen verwendet. Ihr Ursprung liegt in der CBR-Methode, entwickelt 1928 von der *California Division of Highways*. Als Eingangswerte zur Ermittlung der Dicke des flexiblen Aufbaus muss die Tragfähigkeit des Untergrunds in Form eines CBR-Werts, die Belastung durch das betrachtete Hauptfahrwerksbein sowie die Anzahl der jährlichen Lastwechsel bekannt sein.

In Abbildung 7 ist ein computergeneriertes Diagramm nach der Methode des *U.S. Army Corps of Engineers* für das Rumpffahrwerksbein eines Airbus A380 dargestellt. Der orangefarbene Pfeil zeigt ein mögliches Bemessungsbeispiel auf: Die Ausgangswerte bilden ein CBR-Wert von 10 (entspricht einer Untergrund-Tragfähigkeitskategorie *B*), eine Belastung des Fahrwerksbeins von 140.000 kg und eine Anzahl jährlicher Abflüge von 3.000. Folgt man dem Pfeil, erhält man als Ergebnis der Bemessung eine geforderte Dicke des flexiblen Aufbaus von 48 cm.

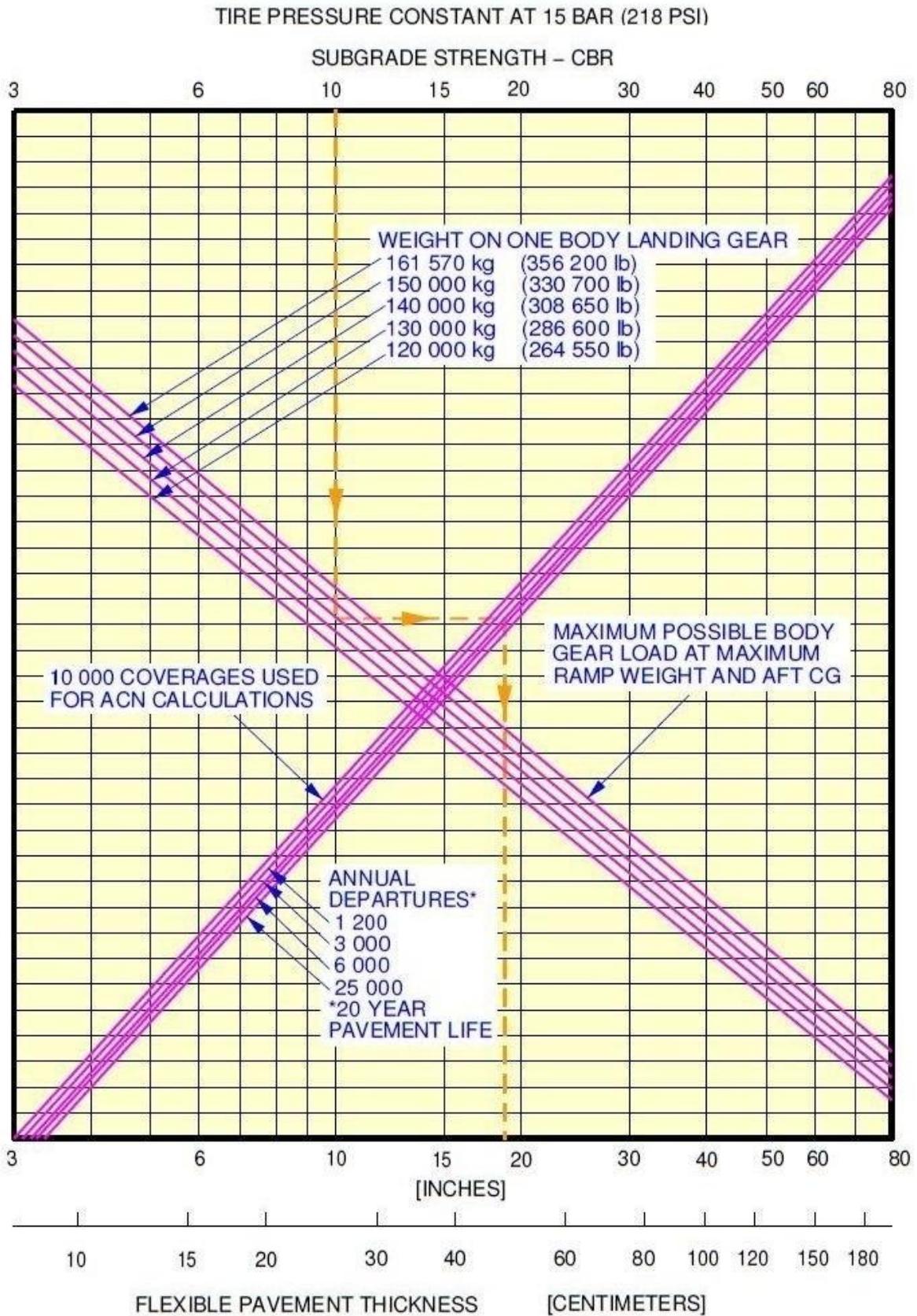


Abbildung 7: Bemessung flexibler Oberbauten nach der Methode des U.S. Army Corps of Engineers für Airbus A380-800 [Airbus, 2012]

2.4.3 Schlussfolgerung

Der große Nachteil solcher Diagramme liegt darin, dass nur sehr wenige jener Parameter berücksichtigt werden (können), die eine reale Belastungssituation ganz wesentlich beschreiben. Dabei sind vor allem folgende zu nennen:

- Es können keine klimatologischen Umwelteinflüsse berücksichtigt werden, die jedoch unter anderem in Form von Temperaturspannungen und Schwankungen des E-Moduls sehr starken Einfluss auf die Tragfähigkeit ausüben.
- Die tatsächliche Beanspruchung wird nur unzureichend berücksichtigt. Diese ist immer auch von der Belastungsfrequenz abhängig, welche bei der Erstellung solch allgemein gehaltener Diagramme teils nur standardisiert angenommen werden kann.
- Die reale Belastung von Flugbetriebsflächen geschieht durch eine umfangreiche Kombination verschiedener Flugzeugmuster. Um dies zu berücksichtigen, müsste die gesamte auftretende Flotte in äquivalente Belastungen durch das betrachtete LFZ mit entsprechend verminderter Verkehrsfrequenz umgerechnet werden. Da die Frequenz in manchen Diagrammen jedoch keine Beachtung findet, ist dies nicht möglich.

Zusammenfassend kann die Empfehlung abgegeben werden, diese Diagramme nicht (oder nicht ausschließlich) für die Bemessung zu verwenden. Sie stellen jedoch eine brauchbare und sehr einfach zu handhabende Möglichkeit dar, um rasche Abschätzungen durchzuführen. Sie können in jedem Fall als einfaches Mittel zur groben Vordimensionierung herangezogen werden.

2.5 USA

In den USA werden insgesamt über 5.200 öffentliche Flughäfen und -plätze betrieben; über 30 davon können mit mehr als 10 Mio. Passagieren pro Jahr als Großflughäfen bezeichnet werden [ACI, 2014]. Für eine weitgehende Vereinheitlichung zum Zwecke der Sicherheit sorgt die FAA als Behörde des US-Verkehrsministeriums. Wie für sämtliche Belange des Luftverkehrs, werden auch für die Bemessung und Bewertung der Tragfähigkeit von Flugbewegungsflächen Empfehlungen und Vorschriften in Form von Richtlinien, den sogenannten *Advisory Circulars (AC)*, veröffentlicht. Der AC mit der Kennung 150/5335-5B, *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN*, beinhaltet beispielsweise die Tragfähigkeitsbewertung mittels PCN und in diesem Zusammenhang das Programm COMFAA (siehe Abschnitt 3.3.2). Die Bemessung von Oberbauten wurde seit den 1970er Jahren im AC 150/5320-6D in verschiedenen Ausgaben behandelt, auf welchen

auch die ICAO im *Aerodrome Design Manual* verweist [ICAO, 1983]. Im Jahr 2009 wurde mit der Veröffentlichung des AC 150/5320-6E *Airport Pavement Design and Evaluation* ein großer Schritt nach vorne gemacht. Erstmals kommt anstatt rein empirischer Methoden ein mechanistisch-empirisches Modell zur Anwendung. Seit Ende der 1980er Jahre wurde Schritt für Schritt daran gearbeitet, ein fortschrittlicheres, softwaregestütztes Verfahren zu entwickeln. Als Resultat dieser Bemühungen wird im aktuellen AC das Programm FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*) vorgestellt, mit dessen Hilfe der gesamte Vorgang der Bemessung starrer und flexibler Oberbauten erfolgt. Die davor jahrzehntelang zur Anwendung gekommenen Bemessungsnomogramme werden dadurch vollständig abgelöst. Die wesentlichen Neuerungen im Bezug auf die vorangegangenen Verfahren betreffen die Ermittlung von Spannungen und Verzerrungen. Die Nomogramme basieren auf den beiden analytischen Methoden, der Westergaard'schen Plattentheorie für starre und der Theorie des homogen-isotrop-elastischen Halbraums nach Boussinesq für flexible Aufbauten. Bei der aktuellen Bemessungsmethode kommen dagegen die dreidimensionale Finite-Elemente-Methode für starre und die elastische Mehrschichtentheorie für flexible Aufbauten zur Anwendung. Letztere sind nur mit Unterstützung von Computern handhabbar und im Programm FAARFIELD vollständig implementiert.

Ein großer Nachteil der empirischen Methoden mit Nomogrammen ist, dass sämtliche Radkonfigurationen auf äquivalente Einzelradlasten (engl.: ESWL – Equivalent Single Wheel Load) reduziert werden müssen. Die Nomogramme basieren auf empirischen Ermüdungsfunktionen, die als Resultat von Großversuchen gewonnen werden, wie in Abschnitt 2.1 dargestellt. Folglich mussten für jede übliche Radkonfiguration solche Langzeitversuche durchgeführt und als Nomogramm ausgewertet werden, um eine sinnvolle Bemessung zu ermöglichen. Als beispielsweise mit der Boeing 777 erstmals eine Doppelradtridem-Konfiguration in Serie ging, mussten erneut eigene Großversuche gestartet werden. Die Anwendung vorangehender Nomogramme resultierte in überdurchschnittlich dimensionierten Oberbauten und erforderte dies alleine aus wirtschaftlichen Gründen [Han, 2007].

Der maßgebende Vorteil, den das moderne Bemessungsverfahren mittels FAARFIELD gegenüber der Verwendung von Nomogrammen bietet, ist die Möglichkeit, die Belastungen entsprechend der tatsächlichen Radkonfigurationen aufzubringen. Die vereinfachende (bei tatsächlicher Anwendung inzwischen jedoch aufwendigere) Rückführung auf einzelne Ersatzlasten ist somit nicht mehr vonnöten. Gleichzeitig entfällt die Notwendigkeit, ein kritisches Bemessungsflugzeug zu wählen, da mit Hilfe der in FAARFIELD integrierten Flugzeug-Bibliothek die gesamte auftretende Flotte berücksichtigt werden kann. Es wird

dabei mit minimalem Aufwand eine Liste erzeugt, welche neben der Fahrwerksanordnung eines Flugzeugmusters auch die Masse und die Anzahl der jährlichen Starts sowie deren Wachstumsfaktor berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Spurvariation der verschiedenen Fahrwerke beachtet.

Die Ermüdungsmodelle der FAA-Methode basieren weiterhin auf den Daten der Großversuche, die in den USA bereits seit den 1940er Jahren durchgeführt werden und können somit als altbewährt und empirisch abgesichert angesehen werden. Als Nachteil des Programms FAARFIELD ist zu nennen, dass es sich um eine Blackbox-Methode handelt. Die Rechenvorgänge können vom Nutzer nicht eingesehen und kontrolliert werden. Ein weiterer Mangel betrifft die Materialparameter, die als feste Zahlenwerte vorgegeben sind; die E-Moduln bestimmter Werkstoffe können somit nicht variiert werden. Auch Klimaeinflüsse können nicht berücksichtigt werden, was vor allem bezüglich der eigentlich schwankenden Materialparameter von Nachteil ist.

2.5.1 Rahmenbedingungen

Die geplante Lebensdauer eines Oberbaus ist mit 20 Jahren festgelegt und wird so auch in FAARFIELD als Ausgangswert vorgeschlagen. Die Lebensdauer kann den Anforderungen gemäß abgeändert werden, stellt dann jedoch eine Abweichung des FAA-Standards dar. Weiters unterscheidet die FAA bei der Bemessung zwischen Flugbewegungsflächen für LFZ mit Massen größer und kleiner 30.000 Pfund (13.608 kg). An dieser Stelle wird nur auf erstgenannte eingegangen.

Bei der Ermittlung der prognostizierten Lastwechsel für Flugbetriebsflächen werden bei der FAA-Methode nur Startvorgänge, nicht aber Landevorgänge berücksichtigt. Dies liegt darin begründet, dass startende Flugzeuge wegen der vollen Betankung eine wesentlich höhere Masse aufweisen als landende Flugzeuge. Verständlich wird diese Überlegung am extremen Beispiel eines Airbus A380, dem aktuell größten Verkehrsflugzeug: Bei einer maximalen Treibstoffkapazität von 320.000 Liter beträgt die Massendifferenz zwischen Start und Landung bis zu 256 Tonnen (bei einer Höchstmasse von 560 Tonnen). Ein weiterer Grund für diese Vorgehensweise ist der Auftrieb an den Tragflächen, der beim Aufsetzen während des Landevorgangs die tatsächliche Belastung des Fahrwerks stark reduziert. Vorsicht ist jedoch bei jenen Flughäfen geboten, bei denen eine Piste planmäßig auch als Rollweg genutzt wird, ein LFZ also (stückweise) entlang der Piste rollen muss, um zur Startposition zu gelangen. In diesem Fall muss bei der Bemessung die Anzahl der Starts mit dem Faktor zwei multipliziert werden; gerade bei Großflughäfen trifft das aber kaum zu.

2.5.2 Bemessungskonzept

Für flexible Oberbauten werden als, bezüglich der strukturellen Lebensdauer, kritische Beanspruchungen die maximale Vertikalverzerrung am Unterbauplanum beziehungsweise die maximale Horizontalverzerrung an der Unterseite der bituminös gebundenen Tragschichte herangezogen. Bei starren Oberbauten wird die größte horizontale Spannung an der Unterseite der Betonplatte als Bemessungskriterium definiert, wobei vom Fall einer Randbelastung ausgegangen wird. Eine Berechnung mit FAARFIELD liefert die geforderten Dicken sämtlicher Schichten (Trag- und Deckschichten) für flexible Oberbauten und die notwendige Dicke der Betonplatte für starre Oberbauten als Ergebnis.

FAARFIELD wurde als Programm zur Oberbaudimensionierung entwickelt, das sich insofern von vorangegangenen Methoden unterscheidet, als dass nicht ein einzelnes, kritisches Luftfahrzeug, sondern eine umfangreiche Mischung verschiedener Flugzeuge berücksichtigt werden kann. Frühere Vorgehensweisen verlangten es, die gesamte Flotte in ein einzelnes Bemessungsflugzeug und die jeweiligen jährlichen Starts in äquivalente jährliche Starts dieses Bemessungsflugzeugs zu konvertieren. Als Bemessungsflugzeug wurde jenes LFZ gewählt, das bezüglich der Masse und der erwarteten Überrollungshäufigkeit den größten Schaden verursachte. Die aktuelle Methode verzichtet hingegen auf die Notwendigkeit, ein Bemessungsflugzeug zu wählen und ermöglicht stattdessen, die Auswirkungen des gesamten zu erwartenden Verkehrskollektivs gleichwertig zu berücksichtigen. Hierfür wird vom Konzept des Cumulative Damage Factor (CDF) Gebrauch gemacht. Es wird dabei mit Hilfe der linearen Schadensakkumulation der Beitrag eines jeden LFZ der betrachteten Flotte an der gesamten Schädigung separat analysiert. Für ein einzelnes Flugzeug mit konstanten jährlichen Starts lässt sich der CDF nach folgenden Möglichkeiten angeben [geändert nach FAA, 2009]:

$$CDF = \frac{N_{LW}}{N_{LW,zul}} \quad (1)$$

N_{LW}	...	Anzahl der Lastwechsel
$N_{LW,zul}$	...	Anzahl der zulässigen Lastwechsel bis zur Ermüdung

$$CDF = \frac{S \cdot L}{P/C \cdot C_{zul}} = \frac{C}{C_{zul}} \quad (2)$$

S	...	Anzahl jährlicher Starts
L	...	Lebensdauer in Jahren
P/C	...	Pass-to-Coverage-Verhältnis

C_{zul}	...	Anzahl der Belastungen bis zur Ermüdung
C	...	Anzahl der Belastungen

Die Summe der Teilschädigungsraten der einzelnen LFZ entspricht dem CDF. Die Bedeutung möglicher Zahlenwerte für den CDF wird in Tabelle 1 erläutert.

Tabelle 1: Lebensdauer des Oberbaus in Bezug auf CDF-Werte [geändert nach FAA, 2009]

CDF-Wert	Verbleibende Lebensdauer des Oberbaus
1	Die strukturelle Lebensdauer ist erreicht.
< 1	Die strukturelle Lebensdauer ist nicht erreicht, der Wert des CDF gibt den Anteil der verbrauchten Lebensdauer wieder.
> 1	Die strukturelle Lebensdauer ist überschritten.

Ein Flugzeug, das sich entlang einer breiten Piste oder Rollbahn bewegt, folgt nur selten immer der exakt gleichen Spur. Ein bestimmter Punkt des Oberbaus erfährt somit statistisch gesehen erst dann eine volle Belastung, wenn das LFZ mehrere Male passiert hat. Diese Spurvariation kann durch eine Normalverteilung beschrieben werden und wird bei der FAA-Methode mittels des Pass-to-Coverage-Verhältnisses (P/C) berücksichtigt. Es beschreibt den Wert, wie oft ein LFZ eine bestimmte Stelle passieren muss, bis eine volle Belastung auftritt. Bei flexiblen Oberbauten entspricht eine volle Belastung der maximal zulässigen vertikalen Verzerrung am Unterbauplanum beziehungsweise der horizontalen Verzerrung an der Unterseite der gebundenen Tragschichte, bei starren Oberbauten entspricht dies der maximalen Horizontalspannung an der Plattenunterseite. Zu den Einflussfaktoren bezüglich der Belastung durch einen bestimmten Flugzeugtyp zählen die Anzahl an Übergängen, die Anzahl sowie der Abstand der Räder des Hauptfahrwerks, die Größe der Kontaktfläche der Räder und die statistische Querverteilung der Radübergänge bezogen auf die Mittellinie der Fahrbahn [FAA, 2009].

Die Ermittlung des P/C-Verhältnisses geschieht in FAARFIELD mit Hilfe der Annahme einer effektiven Radaufstandsbreite. Bei starren Oberbauten entspricht diese der tatsächlichen Aufstandsbreite an der Fahrbahnoberfläche. Da bei flexiblen Oberbauten der Versagensmechanismus innerhalb des Aufbaus auftritt, entspricht hier die effektive Radaufstandsbreite der effektiven Breite am Unterbauplanum, welche durch eine Lastausbreitung mit einer Neigung von 1:2, ausgehend von der tatsächlichen Aufstandsbreite an der Oberfläche, ermittelt wird. Dies ist in Abbildung 8 in Form zweier Beispiele dargestellt. Abhängig vom Reifenabstand und den Dicken der Tragschichten ergibt sich dabei eine getrennte (links) oder eine kombinierte (rechts) Betrachtung der Räder. Die

Berechnung sämtlicher effektiver Radaufstandsbreiten sowie von P/C-Verhältnissen erfolgt in FAARFIELD automatisch.

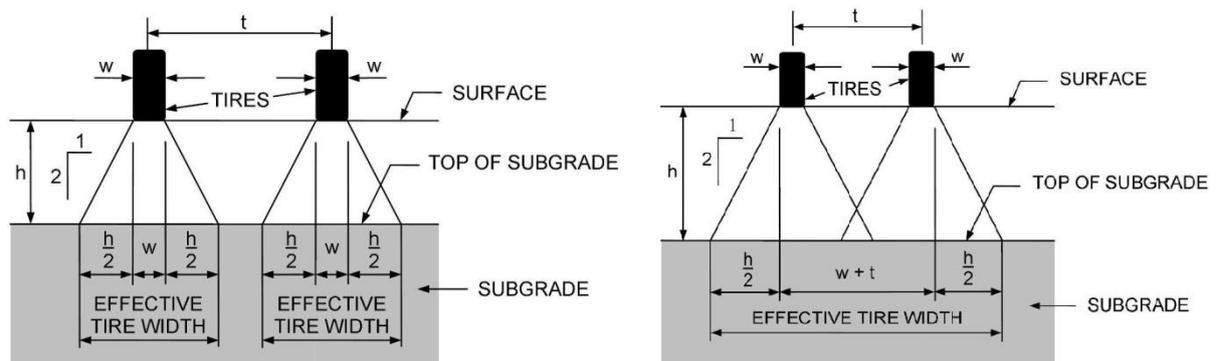


Abbildung 8: Effektive Radaufstandsbreite [FAA, 2009]

Für die Bemessung werden CDF-Werte jeweils für 25,4 cm (10 in) breite Streifen eines Fahrbahnquerschnitts berechnet, insgesamt über eine Breite von 20,8 m (820 in) rund um die Mittellinie. Das P/C-Verhältnis wird dabei für jeden dieser Streifen mit einer Standardabweichung der Normalverteilung von 77,3 cm (30,4 in) ermittelt. Der höchste der 82 CDF-Werte wird als für die Bemessung maßgebend herangezogen.

Summiert man die CDF-Werte einzelner Flugzeugtypen bzw. überlagert man die Kurven der CDF-Verteilung, so erhält man die CDF-Werte der gesamten betrachteten Flotte. In Abbildung 9 ist diese Verteilung über die Fahrbahnbreite anhand eines konkreten Beispiels dargestellt. Betrachtet wird eine Flotte aus drei LFZ auf einem definierten starren Oberbau; die Verkehrsfrequenz wird jeweils identisch mit 1.200 jährlichen Starts angenommen. Die umschließende, braune Linie stellt die Summe der einzelnen CDF-Kurven dar und beschreibt somit den tatsächlichen CDF-Verlauf der gesamten Flotte. Der maximale Wert dieser Kurve entspricht dem maßgebenden CDF, der für die Bemessung herangezogen wird. In diesem konkreten Beispiel erreicht der CDF den Wert 1, was bedeutet, dass die theoretische strukturelle Lebensdauer des Oberbaus erreicht ist.

An den farbigen Linien lässt sich besonders deutlich ablesen, dass die B 747, im Gegensatz zu den anderen beiden LFZ, ein Hauptfahrwerk mit vier Fahrwerksbeinen aufweist und somit, trotz des höheren Gewichts, einen geringeren Einfluss auf den CDF ausübt. Insgesamt ist neben dem Gewicht vor allem die Verkehrsfrequenz eines Flugzeugtyps relevant für dessen Beitrag am gesamten CDF-Verlauf.

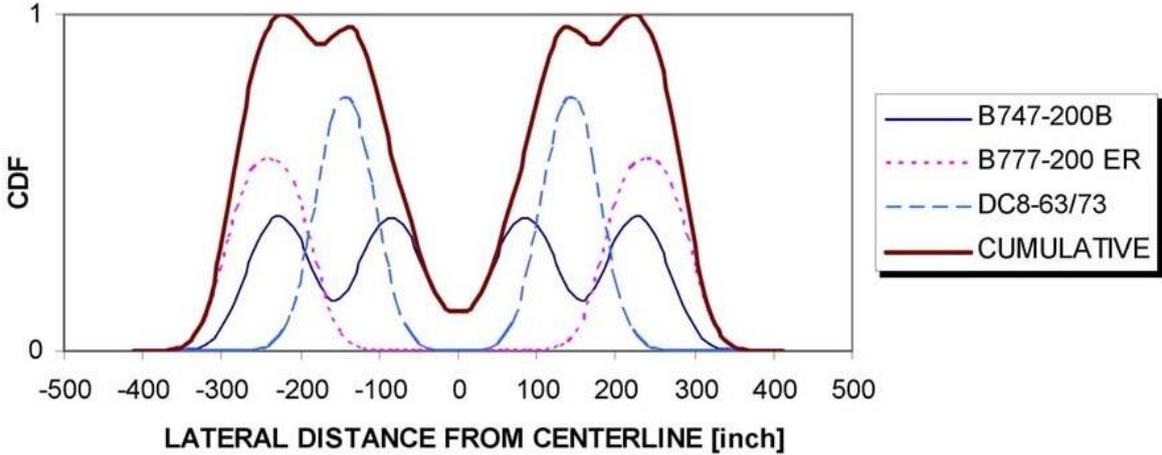


Abbildung 9: Beispiel der CDF-Verteilung für einen Flugzeugmix [FAA, 2009]

3 ACN/PCN – METHODE

3.1 Einleitung

Die ACN/PCN – Methode ist die einzige Richtlinie, die von der ICAO bezüglich der Tragfähigkeit von Start- und Landebahnen verpflichtend von den Mitgliedsstaaten gefordert wird. Es wird nur die Bekanntgabe des PCN-Werts gefordert, die Vorgehensweise, mit welcher der Wert bestimmt wird, ist frei wählbar. Die Sinnhaftigkeit dieser Methode liegt darin, dass Flugzeugbetreiber und Flughäfen auf den ersten Blick feststellen können, ob ein bestimmtes Flugzeug einen Flughafen uneingeschränkt nutzen kann oder nicht. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass keine eigentliche Aussage über die tatsächliche, quantitative Tragfähigkeit eines Oberbaus gemacht wird, sie stellt lediglich eine untere Schranke dar und dient der Klassifikation.

ACN steht für *Aircraft Classification Number* (Lastklassifikationszahl des Luftfahrzeugs) und PCN für *Pavement Classification Number* (Lastklassifikationszahl des Oberbaus). Für jeden Oberbau eines Flughafens muss die PCN in Form eines ganzzahligen Wertes angegeben werden. Ist der Wert größer oder gleich dem ACN-Wert eines bestimmten Luftfahrzeuges, so kann dieses die betrachtete Flugbetriebsfläche uneingeschränkt nutzen. Liegt die ACN über der PCN, ist unter bestimmten Einschränkungen ein Überlastbetrieb möglich. Darüber hinaus können Einschränkungen bezüglich der Gesamtmasse des Luftfahrzeugs oder des Reifendrucks vorliegen.

Die Angaben zur Tragfähigkeit eines Oberbaus sind nach der ACN/PCN – Methode codiert darzustellen, bestehend aus einer Zahl und vier Buchstaben. Dadurch kann in einfacher Form ausreichend Information über die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten der Bewegungsfläche mitgeteilt werden. Es ist folgende Darstellungsweise einzuhalten:

PCN 100 / a) / b) / c) / d)

Die eigentliche Lastklassifikation wird durch „PCN 100“ beschrieben. Die nachstehenden Buchstaben geben zusätzliche Informationen a) zum Belag, b) dem Untergrund, c) der Reifendruckkategorie und d) der Bewertungsmethode. Sie werden im Folgenden erläutert [ICAO, 2009]:

a) Art des Oberbaus für die ACN/PCN-Bestimmung:

	<i>Code-Buchstabe</i>
Starrer Oberbau	<i>R</i>
Flexibler Oberbau	<i>F</i>

b) Unterbau-Tragfähigkeitskategorie:

	<i>Code-Buchstabe</i>
<i>Hohe Tragfähigkeit:</i> Gekennzeichnet durch $k = 150 \text{ MN/m}^3$ und geltend für alle k -Werte über 120 MN/m^3 bei starren Oberbauten sowie durch $\text{CBR} = 15$ und geltend für alle CBR -Werte über 13 bei flexiblen Oberbauten.	<i>A</i>
<i>Mittlere Tragfähigkeit:</i> Gekennzeichnet durch $k = 80 \text{ MN/m}^3$ und geltend für einen k -Bereich von 60 bis 120 MN/m^3 bei starren Oberbauten sowie durch $\text{CBR} = 10$ und geltend für einen CBR -Bereich von 8 bis 13 bei flexiblen Oberbauten.	<i>B</i>
<i>Geringe Tragfähigkeit:</i> Gekennzeichnet durch $k = 40 \text{ MN/m}^3$ und geltend für einen k -Bereich von 25 bis 60 MN/m^3 bei starren Oberbauten sowie durch $\text{CBR} = 6$ und geltend für einen CBR -Bereich von 4 bis 8 bei flexiblen Oberbauten.	<i>C</i>
<i>Extrem geringe Tragfähigkeit:</i> Gekennzeichnet durch $k = 20 \text{ MN/m}^3$ und geltend für alle k -Werte unter 25 MN/m^3 bei starren Oberbauten sowie durch $\text{CBR} = 3$ und geltend für alle CBR -Werte unter 4 bei flexiblen Oberbauten.	<i>D</i>

c) Kategorie für den höchstzulässigen Reifendruck:

	<i>Code-Buchstabe</i>
<i>Hoch:</i> keine Druckgrenze	<i>W</i>
<i>Mittel:</i> Druck begrenzt auf 1,50 MPa	<i>X</i>
<i>Niedrig:</i> Druck begrenzt auf 1,00 MPa	<i>Y</i>
<i>Sehr niedrig:</i> Druck begrenzt auf 0,50 MPa	<i>Z</i>

d) Bewertungsmethode:

	<i>Code-Buchstabe</i>
<i>Technische Bewertung:</i> zutreffend bei Durchführung einer	<i>T</i>

spezifischen Untersuchung der Eigenschaften des Oberbaus und der Anwendung technischer Methoden zur Untersuchung des Verhaltens von Oberbauten.

Nutzung von Erfahrungen mit Luftfahrzeugen: zutreffend bei U
Kenntnis der einzelnen Luftfahrzeugmuster und ihrer Massen, die bei regulärer Benutzung einwandfrei getragen werden.

Ein konkretes Beispiel einer PCN könnte folgendermaßen aussehen:

PCN 100 / F / A / W / T

Das Beispiel beschreibt einen Oberbau mit flexiblem Aufbau auf einem Unterbau mit hoher Tragfähigkeit, bei dem durch eine technische Bewertungsmethode ein PCN-Wert von 100 ermittelt wurde. Für den Reifendruck liegt keine Begrenzung vor.

ad a)

Starre Aufbauten (engl.: Rigid) bestehen aus einer plattenförmigen Decke aus Beton, meist unbewehrt, aber auch bewehrt und vorgespannt, liegend auf lastverteilenden Zwischenschichten oder auch direkt auf dem Untergrund. Flexible Aufbauten (engl.: Flexible) werden durch eine Abfolge mehrere Schichten gebildet, die vom Untergrund bis zur Oberfläche in ihren Festigkeitseigenschaften zunehmen. Die Deckschicht besteht meist aus Asphaltbeton, kann aber auch als Pflasterdecke ausgeführt werden. Bei hybrider Bauweise, etwa bei einer Asphaltdecke auf zementstabilisierter Tragschicht (ST-Z), ist die Bezeichnung entsprechend der dominierenden Komponente zu wählen. Im Zweifelsfall ist die Klassifikation auf der sicheren Seite als flexibel anzugeben. Da die Funktionsweise der Lastableitung und somit die ACN eines Luftfahrzeugs mit der Art des Oberbaus variiert, muss diese bei der PCN angegeben werden, um einen korrekten Vergleich zu ermöglichen.

ad b)

Die Tragfähigkeit einer Bewegungsfläche hängt bei gleichbleibendem Oberbau ganz wesentlich vom anstehenden Untergrund beziehungsweise Unterbau ab. Eine weitere Besonderheit ist die Lastverteilung bei unterschiedlichen Untergrundkategorien: Während sich die Ausbreitung der Last bei hoher Untergrundtragfähigkeit über einen relativ schmalen Bereich beschränkt, verteilt sich dieselbe Last bei geringer Untergrundtragfähigkeit über eine wesentlich breitere Fläche. Weisen dann manche LFZ sehr eng beieinanderliegende Fahrwerksbeine auf, so tritt unter Umständen eine Überlagerung der Beanspruchungen auf, die es bei höherer Tragfähigkeit des

Untergrunds in dieser Form nicht geben würde. Diese Eigenschaft verdeutlicht die Notwendigkeit, die ACN für verschiedene Untergrundkategorien getrennt anzugeben. Nur so können verschiedene LFZ-Typen realistisch miteinander verglichen und deren Auswirkungen auf eine Bewegungsfläche mit einer definierten PCN abgeschätzt werden.

Üblicherweise ist für einen Flughafen eine Kategorie angebracht. Bei stark abweichenden Böden können jedoch verschieden gewidmete Fläche unterschiedlich kategorisiert werden. Darüber hinaus können bei sehr starken jahreszeitlichen Schwankungen der Untergrundeigenschaften unterschiedliche PCN-Werte angegeben werden. Grundsätzlich gilt aber das Prinzip der unteren Schranke.

ad c)

Die Druckspannung in der Reifenaufstandsfläche und somit der Reifeninnendruck haben den größten Einfluss auf die direkte Belastung der Oberfläche. Abgesehen vom Fall brüchiger Kanten bei Fugen, hat der Reifendruck keine Auswirkungen auf die Tragfähigkeit starrer Aufbauten und es liegen keine Einschränkungen vor. Flexible Oberbauten jedoch werden durch hohe Innendrucke in der Deckschicht stärker durch Scherspannungen und eine eventuelle Nachverdichtung beansprucht. Die höchste Kategorie für den Reifendruck ist daher bei Asphaltoberbauten in der Regel nur bei Verwendung polymermodifizierter Bindemittel möglich [Blab et al., 2011]. Bei Zwischenwerten kann bei Bedarf von der vorgegebenen Indizierung abgewichen und der höchstzulässige Reifendruck in MPa angegeben werden.

ad d)

Im *Aerodrome Design Manual – Part 3* [ICAO, 1983] wird empfohlen, immer wenn möglich der technischen Bewertungsmethode (engl.: Technical evaluation) den Vorzug zu geben. Das Prinzip ist genau umgekehrt zu dem der Bemessung: Bei der Bemessung ermittelt man ausgehend von einer zu erwartenden Belastung und den vorliegenden Untergrundeigenschaften die Dicken und Materialanforderungen der einzelnen Oberbauschichten. Bei der Tragfähigkeitsbewertung wird im Gegensatz dazu vom vorhandenen Schichtenaufbau mittels mathematischer Methoden auf eine maximal aufnehmbare Last geschlossen. Wenn eine technische Bewertung nicht möglich oder beispielsweise aus wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar ist, kann die Nutzung von Erfahrungen mit Luftfahrzeugen (engl.: Using aircraft method) angewandt werden. Dabei wird zur Bewertung das maßgebende Luftfahrzeug herangezogen, also jenes mit dem höchsten ACN-Wert, das regelmäßig (und nachweisbar schädigungsfrei) auf der betrachteten Flugbetriebsfläche verkehrt, und der PCN-Wert diesem ACN-Wert gleichgesetzt. Definitionsgemäß ist diese Methode nur bei bestehenden Oberbauten

möglich und darüber hinaus in der Regel sehr konservativ und folglich unwirtschaftlich.

Ist ein kritisches Luftfahrzeug auf einer Bewegungsfläche nur mit beschränkter Höchstmasse zulässig, so muss dies der PCN als Anmerkung beigefügt werden. *Annex 14* zeigt folgendes Beispiel: „Anmerkung. – Die bekannt gegebene PCN-Zahl unterliegt einer B747-400-Gesamtmassenbegrenzung von 390.000 kg.“ [ICAO, 2009]. Das bedeutet konkret, dass auf der beschriebenen Flugbetriebsfläche eine Boeing 747-400 nicht vollgetankt manövrieren darf. Darüber hinaus ist die ACN/PCN – Methode nur bei Oberbauten anzuwenden, die für Luftfahrzeuge mit einer Maximalmasse von mehr als 5.700 kg vorgesehen sind. Andernfalls sind lediglich die höchstzulässige Luftfahrzeugmasse und der höchstzulässige Reifendruck bekanntzugeben. Die Methode mit der Verwendung von Erfahrungswerten ist in solchen Fällen ausreichend.

3.2 Bestimmung des ACN-Werts

Die ICAO beschreibt die ACN wie folgt: „Eine Zahl, welche die relative Auswirkung eines Luftfahrzeugs auf einen Oberbau für eine bestimmte Unterbautragfähigkeitskategorie ausdrückt“ [ICAO, 1983]. Für alle vier verschiedenen Unterbaukategorien, müssen die Werte jeweils für starre und für flexible Aufbauten angegeben werden. Weiters muss zwischen der größten auftretenden Masse (engl.: maximum ramp gross mass) und der Leermasse (engl.: operating empty mass) unterschieden werden. Alle Hersteller sind somit verpflichtet, für ein Luftfahrzeug 16 ACN-Werte zu veröffentlichen. In Tabelle 2 sind beispielhaft die ACN-Werte des aktuellsten Flugzeugs von Boeing, der 747-8I, angegeben.

Tabelle 2: ACN-Werte einer Boeing 747-8I [geändert nach Boeing, 2012]

	Last auf ein HFW-Bein	Reifen- druck	ACN für starre Oberbauten				ACN für flexible Oberbauten			
			Untergrundklassifizierung				Untergrundklassifizierung			
	[%]	[MPa]	A	B	C	D	A	B	C	D
Größte Masse 449.056 [kg]	23,67	1,52	65	77	90	102	63	71	88	112
Geringste Masse 226.796 [kg]	23,67	1,52	27	30	35	41	27	28	32	43

In sehr speziellen Fällen müssen die 16 Werte gesondert für verschiedene Fahrwerksbeine angegeben werden. Dies betrifft insbesondere den Airbus A380. Hier bestehen die äußeren Hauptfahrwerksbeine aus einer Doppelradtandem- und die inneren aus einer Doppelradtridem-Bereifung. Maßgebend sind dann jeweils die maximalen Werte, die je nach

Untergrundkategorie entweder am inneren oder am äußeren Fahrwerk auftreten. Die Fahrwerkskonfiguration des A380-800 ist in Abbildung 12 (am Beispiel des Bemessungsflugzeugs für die Österreichische Methode) auf Seite 41 zu sehen.

Annex 14 gibt vor, dass die Bestimmung der ACN nach dem Standardverfahren des *Aerodrome Design Manual – Part 3* zu erfolgen hat. Abbildung 10 zeigt diesbezüglich ein grobes Ablaufschema. Aus diesem Schema sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die einzelnen ACN-Werte eines LFZ ableitbar: die Flugzeugmasse, also die jeweilige Gesamtmasse und deren Verteilung auf die einzelnen Hauptfahrwerksbeine, der Radabstand, vor allem die Radkonfiguration (z.B. Doppelradtandem) sowie die Abstände der Räder zueinander, und der Reifeninnendruck, in diesem Zusammenhang auch der Radius und die daraus entstehende Aufstandsfläche. Um eine relative Bewertung zu ermöglichen und eine standardisierte ACN zu erhalten, bleibt die betriebsbedingte Überrollungshäufigkeit für die ACN/PCN – Methode unberücksichtigt und ist stattdessen gemäß [ICAO, 1983] mit 10.000 Lastwiederholungen anzunehmen.

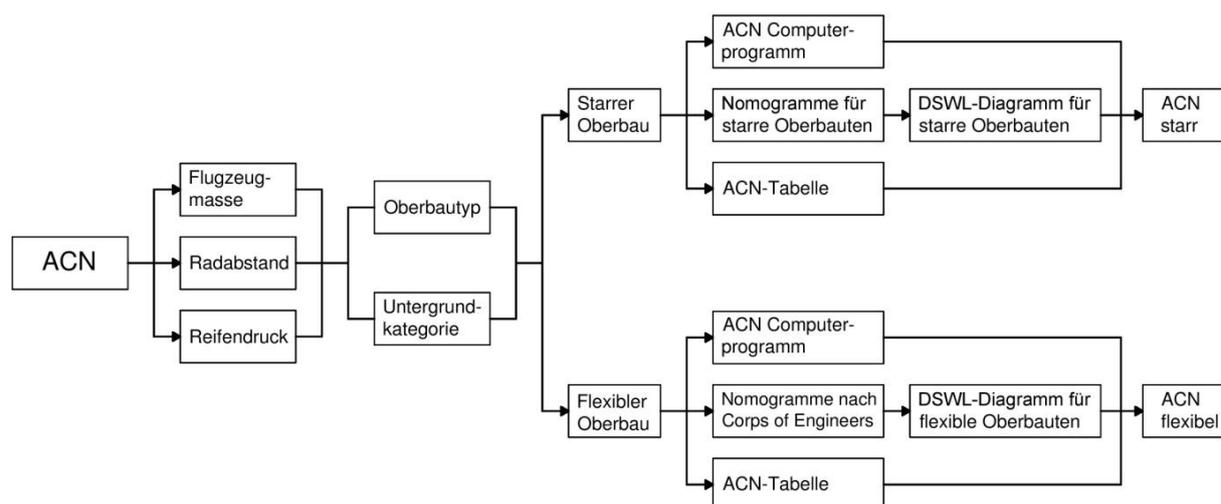


Abbildung 10: Ablaufschema zur Ermittlung der ACN [geändert nach ICAO, 1983]

Die Grundlegende Problemstellung ist, dass die ACN von Luftfahrzeugen mit sehr unterschiedlichen Fahrwerksanordnungen miteinander vergleichbar sein müssen. Darüber hinaus sollen ACN-Werte ohne Zuordnung zu einer Oberbaudicke angegeben werden können. In diesem Sinne wird das Konzept einer äquivalenten Einzelradlast (engl.: ESWL – Equivalent Single Wheel Load) beziehungsweise einer abgeleiteten Einzelradlast (engl.: DSWL – Derived Single Wheel Load) angewandt. Die ESWL ist jene Last, welche die gleichen Dehnungen (flexibler Aufbau) oder Spannungen (starrer Aufbau) im Oberbau bewirkt, wie das gegebene Hauptfahrwerksbein. Die DSWL entspricht der ESWL, jedoch umgelegt auf einen einheitlichen Reifeninnendruck von 1,25 MPa. Die ACN berechnet sich schließlich als das Zweifache der DSWL, angegeben in 1.000 Kilogramm. Der Faktor 2 dient

dabei lediglich dazu, die ACN mit ausreichender Genauigkeit als ganze Zahl angeben zu können.

Für die Spannungsermittlung werden im Wesentlichen zwei mathematische Modelle für die verschiedenen Oberbautypen verwendet: Bei starren Aufbauten kommt die Westergaard'sche Lösung für Platten auf elastischer Winkler-Bettung zur Anwendung, bei flexiblen Aufbauten der Ansatz von Boussinesq für Spannungen und Verschiebungen in einem homogen-isotrop-elastischen Halbraum. Bei starren Oberbauten ist die Biegezugfestigkeit des Betons als Gebrauchswert mit 2,75 MPa anzunehmen. Aufgebaut auf diesen mathematischen Modellen, beschreibt die ICAO zwei Computerprogramme zur Ermittlung der ACN und daraus abgeleitete Diagramme, die dem Anhang des *Part 3* [ICAO, 1983] entnommen werden können. Des Weiteren werden von der ICAO Diagramme zur Verfügung gestellt, aus denen, in Kombination mit Angaben der Flugzeughersteller zur Dickenermittlung, rasch ACN-Werte abgelesen werden können. In Abbildung 11 ist als Beispiel das Diagramm für flexible Aufbauten gezeigt. Sind ein CBR-Wert und die geforderte Referenzdicke als Eingangswerte bekannt, kann aus dem Diagramm die DSWL oder auch direkt die ACN abgelesen werden. Die benötigte Referenzdicke des flexiblen Aufbaus erhält man aus Diagrammen der Flugzeughersteller, wie beispielsweise in Abbildung 7 (Abschnitt 2.4.2) für den Airbus A380 dargestellt. Für die ACN-Bestimmung ist dabei die Kurve mit 10.000 Lastwiederholungen (engl.: coverages) zu verwenden.

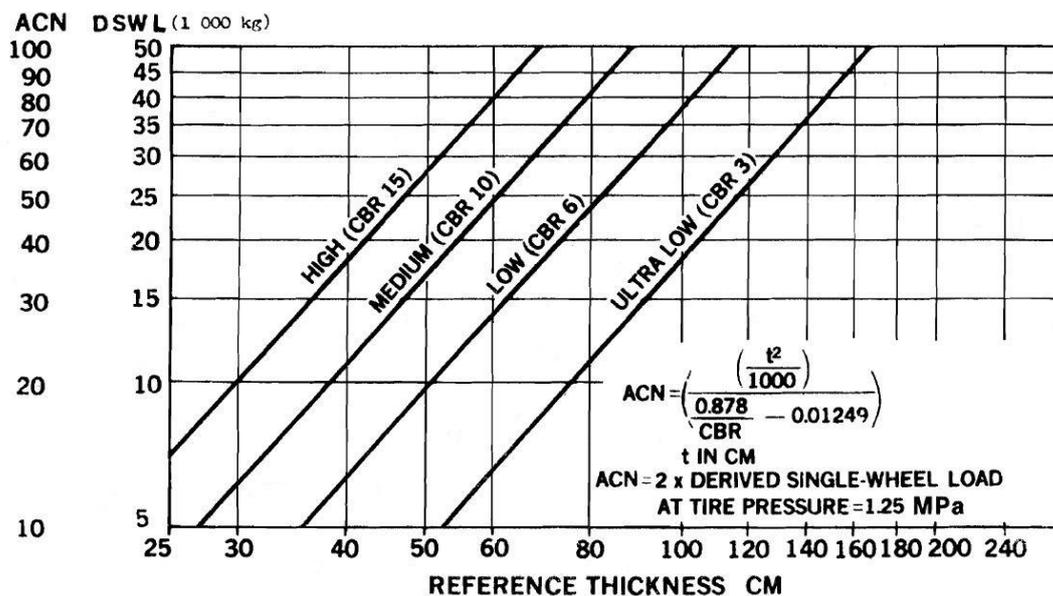


Abbildung 11: ACN-Ermittlung für flexible Oberbauten [ICAO, 1983]

Eine aktuelle Weiterentwicklung der ursprünglichen und etwas in die Jahre gekommenen Computerprogramme bietet die US-amerikanische FAA mit der Software COMFAA, die im Advisory Circular 150_5335_5B [FAA, 2011] erwähnt und erläutert wird und kostenlos auf

der offiziellen Homepage der FAA als Download erhältlich ist. Da die Ermittlung von ACN-Werten in erster Linie den Flugzeugherstellern obliegt, wird an dieser Stelle nicht mehr weiter ausgeführt.

3.3 Bestimmung des PCN-Wertes

Die ICAO definiert die PCN folgendermaßen: „Eine Zahl, welche die Tragfähigkeit eines Oberbaus für uneingeschränkten Betrieb ausdrückt“ [ICAO, 1983]. Durch welche Methode dieser Wert erlangt wird, steht den Mitgliedsstaaten frei; es muss lediglich angegeben werden, ob eine technische Bewertung (T) oder die Verwendung von Erfahrungswerten (U) angewandt wurde.

3.3.1 Nutzung von Erfahrungen mit Luftfahrzeugen

Die sogenannte „Using Aircraft Method“ ist die einfachere Vorgehensweise zur Bestimmung der PCN und sollte nur dann angewendet werden, wenn eine technische Bewertung aus begründeten Umständen nicht vertretbar ist. Der grundlegende Gedanke hinter der Methode ist die folgende Annahme: Ein Oberbau, der den ständig auftretenden Verkehr zufriedenstellend und ohne Schädigung aufnehmen kann, kann als in der Lage betrachtet werden, das schwerste regelmäßig verkehrende Luftfahrzeug schädigungsfrei aufzunehmen und somit auch alle anderen LFZ, die geringerer Anforderungen bezüglich der Tragfähigkeit bedürfen. Es wird ersichtlich, dass diese Methode nur bei bestehenden Flugbetriebsflächen und bei Vorhandensein entsprechend detaillierter Erfahrungswerte anwendbar ist. Der Schwerpunkt ist dabei auf das Flugzeug mit der höchsten Masse zu legen, welches meist das kritische LFZ darstellt. Vorsicht ist jedoch geboten, wenn außerordentlich schwere Flugzeuge nur sehr selten auftreten. In diesem Fall ist nicht sichergestellt, dass bei regelmäßigem Betrieb desselben keine starken Abnutzungserscheinungen oder Schädigungen auftreten. Wird die PCN andererseits auf Basis eines deutlich unterkritischen LFZ gewählt, erfährt der Flughafenbetreiber unter Umständen wirtschaftliche Einbußen, wenn aus dem falschen Grund, eigentlich zulässigen Flugzeugen die Nutzung verwehrt bleibt. Um diesen Problemen zu entgehen, müssen entsprechend langfristige und ausreichend genaue Statistiken zugrunde liegen.

Auch wenn die Nutzung von Erfahrungswerten als die einfachere Methode zur Bestimmung der PCN gilt, so ist dennoch einiger Aufwand zu betreiben. Dies bezieht sich vor allem auf die Untersuchung, welchen Einfluss der Verkehr und insbesondere bestimmte LFZ auf die Bewegungsflächen haben. Der Zustand des Oberbaus muss gründlich hinsichtlich

Abnutzung, Verformungen und Eckabbrüche als Folge einer Schädigung durch Fluggerät begutachtet werden. Dabei ist der relative Zustand stark frequentierter, mit jenem selten frequentierter Bereiche zu vergleichen, beispielsweise an verschiedenen oft befahrenen Rollwegen. Erst nach umfangreicher Zustandserfassung kann auf Basis dieser Daten eine begründete Prognose für längere Zeiträume erstellt werden. Des Weiteren müssen Oberbautyp, Untergrundkategorie und Reifendruck für die PCN definiert werden:

- Der OBERBAUTYP, flexibel oder starr, muss anhand der Struktur festgelegt werden und liegt meist auf der Hand. Ist das primäre Element eine Betonplatte, so liegt starres Verhalten vor, selbst wenn eine Asphaltsschicht als Deckschicht angeordnet ist. In allen anderen Fällen, vor allem auch im Zweifelsfall, ist der Aufbau als flexibel anzusehen.
- Die UNTERGRUNDTRAGFÄHIGKEITSKATEGORIE für die PCN muss aus Versuchswerten abgeleitet werden. Liegen Auswertungen aus der Planungsphase vor, können diese direkt verwendet werden. Andernfalls sind Tests durchzuführen, die auch in unmittelbarer Umgebung des betrachteten Geländes bei identischer Bodenart als gültig angesehen werden können.
- Der maximal zulässige REIFENDRUCK muss in die Kategorien W bis Z eingeteilt werden. Starre Aufbauten mit Betonoberfläche können in der Regel als Kategorie W, ohne Druckbeschränkung zugelassen werden. Bei flexiblen Aufbauten ist der höchstzulässige Reifendruck in Zusammenhang mit den beobachteten Schäden an Oberflächen zu bestimmen. Bei sehr guter Qualität und Ausführung der Deckschicht ist auch hier ein Betrieb ohne Druckbeschränkung möglich.

Ist nun ein kritisches Luftfahrzeug gefunden und sind sämtliche weitere Parameter definiert, kann die PCN bestimmt werden. Gibt es keine bekannten Faktoren, die darauf hindeuten, dass ein wesentlich schwereres Flugzeug zugelassen werden kann, entspricht die PCN dem ACN-Wert des kritischen LFZ, bezogen auf den vorhandenen Oberbautyp und die Untergrundkategorie. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass jedes LFZ mit einer gleichen oder geringeren ACN, bei einer Verkehrsfrequenz kleiner oder gleich der bestehenden, die betrachtete Flugbewegungsfläche benützen kann, ohne dass eine nennenswerte Verkürzung der Lebensdauer zu erwarten ist.

„Falls notwendig, können PCN-Werte mit einer Genauigkeit von einem Zehntel einer Ganzen Zahl veröffentlicht werden“ [ICAO, 2009]. Im Normalfall ist jedoch die Angabe einer ganzen Zahl als ausreichend anzusehen.

3.3.2 Technische Bewertung

Diese Bewertungsmethode wird von der ICAO als bevorzugt empfohlen, da sie präzisere Ergebnisse liefert und ist vor allem die einzige Möglichkeit der PCN-Bestimmung bei neu zu errichtenden Flugbetriebsflächen. Die Tragfähigkeit eines Oberbaus wird in Bezug auf den strukturellen Aufbau mittels technischer Überlegungen quantifiziert. Es wird im Prinzip umgekehrt vorgegangen, wie bei der eigentlichen Bemessung: Unter Zuhilfenahme einer herkömmlichen Methode zur Oberbaubemessung kann aus dem vorhandenen (oder geplanten) Schichtenaufbau auf eine maximal aufnehmbare Last geschlossen werden. Hierfür sind alle Bemessungsmethoden, sowohl empirische als auch analytische, zulässig. Eine weitere Möglichkeit basiert auf der direkten Auswertung von Lastversuchen.

Früher standen ausschließlich empirische Methoden zur Verfügung, die durch theoretische Ansätze erweitert wurden. Aus Versuchen und Erfahrungswerten wurden Nomogramme abgeleitet, mit deren Hilfe die Bemessung beziehungsweise die Ermittlung von PCN-Werten durchgeführt werden kann. Ein Beispiel dafür ist die 1928 in den USA entwickelte CBR-Methode. Sie dient auch als Basis für die staatlichen Methoden einiger Mitglieder der ICAO. Ebenfalls sehr häufig Anwendung fand die Methode nach Westergaard für starre Aufbauten, meist für den Lastfall Plattenmitte. Modernere Verfahren sind hingegen kaum bis gar nicht empirischer Natur. Spätestens seit der Verbreitung leistungsstarker Computer wird fast ausnahmslos mit Verfahren wie der Mehrschichtentheorie für flexible und der Finite-Elemente-Methode für starre Strukturen gearbeitet. Die ICAO verweist im *Aerodrome Design Manual, Part 3* auf zwei Methoden: Die Methode der *Portland Cement Association* (PCA-Methode) für starre Aufbauten und die *FAA Design Method* für flexible Aufbauten. Beide können inzwischen als veraltet und überholt betrachtet werden. Die genannte FAA-Methode gilt seit 2009 offiziell nicht mehr als das Standardverfahren der FAA, sie wurde abgelöst durch das Programm *COMFAA*, mit dem sowohl ACN als auch PCN berechnet werden können. Eine weitere aktuelle Alternative stellt das Programm *Pavers* dar. Beide Programme sind übersichtlich gestaltet und benutzerfreundlich in der Anwendung.

Bei der PCN-Bestimmung spielt nicht nur die maximale Belastung, dargestellt durch Fahrwerkstypen und größte auftretende Gesamtmassen, eine Rolle, sondern, wie auch bei der Bemessung, die Überrollungshäufigkeit. Dies verdeutlicht eine Überlegung bezüglich der Schäden: Diese treten nur selten bei einmaliger Belastung auf, sondern vielmehr bei periodisch wiederkehrender, überhöhter Beanspruchung. So kann ein sehr schweres LFZ eine Piste unter Umständen einmalig scheinbar schädigungsfrei benutzen, bei regelmäßiger Nutzung jedoch die Lebensdauer signifikant verkürzen. In dieser Hinsicht wird der prognostizierten Verkehrsentwicklung eine wichtige Rolle zuteil. Bei der Methode der FAA

[FAA, 2011] beispielsweise, wird unter Anwendung des Konzepts des *Cumulative Damage Factor* (siehe 2.5.2) der Verkehrsmix in äquivalente jährliche Starts eines repräsentativen LFZ überführt. Dieses LFZ muss so gewählt sein, dass bei errechneter Frequenz die geplante Lebensdauer der Flugbetriebsfläche erreicht werden kann. Ist die erlaubte Tragfähigkeit erst bestimmt, kann die PCN durch die ACN des besagten LFZ ausgedrückt werden.

3.4 Überlastbetrieb

Überlastbetrieb liegt dann vor, wenn die ACN eines Luftfahrzeugs größer als die PCN der betrachteten Fläche ist. *Annex 14* empfiehlt, in dieser Hinsicht Kriterien aufzustellen, um solche Fälle klar zu regeln. Dabei gilt es Folgendes zu beachten: Ist die ACN höher als die PCN, tritt in der Regel kein plötzliches vollständiges Versagen auf (höchstens bei extremer Überlastung), sondern vielmehr eine Verkürzung der Lebensdauer des Oberbaus. In einer Studie der FAA in Form einer Sensitivitätsanalyse für die Bemessung flexibler Aufbauten, wurde unter anderem der Einfluss der Flugzeugmassen auf die Tragfähigkeit untersucht [Garg et al., 2004]. Dabei wurde an einem konkreten Beispiel die Erkenntnis gewonnen, dass die prognostizierte Lebensdauer einer Piste von 20 auf 9 Jahre sinkt, wenn die Masse der betrachteten Boeing 737 um 10 % erhöht wird.

Eine Überlastung im Sinne einer Beschleunigung der Alterung kann somit sowohl durch überhöhte Lasten als auch durch eine unzulässig erhöhte Zahl an Belastungsvorgängen auftreten. Da bei geringer Überlastung schlimmstenfalls eine nur unwesentliche Verkürzung der Lebensdauer zu erwarten ist, kann diesbezüglich eine gewisse Toleranz in Kauf genommen werden, die jedoch in behördlichen Regelungen festgelegt werden muss. Für einen unmaßgeblich überhöhten Betrieb, der keiner besonderen Analyse bedarf, gibt die ICAO folgende Empfehlungen ab [ICAO, 2009]:

- Flexible Oberbauten sollten durch gelegentliche Beanspruchung von LFZ mit einer ACN, die nicht mehr als 10 % über der PCN liegt, nicht in ihrer Tragfähigkeit beeinträchtigt werden.
- Starre Oberbauten sowie Verbundaufbauten mit starrer Hauptkomponente sollten durch gelegentliche Beanspruchung von LFZ mit einer ACN, die nicht mehr als 5 % über der PCN liegt, nicht in ihrer Tragfähigkeit beeinträchtigt werden.
- Bei nicht bekannter Tragstruktur gilt die Grenze von 5 %.
- Die Überlastbewegungen sollen jährlich nicht mehr als 5 % der gesamten Luftfahrzeugbewegungen ausmachen.

Die aufgezählten Kriterien sollen jedoch ausschließlich für Oberbauten in einwandfreiem Zustand gelten; Bewegungsflächen, die deutliche Spuren der Schädigung oder Ermüdung zeigen, sollen vom Überlastbetrieb ausgenommen werden. Ähnliche Einschränkungen sind auch dann sinnvoll vorzunehmen, wenn die Tragfähigkeit aufgrund jahreszeitlicher Schwankungen nicht voll gegeben ist. Dies kann vor allem in der Tauwetterperiode, nach vollständiger Frosteindringung in den Untergrund oder bei verminderter Tragfähigkeit des Untergrunds durch Wasser auftreten.

Da die genannten Empfehlungen keine zwingenden Richtlinien darstellen, steht es den Mitgliedsstaaten frei, Überlastkriterien nach eigenem Ermessen aufzustellen. Die Methoden einiger Länder sind im *Aerodrome Design Manual – Part 3* [ICAO, 1983] beispielhaft aufgezeigt.

4 NEUE ÖSTERREICHISCHE BEMESSUNGSMETHODE

Wie in den vorangegangenen Kapiteln immer wieder deutlich wurde, basieren bisher verwendete Verfahren oft auf längst überholten Theorien, die eine Bemessung nur mit starken Vereinfachungen erlauben. Die damit einhergehende, zwangsläufig konservative, Vorgehensweise liefert somit meist unwirtschaftliche Ergebnisse. Dadurch und durch die Tatsache, dass längst effektivere, computergestützte Verfahren zur Spannungs- und Verzerrungsberechnung existieren, stieg in den letzten Jahren der Bedarf an einer modernen und konsistenten Methode zur Bemessung von Flugbetriebsflächen. Aus diesem Grund und im Hinblick auf die geplante dritte Piste am Flughafen Wien-Schwechat, wurde von einem Projektteam rund um die TU-Wien, im Auftrag der Flughafen Wien AG, eine Österreichische Bemessungsmethodik entwickelt. Sämtliche Erkenntnisse und Ausarbeitungen zu diesem Projekt wurden im „*Schlussbericht zur Parallelpiste 11R/29L – Bemessungs- und bautechnische Optimierung der Oberbauten der Flugbetriebs- und Bewegungsflächen*“ [Blab et al., 2011] verfasst.

Die neue Österreichische Methode orientiert sich am Grundkonzept der US-amerikanischen FAA zur Bewertung der Tragfähigkeit von Flugbewegungsflächen [FAA, 2011] und berücksichtigt auf diese Weise die ACN/PCN-Methode, die von der ICAO für alle Mitgliedsstaaten vorgeschrieben ist. Die eigentliche Bemessung erfolgt jedoch in Übereinstimmung mit bewährten österreichischen Vorgehensweisen zur Dimensionierung von Fahrbahnaufbauten.

4.1 Bemessungskonzept

Die Österreichische Methode erlaubt es, eine Vielzahl relevanter LFZ bei der Dimensionierung des Oberbaus zu berücksichtigen. Dies erfolgt jedoch indirekt über die äquivalente Belastung durch ein Bemessungsflugfahrzeug (BLFZ), das entsprechend dem prognostizierten Anforderungsprofil des Flughafens gewählt werden muss. Die ACN dieses Bemessungsflugzeugs wird dabei so hoch angesetzt, dass sie die ACN aller erwarteten Flugzeuge übertrifft und diese die betrachteten Bewegungsflächen somit uneingeschränkt nutzen können. Da die Bemessung mittels der Belastung durch das Bemessungsflugzeug erfolgt und der Oberbau diesem somit schädigungsfrei standhält, ist die PCN definitionsgemäß höher als die ACN. Durch diese Vorgehensweise entfällt die Notwendigkeit, zusätzlich zur Bemessung die PCN des Oberbaus zu ermitteln, da sie

zumindest dem Wert der ACN des Bemessungsluftfahrzeugs entspricht und als solcher veröffentlicht werden kann.

4.1.1 Einwirkungsseite

Da die eigentliche Dimensionierung des Oberbaus mittels der einheitlichen Belastung durch das gewählte (fiktive) Bemessungsluftfahrzeug durchgeführt wird, müssen die tatsächlich auftretenden Belastungsvorgänge der einzelnen LFZ aus der erwarteten Flugzeugflotte in analoge Belastungen umgerechnet werden. Zu diesem Zweck führt die Österreichische Methode die sogenannten Aggressivitätszahlen als Äquivalenzfaktoren ein. Die Aggressivitätszahlen beschreiben die relative Schädigung, die eine Überrollung eines bestimmten bemessungsrelevanten LFZ in Bezug auf das Bemessungsluftfahrzeug bewirkt. Diese Werte müssen explizit für jeden untersuchten Schichtenaufbau sowie für die vorliegenden Untergrundtragfähigkeitsverhältnisse bestimmt werden und schwanken zwischen den Flugzeugtypen, je nach Gewicht und Fahrwerks- bzw. Radkonfiguration. Die exakten Vorgänge zur Ermittlung der Aggressivitätszahlen werden anhand des Beispiels des Flughafens Wiens in Kapitel 5 und 6 aufgezeigt. Wird schließlich die prognostizierte Anzahl der Starts eines LFZ mit dessen Aggressivitätszahl multipliziert, so erhält man die (bezüglich der Schädigung) äquivalente Anzahl an Starts durch das Bemessungsluftfahrzeug. Durch Aufsummieren über die gesamte bemessungsrelevante Flugzeugflotte erhält man die Bemessungsverkehrsbelastung ($N_{BLFZ,erf}$) für den betrachteten Bemessungszeitraum, ausgedrückt in Überrollungen durch das BLFZ. Diese stellt die Einwirkungsseite des Bemessungsverfahrens dar und ist in Gleichung (3) beschrieben [Blab et al., 2011].

$$N_{BLFZ,erf} = \sum_i (N_{LFZ,i} \cdot A_{LFZ,i}) \cdot n \cdot z \quad (3)$$

$N_{BLFZ,erf}$	...	Anzahl der äquivalenten Starts des Bemessungsluftfahrzeugs in der Bemessungsperiode
$N_{LFZ,i}$	...	Anzahl der jährlichen Starts des bemessungsrelevanten Luftfahrzeugs vom Typ i
$A_{LFZ,i}$	...	Aggressivitätszahl des bemessungsrelevanten Luftfahrzeugs vom Typ i
n	...	Bemessungsperiode in Jahren
z	...	Zuwachsfaktor $z = \frac{q^n - 1}{n \cdot (q - 1)}$ mit $q = 1 + \frac{p}{100}$
p	...	prognostizierte mittlere jährliche Zuwachsrate an Starts

4.1.2 Widerstandsseite

Die Widerstandsseite wird definiert durch die maximal zulässige Anzahl an Überrollungen durch das Bemessungsflugzeug ($N_{BLFZ,zul}$). Diese wird im Hinblick auf Materialermüdung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt. Nach einer Spannungs- bzw. Verzerrungsberechnung an den jeweils maßgebenden Punkten des Oberbaus im Einwirkungsbereich der Fahrwerkslasten und der Anwendung einer entsprechenden Festigkeits- und Ermüdungshypothese, kann aus der daraus erhaltenen Schädigung auf die strukturelle Lebensdauer geschlossen werden. Diese Vorgänge unterscheiden sich bei flexiblen und starren Aufbauten ganz wesentlich und werden daher in den nachfolgenden Abschnitten gesondert betrachtet. Ist die Schädigung für den betrachteten flexiblen oder starren Oberbau ermittelt, lassen sich mit Gleichung (4) die zulässigen Lastwechsel für das Bemessungsflugzeug errechnen [Blab et al., 2011].

$$N_{BLFZ,zul} = \frac{1}{C_{ges}} \quad (4)$$

$N_{BLFZ,zul}$	...	zulässige Anzahl an Überrollungen durch das Bemessungslufffahrzeug
C_{ges}	...	Gesamtschädigungsrate durch das Bemessungslufffahrzeug

4.1.3 Dimensionierung

Die rechnerische Dimensionierung erfolgt schließlich über den Vergleich der zulässigen und der (für den Bemessungszeitraum) erforderlichen Verkehrsbelastung in Form von Überrollungen durch das Bemessungslufffahrzeug. Wie in Gleichung (5) formuliert, ist der Oberbau für den Bemessungszeitraum entsprechend der behandelten Verkehrsprognose ausreichend dimensioniert, wenn die zulässige Verkehrsbelastung größer oder gleich der erforderlichen ist. Ist dies nicht der Fall, müssen die Schichtdicken (oder andere Parameter des Aufbaus) erhöht werden und die Berechnungen, beginnend bei der Ermittlung der Aggressivitätszahlen, erneut durchgeführt werden. Um den Aufwand durch eine hohe Zahl derartiger Iterationen zu vermeiden, kann so vorgegangen werden, wie auch im Rahmen der Ausarbeitungen für den Flughafen Wien [Blab et al., 2011]: Es werden drei Aufbauten mit abgestuften Schichtdicken untersucht und das Bemessungsergebnis mittels linearer Interpolation der drei einzelnen Berechnungsergebnisse hinreichend genau abgeschätzt. Da ausschließlich linear-elastische Materialgesetze berücksichtigt werden, ist diese Vorgehensweise zulässig.

$$N_{BLFZ,zul} \geq N_{BLFZ,erf} \quad (5)$$

- $N_{BLFZ,zul}$... zulässige Anzahl an Überrollungen durch das Bemessungsluftfahrzeug
- $N_{BLFZ,erf}$... erforderliche Anzahl an Überrollungen durch das Bemessungsluftfahrzeug

4.2 Bemessungsluftfahrzeug

(Anm.: Da die Österreichische Bemessungsmethode grundsätzlich im Auftrag der Flughafen Wien AG entwickelt wurde, beziehen sich die im Folgenden genannten Anforderungen ebenfalls auf den Flughafen Wien.)

Das Bemessungsluftfahrzeug (BLFZ) dient dazu, die prognostizierte Verkehrsbelastung durch die relevante Flugzeugflotte zum Zwecke der Dimensionierung durch eine äquivalente Anzahl an Belastungsvorgängen zu beschreiben. Wählt man hierfür ein verhältnismäßig kleines Flugzeug, entspricht dies größeren Aggressivitätszahlen und resultiert in einer höheren Anzahl an äquivalenten Überrollungen durch das BLFZ. Wählt man umgekehrt ein sehr großes Flugzeug als BLFZ, so ergeben die Aggressivitätszahlen sehr kleine Werte, was wiederum zu einer geringeren Anzahl an äquivalenten Überrollungen führt. In beiden Fällen ist eine Dimensionierung nach oben genanntem Verfahren grundsätzlich möglich. Da die Österreichische Methode jedoch die von der ICAO verpflichtend geforderte ACN/PCN-Methode impliziert haben soll, ist es erforderlich, ein hinreichend großes Flugzeug als BLFZ zu wählen, um die Anforderungen der ICAO a priori zu erfüllen. Zu diesem Zweck wird das BLFZ bzw. dessen Masse derart gewählt, dass die ACN der geforderten PCN der Flugbetriebsfläche entspricht.

Wie in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten beobachtet werden konnte, tendiert die Flugzeugindustrie zu immer größer werdenden Startgewichten. Einen großen Sprung stellte die Einführung des Airbus A380 dar, der mit 560 Tonnen Maximalgewicht die Boeing 747 um rund 150 Tonnen übertrifft. Weitere, sich in Planung befindende, Versionen des A380 werden (falls ausgeführt) dieses Limit auf bis zu 600 Tonnen erhöhen. Aufgrund dieser Tatsache müssen Flugbetriebsflächen entsprechend großzügig ausgelegt werden, da sie in der Regel für Bemessungszeiträume von mehreren Jahrzehnten ohne Einschränkungen (abgesehen von allfälligen Wartungsarbeiten und Deckschichtsanierungen) verfügbar sein

sollen. Unter Beachtung dessen, werden vom Flughafen Wien folgende Anforderungen für die Tragfähigkeit sämtlicher neu geplanter Flugbetriebsflächen aufgestellt:

- PCN 100 / R / A / W / T (starre Aufbauten)
- PCN 100 / F / A / W / T (flexible Aufbauten)

Um diesen Anforderungen zu genügen, muss ein Flugzeug mit einer ACN von 100 den Oberbau schädigungsfrei über die gesamte Lebensdauer nutzen können. Die ACN muss dabei für die Untergrundtragfähigkeitskategorie A (hohe Tragfähigkeit) und sowohl für starre als auch für flexible Aufbauten den Wert 100 überschreiten (vergleiche Abschnitt 3.2). Des Weiteren dürfen keine Einschränkungen bezüglich des Reifendrucks vorliegen.

Als Fahrwerkskonfiguration für das Bemessungsflugzeug wird die des Airbus A380 herangezogen, wie in Abbildung 12 dargestellt. Dieser verfügt am Hauptfahrwerk über vier getrennte Fahrwerksbeine mit Doppelradtandem- bzw. Doppelradtridem-Bereifung. Für die Bemessung wird nur das Hauptfahrwerk betrachtet, das Bugfahrwerk bleibt außer Acht.

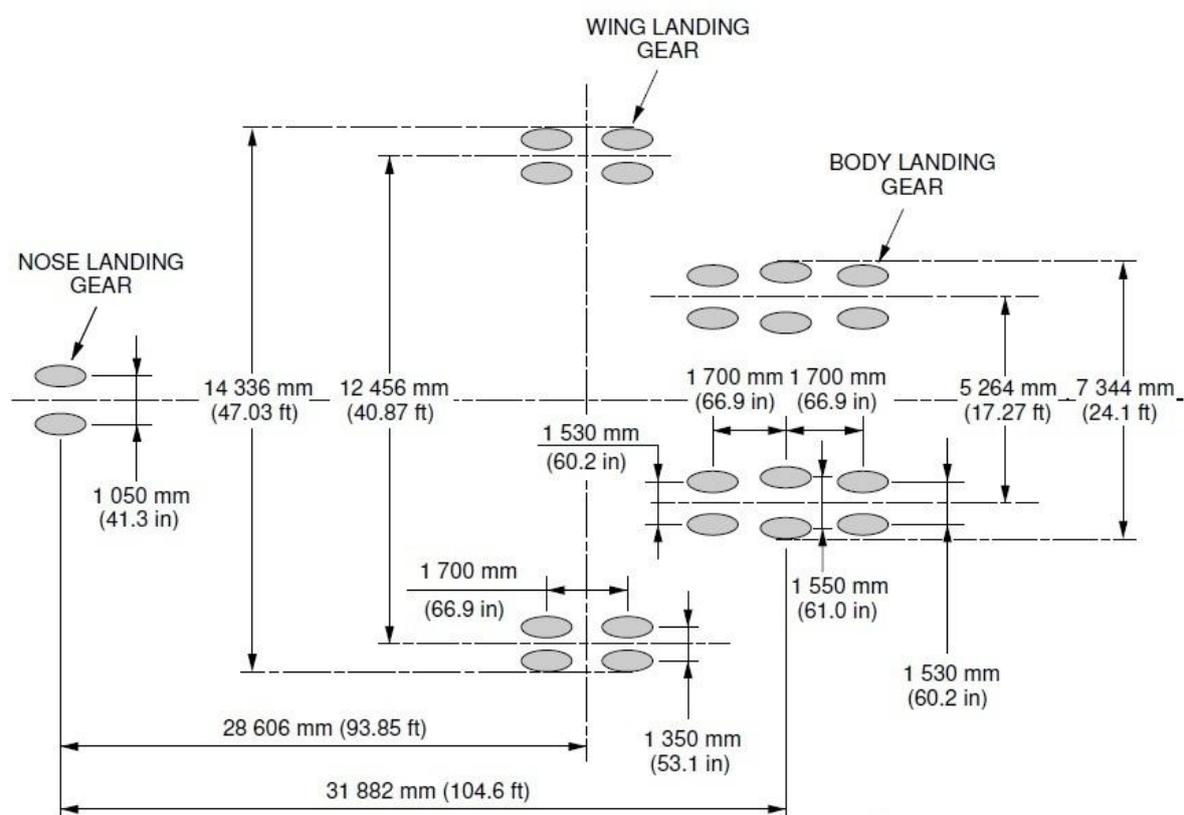


Abbildung 12: Radkonfiguration eines Airbus A380-800 [Airbus, 2012]

Die Verteilung der Flugzeuggesamtlast auf das Bug- und das Hauptfahrwerk ist vom Schwerpunkt und vom Ladefaktor abhängig und somit nicht konstant für verschiedene Massen. Der Hersteller gibt dazu Diagramme an, mit deren Hilfe dieses Verhältnis für

verschiedene Gesamtmassen ermittelt werden kann [Airbus, 2012]. Da die Diagramme nur bis knapp über die Höchstmasse Ergebnisse liefern, muss darüber hinaus entsprechend dem Vorschlag der ICAO [ICAO, 1983], in guter Übereinstimmung mit den Herstellerangaben, die Belastung des Hauptfahrwerks mit 95 % der Gesamtmasse angenommen werden.

Die nötige Masse des BLFZ, um den Anforderungen des Flughafen Wiens zu genügen, wird iterativ mittels Berechnung der ACN-Werte ermittelt. Zur Anwendung kommt dabei das Programm COMFAA 3.0, das von der FAA eben für diesen Zweck entwickelt wurde (siehe Abschnitt 3.2). Es werden, ausgehend von einer beliebig gewählten Masse, die ACN-Werte berechnet und die Masse dann so lange schrittweise erhöht, bis eine ACN von 100 sowohl für starre als auch für flexible Aufbauten erreicht ist. Dieser Vorgang muss sowohl für das Tragflächen- als auch für das Rumpffahrwerk getrennt durchgeführt werden, die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Als Resultat der Berechnungen ergibt sich für den Flughafen Wien ein fiktives Bemessungsflugzeug mit der Fahrwerksanordnung eines Airbus A380 und einem Gesamtgewicht von 850 Tonnen.

Tabelle 3: ACN-Werte für das Bemessungsflugzeug [geändert nach Blab et al., 2011]

Flexible Aufbauten							
Fahrwerksteil	Gesamtmasse [t]	% der Gesamtmasse am HFW	Reifeninnendruck [kPa]	Unterbautragfähigkeit			
				A	B	C	D
Tragfläche	850	37,9	1674	100	111	137	171
Rumpf	850	57,1	1674	102	114	145	188

Starre Aufbauten							
Fahrwerksteil	Gesamtmasse [t]	% der Gesamtmasse am HFW	Reifeninnendruck [kPa]	Unterbautragfähigkeit			
				A	B	C	D
Tragfläche	850	37,9	1674	100	118	138	157
Rumpf	850	57,1	1674	106	138	175	206

Auch wenn die hohe Masse von 850 Tonnen etwas übertrieben anmaßt (Maximalmasse des A380: 560 Tonnen), kann dieser Schritt durchaus befürwortet werden. Ein Grund ist die oben genannte Tendenz der Flugzeugindustrie, immer größer und somit schwerer werdende Flugzeuge zu entwickeln. Auch andersorts wird in ähnlicher Weise vorgegangen: So wird beispielsweise von Planern des Flughafen Zürichs aus eigener Erfahrung bestätigt, dass ein

Bemessungsflugzeug kaum als zu schwer angenommen werden kann und die Vorgehensweise am Flughafen Wien somit anerkannt [Blab et al., 2011]. Zudem wird durch die Wahl eines Bemessungsflugzeugs mit der nötigen ACN sichergestellt, dass sämtliche Flugzeuge mit einer ACN geringer jener des Bemessungsflugzeugs die betrachtete Bewegungsfläche ohne Einschränkungen nutzen können. Beim vorliegenden BLFZ betrifft dies sämtliche aktuellen Verkehrsflugzeuge. Vorsicht ist dennoch geboten, sollte ein LFZ mit sehr hoher ACN, welches bei der Bemessung nicht berücksichtigt wurde, unplanmäßig oft frequentieren. Auch wenn ein Betrieb laut ICAO zulässig ist, verringert sich dadurch die Lebensdauer des Oberbaus unter Umständen signifikant (siehe Kapitel 3).

4.3 Untergrundtragfähigkeit

Aufgrund der geographischen Lage, haben in Österreich die Jahreszeiten sehr starke Auswirkungen auf den Untergrund. Dessen Tragfähigkeit wird dabei ganz wesentlich von Temperaturschwankungen sowie den sich saisonal ändernden hydrologischen Verhältnissen beeinflusst. Wie in Abbildung 13 dargestellt, ist in den Wintermonaten in jedem Fall die höchste Tragfähigkeit gegeben, da der Boden teilweise gefroren ist. Während der Frühjahrstauperiode sinkt die Tragfähigkeit hingegen drastisch ab und erreicht etwa Anfang April ihren Jahrestiefstwert. Danach erfolgt ein kontinuierlicher Anstieg, bis im späten Herbst wieder der Höchstwert erreicht ist. Die Stärke der Ausprägung dieser Eigenschaften hängt darüber hinaus davon ab, ob im Untergrund frostempfindliches Material vorliegt oder nicht. Grundsätzlich ist der Einfluss der Jahreszeiten durch materialtechnologische Vorkehrungen zu minimieren.

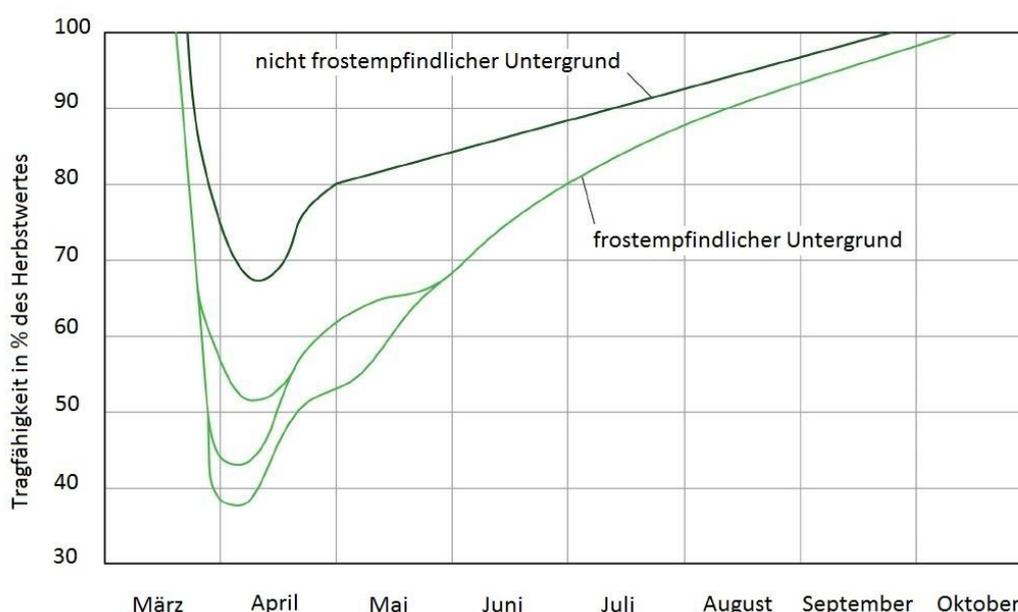


Abbildung 13: Änderungen der Untergrundtragfähigkeit mit der Jahreszeit [Fredrickson, 1963]

Da diese Schwankungen und vor allem auch deren relative Dauer große Auswirkungen auf den Tragmechanismus und somit die Lebensdauer eines Oberbaus haben, werden sie in die Österreichische Bemessungsmethode miteinbezogen. Dies geschieht durch Berücksichtigen vier verschiedener Untergrundtragfähigkeitsperioden, die in der Spalte „Jahresperioden“ in Tabelle 4 definiert sind. Die Beurteilung der Tragfähigkeit erfolgt dabei in Prozent des Herbstwerts. Der Winterperiode wird mit 200 % die doppelte Tragfähigkeit nachgesagt, wie der Herbstperiode, der Frühjahrstauperiode hingegen nur 50 %. Der stetige Anstieg der Tragfähigkeit zwischen Frühjahr und Herbst wird in der Übergangsperiode mit 70 % berücksichtigt. Die rechte Spalte in Tabelle 4 zeigt die Werte des dynamischen E-Moduls, die für die Österreichische Methode in der jeweiligen Jahresperiode angesetzt werden. Da die Tragfähigkeit des Untergrunds zudem einen direkten Einfluss auf das Verhalten der darüber liegenden ungebundenen Schichte ausübt, schwankt auch deren E-Modul entsprechend der Jahresperiode. Der genaue Zusammenhang sowie die angesetzten Materialparameter dieser Frostschutzschichte sind in Abschnitt 5.2.1, im Rahmen des Beispiels des Flughafens Wiens, beschrieben.

Tabelle 4: Untergrundtragfähigkeit in Abhängigkeit von den Jahresperioden [Litzka, 1987]

Jahresperiode	Tragfähigkeit in % des Herbstwerts	angesetzter Modul $E_{dyn,UG}$ [MN/m ²]
Winterperiode 16.12. - 15.3.	200	280
Frühjahrstauperiode 16.3. - 15.5.	50	70
Übergangsperiode 16.5. - 15.6.	70	100
Sommer-/Herbstperiode 16.6. - 15.12.	100	140

Die Variation der Untergrundtragfähigkeit hat starke Auswirkungen auf die Lebensdauer eines Oberbaus und somit die zulässige Anzahl an Lastwechseln durch ein LFZ. Deshalb sind die Jahresperioden sowohl bei der eigentlichen Bemessung als auch bei der Ermittlung der Aggressivitätszahlen zu berücksichtigen. Es werden dabei (zumindest) vier getrennte Berechnungsabläufe durchgeführt und die erhaltenen Schädigungen, gewichtet nach der relativen Dauer der Perioden, zu einer Gesamtschädigung summiert. Die genaue Vorgehensweise unterscheidet sich darin, ob ein flexibler oder ein starrer Oberbau vorliegt und ist in Kapitel 5 und 6 beschrieben.

4.4 Halbstarre Bauweise

4.4.1 Schichtenaufbau

Halbstarre Oberbauten stellen ein Hybrid zwischen der flexiblen und der starren Bauweise dar. Die oberste Lage bildet eine Asphaltdeckschichte mit einer Dicke von etwa 4 cm. Sie erfährt als äußerste Schichte die direkte Beanspruchung durch die Fahrwerke der LFZ und muss entsprechend widerstandsfähig sein. Außerdem schützt sie die darunter liegenden Tragschichten des Aufbaus vor Witterungseinflüssen und muss zudem beständig gegen Angriffe durch Taumittel und Treibstoffe sein. Im Sinne der Betriebssicherheit muss sie einen ausreichend hohen Reibungskoeffizienten aufweisen, um die Bremsstrecke von Flugzeugen kurz zu halten, ohne dabei übermäßig hohen Reifenabrieb zu verursachen. Die Deckschichte wird im Zuge von Sanierungsmaßnahmen planmäßig im Abstand mehrerer Jahre abgefräst und erneuert, außerdem wird der Reifenabrieb regelmäßig maschinell entfernt. Die zweite Lage bildet die bituminöse Tragschichte, die zusammen mit der Deckschichte in etwa 30 bis 40 cm dick ausgeführt wird. Sie stellt die flexible Komponente des Aufbaus dar und ist für die erste Verteilung der äußeren Belastung zuständig. Darunter liegt eine zementstabilisierte Tragschichte (ST-Z), welche die starre Komponente bildet und somit für die Bezeichnung „halbstarr“ verantwortlich ist. Sie weist eine Dicke von etwa 30 cm auf und ist neben der weiteren Verteilung der Last für die Erhöhung der Steifigkeit und somit der Widerstandsfähigkeit des Oberbaus gegen Verformung zuständig. Die unterste Lage des Aufbaus bildet eine Frostschutzschichte, die mit einer Dicke von etwa 35 cm die Lasten derart weiter verteilt, dass sie vom Untergrund schädigungsfrei aufgenommen werden können. Sie stellt eine ungebundene Tragschichte dar und dient darüber hinaus, wie der Name verrät, dem Frostschutz. Durch die kapillarbrechende Wirkung des grobkörnigen Schüttguts wird ein Aufsteigen von Feuchtigkeit in die Tragschichten unterbunden und dadurch Frosthebungen und daraus resultierenden Schäden vorgebeugt. Der Untergrund, der auf Höhe des Unterbauplanums anliegt, muss gewissen Mindestanforderungen entsprechen. Werden diese unterschritten, muss neben einer grundsätzlichen Verdichtung auch eine Bodenverbesserung oder ein Bodenaustausch vorgenommen werden. Eine mögliche Schichtenabfolge für einen halbstarren Oberbau einer Flugbetriebsfläche ist in Abbildung 14 dargestellt.

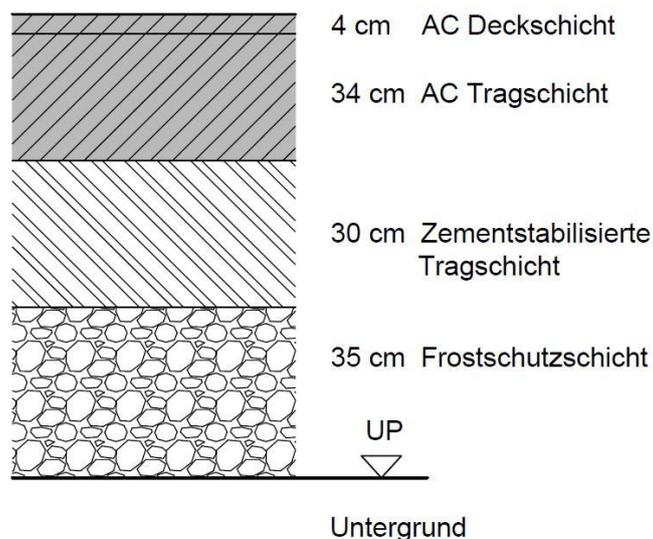


Abbildung 14: Schichtenabfolge eines halbstarren Oberbaus

Eine Unterscheidung zwischen starren und flexiblen Aufbauten ist nicht immer eindeutig möglich. Starre aufbauten zeichnen sich durch eine plattenförmige Hauptkomponente aus, was einer Lastabtragung nach anderen Mechanismen entspricht als bei flexiblen Aufbauten. Da halbstarre Aufbauten eine Kombination beider Varianten darstellen, ist entsprechend dem Einfluss der starren Komponente auf das Tragverhalten zu entscheiden, ob vorwiegend starres oder flexibles Verhalten vorliegt. Da diese Definition im Zusammenhang mit der Veröffentlichung der Tragfähigkeit als PCN-Wert von Relevanz ist, gibt die ICAO im *Aerodrome Design Manual, Part 3* [ICAO, 1983] an, dass in solchen Fällen der Oberbau, auf der sicheren Seite liegend, als flexibel deklariert werden soll. Der für den Flughafen Wien ermittelte halbstarre Aufbau (wie auch in Abbildung 14 dargestellt) wird daher im Zuge der Tragfähigkeitsbewertung als flexibel angesehen.

4.4.2 Spannungsermittlung

Die Berechnung der Primärwirkungen zufolge äußerer Belastung erfolgt bei flexiblen und halbstarren Oberbaustrukturen mit Hilfe von Computerprogrammen auf Basis der linear-elastischen Mehrschichtentheorie. Modelliert wird dabei ein System elastischer Schichten auf einem elastischen Halbraum. Die Schichten sind von konstanter Dicke und weisen eine unendliche horizontale Ausdehnung auf. Die Materialien der einzelnen Lagen werden als homogen und isotrop betrachtet und verfügen über linear-elastisches Materialverhalten. Je nach verwendetem Programm, können beliebig viele Schichten angeordnet und Ergebnisse in Form von Spannungen, Verzerrungen und Verschiebungen an frei wählbaren Punkten innerhalb des Aufbaus angezeigt werden. Als Ausgabepunkte sind vor allem Punkte an den Schichtgrenzen im Einflussbereich von äußeren Lasten von Interesse.

Im Zuge der Berechnungen für den Flughafen Wien und auch im Rahmen dieser Arbeit, wird von der Software LEAP (Layered Elastic Analysis Program) Gebrauch gemacht. Dieses Programm bedient sich ausschließlich der elastischen Mehrschichtentheorie und erlaubt eine frei wählbare Anzahl an Schichten. Als Eingangswerte müssen die Dicke und als Materialparameter der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl jeder Schichte definiert werden. Auch die Art des Verbundes zwischen den einzelnen Schichten kann benutzerdefiniert angenommen werden und wird in Form der Steifigkeit einer horizontalen Ersatzfeder angegeben. Bei den hier beschriebenen Berechnungsvorgängen wirken lediglich vertikale Beanspruchungen, daher wird ohne Schichtverbund modelliert, was einer Federsteifigkeit von 0 entspricht. Voller Schichtverbund würde im Gegensatz dazu einer unendlichen Steifigkeit entsprechen. Um eine ungehinderte (theoretische) Verschiebung der Schichten zueinander zu unterbinden, wird vom Programm, im Zuge der Reduktion von Freiheitsgraden, immer ein Wert größer 0 angesetzt. Der Ansatz der äußeren Lasten auf die Schichtstruktur erfolgt in LEAP ausschließlich über kreisförmige Toplasten. Aus deren frei wählbaren Radien sowie den definierten Einzellasten ergeben sich schließlich die Belastungsdruckspannungen. Über die Zuweisung der ebenen Koordinaten x und y kann die Position der einzelnen Toplasten entsprechend der Radkonfigurationen eines LFZ angeordnet werden. Dadurch wird die statische Belastung der Struktur durch ein Flugzeug sehr realistisch nachgebildet. Weiters müssen die Ausgabepunkte definiert werden, deren Lage durch die Raumkoordinaten x , y und z bestimmt wird. Hier empfiehlt es sich, ein ebenes, quadratisches Raster zu wählen, das in der maßgebenden Ebene (konstante z -Koordinate) einen Ergebnisverlauf ermöglicht. Als Ergebnisse werden für jeden Punkt folgende Ausgabewerte berechnet:

- Verschiebungen in x -, y - und z -Richtung
- Spannungen in x -, y - und z -Richtung
- Hauptspannungen
- Verzerrungen in x -, y - und z -Richtung
- Hauptverzerrungen

Wenngleich das Programm seine Aufgaben grundsätzlich erfüllt und bei nur kurzer Rechenzeit Ergebnisse liefert, so ist es dennoch mit einigen Einschränkungen verbunden. Insgesamt wurde bei LEAP kein großes Augenmerk auf die Benutzeroberfläche gelegt, sodass die Bedienung etwas aufwendig ist. Im Wesentlichen muss für jede Berechnung ein Eingangsfile erzeugt werden, was zwar mit der gängigen Benutzermaske des Programms möglich, jedoch eher umständlich ist. Alternativ dazu, können die Eingangsdaten als Textfile in einem Editor formuliert werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass das fertige

File kopiert werden kann, um dann einzelne Parameter manuell zu ändern, falls beispielsweise verschiedene Schichtdicken untersucht werden sollen. Auf diese Weise kann der Aufwand minimiert werden. Im Anhang ist beispielhaft ein Teil (Periode 1) eines Inputfiles für das BLFZ dargestellt. Zur Ergebnisberechnung müssen die Eingangsfiles einzeln, im sogenannten Batch-mode, ins Programm eingelesen werden, von dem sie abschließend als Ausgabefile ausgeworfen werden. Diese Dateien stellen eine Auflistung sämtlicher (oben genannter) Ergebniswerte in Textform dar. Gerade bei einer sehr komplexen Belastungsanordnung, wie beispielsweise der des Bemessungsflugzeugs, die in einer großen Anzahl an Ausgabepunkten resultiert, ergibt sich eine unwahrscheinlich große Menge an Zahlenwerten, die selbstständig ausgewertet werden müssen. LEAP gibt weder eine Hilfestellung, die Maximalwerte zu eruieren noch gibt es die Möglichkeit einer grafischen Ergebnisausgabe, wie dies bei moderner Software zur Spannungsermittlung inzwischen üblich ist. Stattdessen müssen die einzelnen Textfiles mühsam anderweitig, zum Beispiel mit Hilfe von MS EXCEL, ausgewertet werden. Bei umfangreichen Untersuchungen im Rahmen eines Dimensionierungsverfahrens entsteht dadurch ein beträchtlicher, zusätzlicher Aufwand.

Des Weiteren muss auf die korrekte Verwendung von Einheiten hingewiesen werden, da das Programm LEAP keine Einheiten berücksichtigt. Die Eingabefiles werden als einheitenlose Zahlenwerte formuliert, Analoges gilt für die Ausgabefiles. Es muss daher eine Konvention definiert und unbedingt ausnahmslos eingehalten werden, um konforme und somit brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Es bietet sich an, die Einheiten *Newton* und *Meter* einzuhalten.

4.4.3 Festigkeitshypothese

Die Festigkeitshypothese beschreibt den Versagensmechanismus eines Baustoffs und ermöglicht eine Gegenüberstellung der auftretenden Beanspruchung mit einer bestimmten Grenzbeanspruchung. Konkret wird der reale, dreiaxiale Spannungszustand mittels eines Vergleichsspannungskonzepts in eine äquivalente einaxiale Vergleichsspannung überführt [Wistuba, 2003]. Zur Anwendung kommt die modifizierte Schubspannungshypothese nach LEON, die einerseits einen Trennbruch durch Überschreiten der Zugfestigkeit als auch einen Gleitbruch durch Überschreiten der Schubfestigkeit berücksichtigt. Welches Versagen maßgebend ist, beschreibt der Formparameter der LEON'schen Parabel c . Ist dieser größer gleich 3, liegt wie im vorliegenden Beispiel ein Trennbruch senkrecht zur Beanspruchungsrichtung vor. Der Formparameter wird entsprechend Gleichung (6) ermittelt, die Festigkeitswerte für die zementstabilisierte Tragschichte sind der RVS entnommen.

$$c = \frac{\sigma_D}{\sigma_Z} = \frac{3,125}{0,641} = 4,88 > 3 \quad (6)$$

c	...	Formparameter der LEON'schen Parabel [-]
σ_D	...	einaxiale Druckfestigkeit [N/mm ²]
σ_Z	...	einaxiale Zugfestigkeit [N/mm ²]

Die einaxiale Vergleichsspannung berechnet sich schließlich nach Gleichung (7) unter Berücksichtigung des dimensionslosen Parameters p_c . Gleichung (7) gilt nur für $c \geq 3$.

$$\sigma_V = -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2 \cdot (p_c - 2)} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)^2}{4 \cdot (p_c - 2)^2} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{4 \cdot p_c \cdot (p_c - 2)}} \quad (7)$$

mit

$$p_c = 0,5 \cdot [(c + 2) - 2 \cdot \sqrt{c + 1}]$$

σ_V	...	einachsige Vergleichsspannung [N/mm ²]
σ_1, σ_3	...	Hauptnormalspannungen [N/mm ²]
p_c	...	Faktor [-]
c	...	Formparameter der LEON'schen Parabel [-]

4.4.4 Schadensmodell

Der Oberbau einer Flugbetriebsfläche erfährt durch die Verkehrsbelastung eine wiederholte, dynamische Beanspruchung, die zu einer sukzessiven Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit des Asphalts bzw. der zementstabilisierten Tragschichte führt. Die als Folge entstehenden Schäden, meist feine Risse an der Unterseite der gebundenen Schichte, bedeuten das Ende der strukturellen Lebensdauer. Man spricht dabei von Ermüdung. Um eine Aussage bezüglich dieser Lebensdauer eines Oberbaus im Zusammenhang mit einer wiederkehrenden Belastung tätigen zu können, bedarf es einer ausgewählten Ermüdungshypothese, welche das Schadenskriterium im Sinne des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit darstellt.

Bei halbstarren Aufbauten hat sich gezeigt, dass der Ort der maßgebenden Beanspruchung an der Unterseite der zementstabilisierten Tragschichte zu finden ist. Es ist davon auszugehen, dass hier das Ermüdungsversagen in Form von Zugversagen auftritt. Aus diesem Grund werden Untersuchungen von LEYKAUF bezüglich der Ermüdung zementstabilisierter Tragschichten herangezogen. Auf deren Basis wurde von MILKOVICS eine Ersatzfunktion abgeleitet, die in Gleichung (8) dargestellt ist und eine Anwendung unabhängig vom Wert der materialspezifischen Dauerbiegezugfestigkeit und von

Lastklassen erlaubt [Litzka et al., 1996]. Die Anzahl der zulässigen Lastwechsel ergibt sich schließlich lediglich aus dem Maximalwert der Vergleichsspannung, der im Rahmen der Spannungsberechnung für einen definierten Aufbau und eine bestimmte Belastung an der Unterseite der ST-Z ermittelt wurde. Die Teilschädigungsraten $C_{i,j}$ ergeben sich als Kehrwert von N_{zul} .

$$N_{zul} = \left(0,57 \cdot \frac{1}{\sigma_V}\right)^5 \cdot 10^6 \quad (8)$$

N_{zul}	...	zulässige Anzahl an Lastwechseln
σ_V	...	einaxiale Vergleichsspannung [N/mm ²]

4.4.5 Materialeigenschaften

Eine bedeutende Besonderheit von Asphalt als bituminöser Werkstoff ist das temperaturabhängige Schwanken seiner Materialparameter. Vor allem der E-Modul nimmt mit steigender Temperatur signifikant ab, was die Tragfähigkeit beeinflusst und weiters dazu führt, dass im Sommer, vor allem bei längeren Belastungsdauern, bleibende Deformationen entstehen können. Wegen der hohen statischen Belastung sowie eventuell anliegenden Vibrationen aus einem Triebwerksstandlauf, werden Abstellflächen am Vorfeld daher ausschließlich in starrer Bauweise ausgeführt.

Auch die Querdehnzahl unterliegt bis zu einem gewissen Maße den Schwankungen der Umgebungstemperatur. Da dieser Abweichungen jedoch nur sehr gering ausfallen, können sie im Rahmen der Oberbaubemessung außer Acht gelassen werden. Der Einfluss des Klimas wird somit durch die Variation der Materialparameter (E-Moduln) zweier verschiedener Komponenten des Oberbaus berücksichtigt: des Untergrunds und der bituminösen Schichten. Ähnlich wie beim Untergrund (siehe Abschnitt 4.3) müssen die Einflüsse der Temperatur auf die Tragwirkung des Asphalts bei der Bemessung und bei der Ermittlung der Aggressivitätszahlen berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wird das Kalenderjahr, in Abstimmung mit der Jahres- und Tagesganglinie der Lufttemperatur, in 6 Klimaperioden eingeteilt. Weiters wird in jeder Klimaperiode zwischen Tag- und Nachtstunden unterschieden, woraus sich insgesamt 12 Temperaturperioden ergeben, die bei den Berechnungsschritten zu berücksichtigen sind. Die Nummerierung der Perioden sowie deren Zeiträume sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Einteilung des Jahres in 6 Klimaperioden bzw. in 12 Temperaturperioden in Abhängigkeit von der Jahres- und Tageszeit [Mais, 1973]

Klimaperiode	1		2		3		4		5		6	
Zeitraum	16.12. - 15.03.		16.03. - 15.05.		16.05. - 15.06.		16.06. - 15.09.		16.09. - 15.10.		16.10. - 15.12.	
Tag/Nacht	T	N	T	N	T	N	T	N	T	N	T	N
Temperatur- periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Entsprechend der real auftretenden Temperaturverteilung über die Tiefe des Aufbaus, welche in umfangreichen Feldversuchen ermittelt werden konnte, werden je Temperaturperiode, abhängig von der tatsächlichen Dicke der Schichte, konstante E-Moduln als Mittelwerte angesetzt. Die genaue Vorgehensweise sowie die ermittelten Werte am Beispiel des Flughafens Wiens werden in Abschnitt 5.2.1 behandelt.

Die Klima- bzw. Temperaturperioden müssen im Rahmen der Berechnungen in Kombination mit den Untergrundtragfähigkeitsperioden berücksichtigt werden. Anhand der definierten Zeiträume lässt sich feststellen, dass die ersten drei Jahresperioden des Untergrunds, die Winter-, die Frühjahrstau- und die Übergangsperiode, mit den ersten drei Klimaperioden (bzw. den ersten 6 Temperaturperioden) übereinstimmen. Die vierte Untergrundperiode, die Sommer-/Herbstperiode, entspricht den übrigen drei Klima-, bzw. 6 Temperaturperioden (siehe Tabelle 13 auf Seite 70). Es muss somit die Spannungsberechnung zwölfmal getrennt durchgeführt werden, mit einem jeweils sich ändernden E-Modul des Asphalts und einem im Abstand mehrerer Perioden sich ändernden E-Modul des Untergrunds. Dies gilt sowohl für die Bemessung als auch für die Ermittlungen der einzelnen Aggressivitätszahlen.

4.4.6 Bemessung

Die für die Bemessung auf der Widerstandsseite und auch für die Ermittlung der Aggressivitätszahlen erforderliche Anzahl der zulässigen Lastwechsel durch das Bemessungsflugzeug $N_{BLFZ,zul}$ ergibt sich, wie in Gleichung (4) gezeigt, als reziproker Wert der Gesamtschädigung (siehe Abschnitt 4.1.2). Für flexible bzw. halbstarre Aufbauten ergibt sich diese Gesamtschädigungsrate durch Summation der einzelnen Teilschädigungsraten, wie in Gleichung (9) dargestellt [Blab et al., 2011]. Der Index j beziffert dabei die zwölf Temperaturperioden, für die jeweils eine Schädigungsrate berechnet werden muss. Der Wert p_j beschreibt die relative Dauer dieser Perioden als Faktor und wird in Abschnitt 5.2.1, in Tabelle 13, definiert.

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{12} (p_j \cdot C_{i,j}) \quad (9)$$

C_{ges}	...	Gesamtschädigungsrate durch das Bemessungsluftfahrzeug
p_j	...	Anteil der Dauer der Bemessungsperiode j während eines Jahres
$C_{i,j}$	...	Schädigungsrate pro Überrollung i in der maßgebenden Achse für die Bemessungsperiode j

Da das Hauptfahrwerk des Bemessungsflugzeugs in seiner maßgebenden Achse eine Doppelradtridem-Bereifung aufweist (siehe Abbildung 12 auf Seite 41), müssen bei der Gesamtschädigung jeweils drei Überrollungen berücksichtigt werden. Diese werden durch den Index i beschrieben. Die Gleichung (9) kann im Zusammenhang mit der Ermittlung der Aggressivitätszahlen für sämtliche Flugzeugmuster adaptiert werden. Dabei ändert sich lediglich der Wert des Index i , welcher zwischen 1 und 3 variiert, je nach Radkonfiguration des Hauptfahrwerks.

4.5 Starre Bauweise

4.5.1 Schichtenaufbau

Die maßgebende Komponente der Tragstruktur eines starren Oberbaus bildet die plattenförmige Betondecke, die eine Dicke von etwa 30 bis 40 cm aufweist. Sie erfährt als oberste Schichte die direkte Beanspruchung aus den Radlasten und hat zugleich den wesentlichsten Einfluss auf die Verteilung dieser Lasten. Die Tragwirkung lässt sich dabei vereinfacht als starres Element auf einer elastischen Flächenbettung darstellen. Da die Betonplatte der direkten Verkehrsbeanspruchung ausgesetzt ist, muss ihre Oberfläche gewisse Voraussetzungen erfüllen: Es muss ein genügend hoher Reibbeiwert vorliegen, um einen sicheren Betrieb der Flugzeuge zu gewährleisten, ohne jedoch übermäßigen Verschleiß zu verursachen. Außerdem muss die Platte die darunterliegenden Tragschichten durch ausreichende Dichtigkeit vor Feuchtigkeit schützen und darüber hinaus beständig gegen Taumittel und Treibstoffe sein.

Für die Tragfähigkeit wäre es grundsätzlich von Vorteil, die Betonplatte, ähnlich wie bei der Asphaltbauweise, über die gesamte Fläche durchgehend auszuführen. Aufgrund der Zwangsbeanspruchungen infolge des thermischen sowie des Schwindverhaltens und mangels Relaxationseigenschaften des Betons, kann ein starrer Aufbau jedoch nicht als

durchgehende Platte ausgebildet werden, sondern muss durch die Anordnung von Fugen in möglichst quadratische Elemente gegliedert werden. Abhängig von der Plattendicke und im Hinblick auf eine beschränkte Klaffung der Fugen, wird für die Abmessungen der Platten ein Raster mit Abständen von 5,5 bis 6 m empfohlen [Blab et al., 2011]. Um eine teilweise Querkraftübertragung an den Fugen zu ermöglichen beziehungsweise um eine Relativverschiebung der Plattenelemente zu verhindern, werden Dübel in der Betondecke entlang der Fugen angeordnet. Die unterschiedlichen Arten von Fugen und deren Eigenschaften werden in Abschnitt 7.1 erläutert. Um die Entstehung von Rissen durch Überschreiten der Zugspannungen zu vermeiden, gibt es neben der Möglichkeit der Fugenbildung auch noch die Varianten einer schlaff bewehrten oder einer vorgespannten Betondecke. Diese beiden Möglichkeiten stellen jedoch (zumindest in Österreich) Sonderbauweisen dar und sind aufgrund mangelnder Erfahrung nicht zu empfehlen.

Unter der Betonplatte ist grundsätzlich eine Tragschichte anzuordnen, die bei Fahrbahnen mit hochrangiger Belastung, wie dies auf Flugbetriebsflächen der Fall ist, als gebundene Tragschichte auszubilden ist. Am vorliegenden Beispiel wird sie als zementstabilisierte Tragschichte ausgeführt und weist eine Dicke von 25 cm auf. Zwischen der Tragschichte und dem Unterbauplanum (UP) befindet sich die 35 cm dicke Frostschutzschichte, deren Erfordernis und Eigenschaften bereits im Zusammenhang mit dem flexiblen Oberbau (siehe Abschnitt 4.4.1) beschrieben wurden.

Im hochrangigen Straßennetz, bei dem in Österreich die Betonbauweise aktuell einen Anteil von etwa 37,5 % ausmacht, wird seit einiger Zeit eine dünne, etwa 5 cm dicke, Asphaltenschichte zwischen der Betonplatte und der Tragschichte angeordnet. Die Asphaltunterlage gilt dabei als besonders erosionsbeständig und dient weiters dazu, die darunterliegenden Schichten sowie den Untergrund optimal vor Wasser und Taumittel zu schützen. Durch leichtes Auffräsen vor dem Aufbringen des Betons entsteht ein hoher Verbund zwischen Asphalt und Betondecke, was unter anderem den Vorteil bringt, dass die Scheinfugen (siehe Abschnitt 7.1.1) gleichmäßig reißen [Blab et al., 2012]. Insgesamt wurden bis dato sehr gute Erfahrungen mit dieser Bauweise in Bezug auf das Langzeitverhalten der Betondecke gemacht, sodass die Verwendung einer bituminösen Zwischenschichte zukünftig auch auf Flugbetriebsflächen in Betracht gezogen werden kann. Abbildung 15 zeigt dazu schematisch die Schichtenabfolge eines starren Oberbaus, inklusive einer 5 cm dicken Zwischenschichte aus Asphalt.

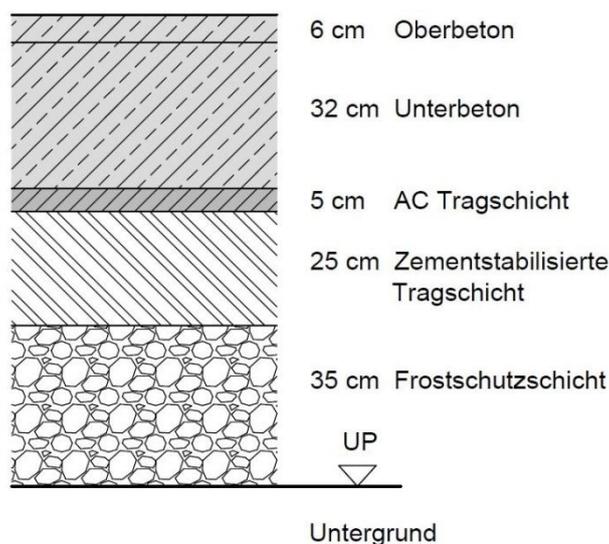


Abbildung 15: Schichtenabfolge eines starren Oberbaus

4.5.2 Spannungsermittlung

Um eine lange Nutzungsdauer des starren Oberbaus zu gewährleisten, ist das Hauptaugenmerk auf die Entstehung von Rissen zu legen. Bei der Bemessung gilt das größte Interesse somit der Ermittlung von Zug- und Biegezugspannungen an der Plattenunterseite, da diese im direkten Zusammenhang mit der Rissbildung stehen und eine diesbezügliche Analyse im Rahmen einer Versagenshypothese ermöglichen. Die elastische Mehrschichtentheorie, die bei flexiblen Oberbauten Anwendung findet, ist für starre Aufbauten nicht sinnvoll anwendbar, da die Rahmenbedingung einer horizontal unendlich ausgedehnten Schichte bei Betonplatten nicht annähernd zutrifft. Der Unterteilung der Platte durch Fugen in quadratische Elemente muss bei der Spannungsermittlung und Bemessung unbedingt Rechnung getragen werden, da sich das Tragverhalten wesentlich von dem einer durchgehenden Platte unterscheidet. Die Anwendung der Mehrschichtentheorie mit den einhergehenden Idealisierungen würde Ergebnisse auf der unsicheren Seite liefern.

Biegezugspannungen infolge Verkehrsbeanspruchung

Bei starren Oberbauten wird nicht von analytischen, sondern von einem numerischen Verfahren Gebrauch gemacht: der Finite-Elemente-Methode (FEM). Der große Vorteil dieses computergestützten Verfahrens im Gegensatz zu früher verwendeten Methoden liegt darin, dass der gesamte Oberbau sehr realitätsgetreu abgebildet werden kann, während früher eine vereinfachende Modellvorstellung vonnöten war (siehe Abschnitt 2.3). Dabei kann jede Schichte, gekennzeichnet durch die maßgebenden Materialparameter, bei der Berechnung berücksichtigt werden. Außerdem können problemlos beliebige Geometrien der Platten sowie die Belastung durch komplexe Radkonfigurationen untersucht werden.

Die Unterteilung der Betondecke durch Fugen in einzelne Plattenelemente beeinflusst die Tragwirkung ganz wesentlich und muss bei der Spannungsberechnung berücksichtigt werden. Die Belastung durch eine Einzellast bewirkt beispielsweise stark voneinander abweichende Spannungsverläufe, je nachdem ob sie in Plattenmitte, am Plattenrand oder in der Plattenecke angreift. Bei der Belastung durch Fahrwerke großer Flugzeuge, mit einer komplexen Anordnung einzelner Radlasten, sind die Auswirkungen der Positionierung schwieriger abzuschätzen. Die maßgebende Position des Fahrwerks relativ zum Fugenraster muss daher versuchsweise durch Auswertung der Berechnungsergebnisse verschiedener Belastungsvarianten ermittelt werden. Da sich der Bereich der Belastung bei derartigen Fahrwerkstypen in der Regel über mehrere Felder verteilt, aber auch generell die Plattenelemente aufgrund der Verdübelung interagieren, muss dies im Rahmen der Spannungsberechnung bei der Modellierung berücksichtigt werden. Um den Rechenaufwand bei der Bemessung in Grenzen zu halten, wird die Dübelbemessung gesondert vorgenommen, während bei den eigentlichen Berechnungen am Oberbau eine äquivalente Randbedingung berücksichtigt wird. Dazu wird der Dübel als Wegfeder modelliert und diesem entsprechend seiner Abmessungen eine Ersatzsteifigkeit zugeordnet. Am Oberbau können dann anstelle der Dübel Wegfedern angesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit liegt darin, eine reduzierte Querkraftübertragung entlang der Fugen zu berücksichtigen. Im Rahmen der Bemessung für den Flughafen Wien wurde beispielsweise eine Querkraftübertragung von 60 % zwischen benachbarten Platten angenommen.

Die Ermittlung der Verkehrslastspannungen erfolgt für diese Arbeit mit Hilfe der FEM-Software ISLAB 2000, die eigens für die Analyse starrer Fahrbahnoberbauten entwickelt wurde. Dieses Programm ermöglicht die Spannungsberechnung bei einer beliebigen Anzahl an Schichten, wobei verschiedene Arten des Verbunds zwischen den Schichten unterschieden werden. Zwischen der Betondecke und der zementstabilisierten Tragschichte wird beispielsweise vollständiger Verbund angenommen. ISLAB 2000 erlaubt das Ansetzen einer unbegrenzten Anzahl an Fahrwerklasten, deren Koordinaten mit Hilfe der graphischen Benutzeroberfläche überprüft werden können. Als diesbezügliche Eingangswerte dienen die Einzellast und der jeweils zugehörige Reifeninnendruck, aus denen das Programm eine Rechtecklast mit äquivalenter Druckspannung berechnet. Entsprechend der realen Situation, kann der Oberbau durch die Anordnung von Fugen in Platten gegliedert werden. Das Programm ermöglicht darüber hinaus die Definition von Dübeln zur Lastübertragung an den Fugen, wobei alternativ ein Prozentsatz der Querkraftübertragung angegeben werden kann (siehe vorheriger Absatz). Die Ausgabe der errechneten Spannungen und Verzerrungen erfolgt an den Oberflächen einer jeden Schichte, wobei die Anzahl der Ausgabepunkte vom gewählten Feinheitsgrad des FE-Netzes abhängt. Die jeweiligen Maximalwerte der Ergebnisse werden am Ende eines Ausgabefiles aufgelistet und brauchen nicht durch

tabellarische Auswertung ermittelt werden. Die notwendigen Eingangsdaten für den strukturellen Aufbau sind in Kapitel 6, Abbildung 22, zusammengestellt. Auf die Definition und Einhaltung einer eindeutigen Einheitenkonvention ist, ähnlich wie bei LEAP, Acht zu geben.

Die Biegezugspannungen infolge der betrachteten Verkehrsbelastung müssen schließlich bei ungünstigster Fahrwerkspositionierung, an der maßgebenden Stelle, jeweils für vier Untergrundtragfähigkeitsperioden (siehe Abschnitt 4.3) ermittelt und zum Zwecke der Bemessung mit den Temperaturspannungen überlagert werden.

Temperaturspannungen

Im Gegensatz zu bituminösen Oberbauten verfügt der Baustoff Beton über einen konstanten, temperaturunabhängigen E-Modul. Die Materialparameter müssen somit nicht für zwölf verschiedene Temperaturperioden getrennt ermittelt werden; die Bemessung berücksichtigt lediglich die vier Untergrundperioden. Da Beton im Vergleich zu bituminösen Baustoffen keine Relaxation aufweist, müssen jedoch die aus Temperaturdifferenzen resultierenden Längenänderungen berücksichtigt werden. Durch das natürliche Schwanken der Temperatur im Tagesrhythmus entstehen nichtlineare Temperaturverteilungen über die Dicke der Betonplatte. Diese Differenzen der Temperatur an der Plattenober- und Unterseite können zwei verschiedene Reaktionen der Fahrbahn hervorrufen: Ist die Unterseite der Betonplatte wärmer als die Oberseite, was einer Abkühlung von oben entspricht, beispielsweise durch Verlust der Abbindewärme, entsteht eine konkave Krümmung der (quadratischen) Platte. Da die freie Verformung durch mehrere Einflüsse behindert wird, wie zum Beispiel dem Eigengewicht oder der Einspannung durch benachbarte Platten, werden über den Querschnitt Biegespannungen induziert; im Fall der Abkühlung von oben sind diese in der Regel nicht bemessungsrelevant. Ist hingegen die Oberseite der Betonplatte wärmer als die Unterseite, was einer Erwärmung von oben entspricht, vorrangig durch Sonneneinstrahlung, stellt sich eine konvexe Krümmung ein, also ein Abheben der Plattenmitte. Auch hier wird eine Verformung weitgehend verhindert, was ein Spannungsbild zur Folge hat, das bei der Bemessung zu berücksichtigen ist. Die Ermittlung dieser Wölbspannungen kann mit Hilfe der Ansätze nach EISENMANN [Eisenmann, 1979] erfolgen. Diese basieren auf linearisierten Annahmen, beispielsweise einer schneidenförmigen Auflagerung an den Plattenrändern, liefern jedoch für die üblichen Abmessungen auf Flugbetriebsflächen ausreichend realitätsnahe Ergebnisse.

Die grundlegende Annahme von Eisenmann umfasst einen positiven linearen Temperaturgradienten von $\Delta t = 0,09 \text{ K/mm}$ über die Plattendicke. Dies entspricht einem Maximalwert bei Sonneneinstrahlung und Windstille, der nur an wenigen Tagen im Jahr

auftritt. Die diesbezüglichen Messungen wurden im süddeutschen Raum durchgeführt, der angegebene Gradient kann daher für Österreich übernommen werden. Je nach Abmessungen der Platte stellt sich (bei freier Verformung) eine bestimmte Form der Wölbung ein. Zum Abgrenzen dieser Verformungszustände definiert EISENMANN eine kritische Länge l_{krit} , wie in Abbildung 16 (oben) dargestellt.

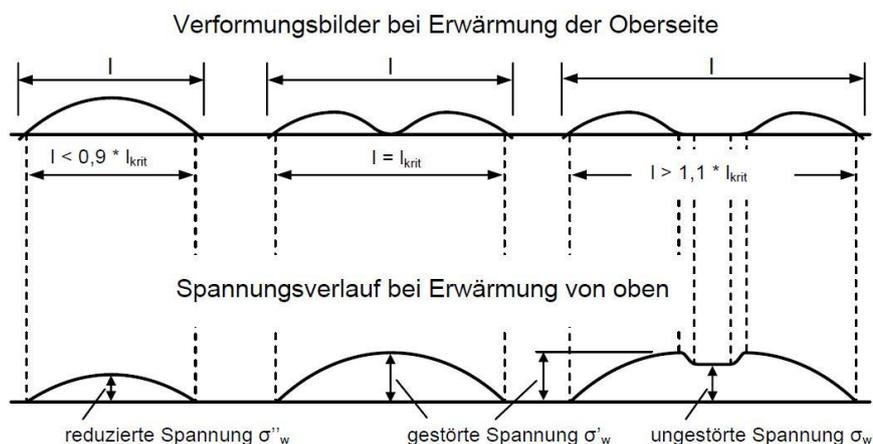


Abbildung 16: Verformungen und Spannungen infolge ungleichmäßiger Erwärmung von oben [Eisenmann, 1979]

Die kritische Länge entspricht dabei genau jener Abmessung der Platte, bei der die Plattenmitte aufgrund von Eigengewicht wieder auf der Unterlage zu liegen kommt. Da die Krümmung im direkten Zusammenhang mit der Spannungsverteilung steht, ergeben sich in Abhängigkeit der kritischen Länge verschiedene Spannungsverläufe, die in Abbildung 16 (unten) dargestellt sind. Daraus wurden von EISENMANN Formeln hergeleitet (siehe Tabelle 6), mit denen entsprechend der kritischen Länge die Wölbspannungen abgeschätzt werden können. Sie berücksichtigen eine ungleichmäßige Erwärmung von oben mit einem angenommenen linearen Gradienten von $\Delta t = 0,09 \text{ K/mm}$ für quadratische Platten. Als zugrunde liegende Materialparameter wurden ein E-Modul von 30.000 N/mm^2 , eine Querdehnzahl von $0,15$ sowie ein thermischer Ausdehnungskoeffizient von 10^{-5} K^{-1} definiert. Die Formeln liefern grundsätzlich Ergebnisse für die Unterseite in Plattenmitte, sie können jedoch auch näherungsweise für die Mitte des Plattenrandes herangezogen werden. Der sich hier einstellende einaxiale Spannungszustand erlaubt allerdings eine Reduktion der errechneten Spannungen um 15% .

Tabelle 6: Formeln zur Berechnung der Biegezugspannungen [N/mm²] an der Plattenunterseite in Plattenmitte bei einer Erwärmung von oben mit linearem Verlauf des Temperaturgradienten $\Delta t = 0,09$ K/mm [geändert nach Eisenmann, 1979]

Anwendungsbereich	$L / B \leq 1,2$ $L / B \geq 0,8$	
l_{krit} [mm]	$37 \cdot h$	
Plattenmitte	Ungestörte Spannung σ_w für $l > 1,1 \cdot l_{krit}$	$0,0163 \cdot h$
	Gestörte Spannung σ'_w für $l = l_{krit}$	$0,0196 \cdot h$
	Reduzierte Spannung $\sigma''_w < \sigma_w$ für $l < 0,9 \cdot l_{krit}$	$14,8 \cdot \frac{(L - 400)^2}{h} \cdot 10^{-6}$

Anmerkung: L = Plattenlänge, B = Plattenbreite, h = Plattendicke

Im Rahmen des Projekts im Auftrag des Flughafen Wiens [Blab et al., 2011] wurden Vergleichsrechnungen zum Zwecke der Plausibilisierung durchgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse der Formeln nach EISENMANN den Spannungen einer FEM-Berechnung gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die angeführten Formeln eine gute Näherung und Ergebnisse auf der sicheren Seite liefern.

4.5.3 Schadensmodell

Die maßgebende Beanspruchung von Betonplatten tritt in Form von Biegezugspannungen an der Plattenunterseite auf. Die häufig wechselnden Spannungen durch die Verkehrsbelastung, die über der Dauerfestigkeit liegen, führen zu einer sukzessiven Abnahme der Festigkeit des Materials, was schließlich zur Bildung von Rissen und somit zum Ermüdungsversagen führt. Mit diesem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist schließlich die Lebensdauer erreicht. Bei Betonplatten kommt als Ermüdungskriterium zur Ermittlung der zulässigen Bemessungsnormlastwechsel das empirisch abgeleitete Kriterium nach SMITH zur Anwendung. Es berücksichtigt die Biegezugfestigkeit des Betons als Widerstandswert und wird in Form des SMITH'schen Schaubildes (siehe Abbildung 17) angegeben. Dieses bildet eine Verknüpfung zwischen den Biegezugspannungen aus Verkehrslasten sowie der Temperaturbeanspruchung mit der zulässigen Anzahl an Lastwechseln. Die infolge ungleichmäßiger Erwärmung von oben entstehende

Wölbspannung σ_w wird dabei als zeitlich konstante, auf die Festigkeit f_{ct} bezogene Unterspannung berücksichtigt und mit der Verkehrsspannung σ_Q als ebenso auf die Festigkeit bezogene Oberspannung überlagert.

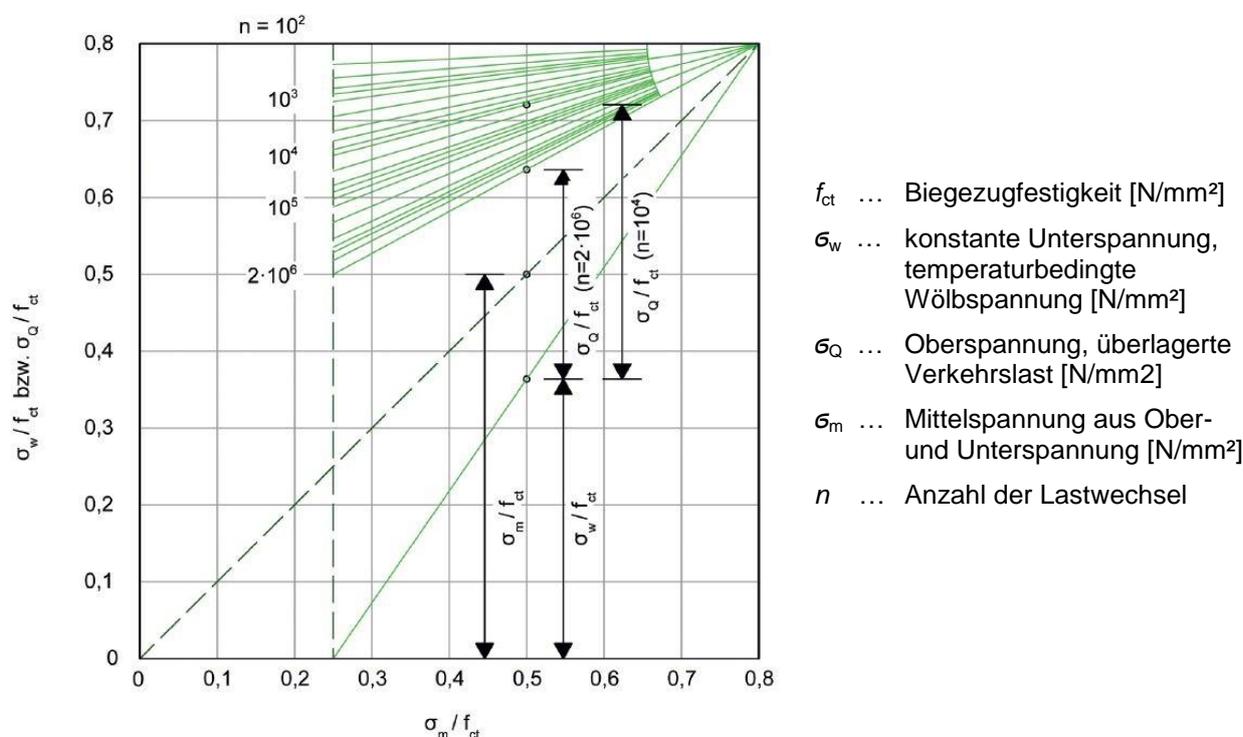


Abbildung 17: Smith'sches Schaubild für Normalbeton [Eisenmann, 1979]

Das SMITH'sche Schaubild kann auch als Gleichung angeschrieben werden, wie in Gleichung (10) dargestellt [Blab et al., 2012]. Daraus lässt sich schließlich die zulässige Anzahl an Lastwechseln N_{zul} aus den bereits bekannten Verkehrsspannungen und Wölbspannungen berechnen. Die zugehörige Teilschädigungsrate $C_{i,j}$ ergibt sich als deren Kehrwert.

$$\sigma = f_{ct} \cdot \left\{ [(\log N_{zul}) - 2] \cdot \left[0,0875 \cdot \frac{\sigma_w}{f_{ct}} - 0,07 \right] + 0,80 \right\} - \sigma_w \quad (10)$$

- σ ... Biegezugspannungen infolge Verkehr [N/mm²]
 σ_w ... Biegezugspannungen infolge Temperatureinwirkung (Wölbspannungen) [N/mm²]
 f_{ct} ... Biegezugfestigkeit des Betons [N/mm²]
 N_{zul} ... zulässige Anzahl an Lastwechseln

Da der angenommene Temperaturgradient von $\Delta t = 0,09$ K/mm einem Maximalwert entspricht, der nur wenige Tage im Jahr tatsächlich erreicht wird, wird die resultierende Wölbspannung nicht ganzjährig, sondern nur während eines beschränkten Zeitraumes von

bis zu 10 % des Jahres angesetzt. Der Einfluss dieses Umstandes auf die Teilschädigungsraten wird in Gleichung (11) gezeigt.

$$C_{i,j} = C_{i,j,1} \cdot 0,10 + C_{i,j,2} \cdot 0,90 \quad (11)$$

$C_{i,j}$	...	Schädigungsrate pro Überrollung i in der maßgebenden Achse für die Periode j
$C_{i,j,1}$	...	Schädigungsrate bei $\sigma_Q + \sigma_W$
$C_{i,j,2}$	...	Schädigungsrate bei σ_Q

4.5.4 Bemessung

Die für die Bemessung auf der Widerstandsseite und auch für die Ermittlung der Aggressivitätszahlen erforderliche Anzahl der zulässigen Lastwechsel durch das Bemessungsflugzeug $N_{BLFZ,zul}$ ergibt sich, wie in Gleichung (4) gezeigt, als reziproker Wert der Gesamtschädigung (siehe Abschnitt 4.1.2). Für starre Aufbauten ergibt sich diese Gesamtschädigungsrate durch Summation der einzelnen Teilschädigungsraten, wie in Gleichung (12) dargestellt.

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 (p_j \cdot C_{i,j}) \quad (12)$$

C_{ges}	...	Gesamtschädigungsrate durch das Bemessungsflugfahrzeug
p_j	...	Anteil der Dauer der Untergrundperiode j während eines Jahres
$C_{i,j}$	...	Schädigungsrate pro Überrollung i in der maßgebenden Achse für die Periode j

Da das Hauptfahrwerk des Bemessungsflugzeugs in seiner maßgebenden Achse eine Doppelradtridem-Bereifung aufweist (siehe Abbildung 12 auf Seite 41), müssen bei der Gesamtschädigung jeweils drei Überrollungen berücksichtigt werden. Diese werden durch den Index i beschrieben. Dem Einfluss der vier Untergrundtragfähigkeitsperioden auf die zulässigen Bemessungsnormlastwechsel wird über den Index j Rechnung getragen. Die zugehörigen Gewichtungsfaktoren p_j können Tabelle 13 in Abschnitt 5.2.1 entnommen werden, wobei für die Untergrundperiode 4 die Faktoren der Temperaturperioden 7 bis 12 summiert werden müssen. Die Gleichung (12) kann im Zusammenhang mit der Ermittlung der Aggressivitätszahlen für sämtliche Flugzeugmuster adaptiert werden. Dabei ändert sich

lediglich der Wert des Index i , welcher zwischen 1 und 3 variiert, je nach Radkonfiguration des Hauptfahrwerks.

5 AGGRESSIVITÄTSZAHLEN FÜR HALBSTARRE AUFBAUTEN

Da die eigentliche Dimensionierung des Oberbaus mittels der einheitlichen Belastung durch ein gewähltes (fiktives) Bemessungsluftfahrzeug durchgeführt wird, müssen die tatsächlich auftretenden Belastungsvorgänge der einzelnen LFZ aus der erwarteten Flugzeugflotte in analoge Belastungen umgerechnet werden. Die Aggressivitätszahlen stellen daher eine wesentliche Komponente der Österreichischen Bemessungsmethode dar, zumal sie den geforderten Zusammenhang zwischen dem ermittelten Bemessungsluftfahrzeug und den einzelnen bemessungsrelevanten Flugzeugtypen herstellen. Sie beschreiben die äquivalente Schädigung, die eine Überrollung eines bestimmten LFZ in Bezug auf das Bemessungsluftfahrzeug bewirkt. Erst dadurch wird es ermöglicht, die Auswirkungen einzelner Flugzeuge zu vergleichen und deren Einfluss auf die strukturelle Lebensdauer eines Oberbaus getrennt zu betrachten.

Im vorliegenden Kapitel soll die genaue Vorgehensweise zur Ermittlung der Aggressivitätszahlen für halbstarre Aufbauten anhand eines konkreten Beispiels aufgezeigt werden. Sämtliche Parameter beziehen sich dabei auf die Anforderungen des Flughafen Wiens in Bezug auf die Neuerrichtung der geplanten dritten Piste 11R/29L sowie aller zugehörigen Flugbewegungsflächen. Da im Rahmen des genannten Projekts sämtliche Bemessungen bereits durchgeführt wurden, können die errechneten Ergebnisse gegenübergestellt und auf Plausibilität überprüft werden. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die Berechnungen der Aggressivitätszahlen des Flughafenprojekts mit Hilfe der Software FAARFIELD der FAA ermittelt wurden. Dieses Programm stellt im Prinzip eine Blackbox dar, die keinen Einblick in die Berechnungsvorgänge zulässt. Die zugrunde liegenden Daten und Verfahren können lediglich dem zugehörigen Advisory Circular [FAA, 2009] entnommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Spannungsermittlung mit dem Programm LEAP durchgeführt, das ebenso wie FAARFIELD auf der linearen Mehrschichtentheorie basiert. Sämtliche weitere Schritte erfolgen jedoch durch manuelles Bearbeiten und Programmieren in MS EXCEL. Die Vergleichswerte stammen aus [Blab et al., 2011] sowie zur Verfügung gestellten Berechnungsblättern.

5.1 Vorgehensweise

Die grundlegende Ermittlung der Aggressivitätszahl eines bestimmten Flugzeugtyps erfolgt nach Gleichung (13) als Verhältnis der Schädigungen eines Flugzeugs vom Typ i und des Bemessungsluftfahrzeugs.

$$A_{LFZ,i} = \frac{C_{LFZ,i}}{C_{BLFZ}} \quad (13)$$

$A_{LFZ,i}$	...	Aggressivitätszahl des bemessungsrelevanten Luftfahrzeugs vom Typ i
$C_{LFZ,i}$	...	Schädigungsrate des bemessungsrelevanten Luftfahrzeugs vom Typ i
C_{BLFZ}	...	Schädigungsrate des Bemessungsluftfahrzeugs

Die Aggressivitätszahl steht im direkten Zusammenhang mit der Schädigung, die vom betrachteten LFZ am Oberbau verursacht wird und ist somit von deren Einflussfaktoren abhängig. Die Parameter, welche die Schädigung und somit die Aggressivitätszahl beeinflussen, sind in erster Linie:

- Flugzeugtyp (Gewicht und Radkonfiguration)
- Oberbautyp (starr oder flexibel)
- Schichtdicken
- Materialkennwerte
- Untergrundtragfähigkeit
- klimatische Einflüsse

Jedem dieser Parameter muss in irgendeiner Form Rechnung getragen werden. Flugzeugtyp, Oberbautyp und variierende Schichtdicken müssen jeweils in getrennten Berechnungsschritten behandelt werden und führen zu einer Vielzahl von Aggressivitätszahlen. Es muss also für je einen bestimmten Oberbau mit definiertem Schichtenaufbau für jeden Flugzeugtyp eine Aggressivitätszahl ermittelt werden. Werden im Zuge der Bemessung unterschiedlich abgestufte Schichtdicken untersucht, ist es daher erforderlich, eine entsprechend vielfache Anzahl an Aggressivitätszahlen zu berechnen. Selbiges gilt grundsätzlich auch für die Variation der Materialkennwerte, es sei denn die Änderung ist auf klimatische Einflüsse zurückzuführen. Anders wird bei klimatischen Einflüssen sowie der damit im Zusammenhang stehenden Untergrundtragfähigkeit vorgegangen. Diese Parameter haben einen wesentlichen Einfluss auf die Tragwirkung und somit die Schädigung des Oberbaus, sie schwanken jedoch erheblich zwischen den Jahreszeiten. Aus diesem Grund werden die Aggressivitätszahlen aus dem Verhältnis gewichteter Gesamtschädigungsraten ermittelt, welche sich aus den Teilschädigungsraten, bezogen auf die Parameter der jeweiligen Klimaperiode, zusammensetzen. Die Wichtung dieser Teilschädigungsraten erfolgt mittels des Anteils der jeweiligen Periode am

Kalenderjahr. Bei halbstarren Aufbauten müssen entsprechend der Temperaturabhängigkeit der bituminösen Materialparameter 12 Bemessungsperioden berücksichtigt werden. Die E-Moduln sowie die Wichtungsfaktoren als Eingangswerte für die Berechnung sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 in Abschnitt 5.2.1 angegeben.

Da die Bemessung im Allgemeinen einen iterativen Vorgang darstellt (siehe Abschnitt 4.1.3), werden im vorliegenden Beispiel drei verschiedene Oberbauvarianten in Form abgestufter Dicken der bituminösen Tragschichte untersucht. Bei einer anschließenden Bemessung kann die geforderte Schichtdicke näherungsweise durch eine lineare Interpolation aus den erhaltenen Ergebnissen der drei Varianten ermittelt werden, vorausgesetzt das Bemessungsergebnis liegt zwischen diesen Werten.

5.2 Eingangparameter

Sämtliche Eingangsparameter der folgenden Abschnitte beziehen sich grundsätzlich auf die Anforderungen bzw. Gegebenheiten des Flughafen Wiens entsprechend [Blab et al., 2011]. Die Maßgebenden Parameter für die Eingabe in die Bemessungssoftware sind jeweils am Ende der folgenden Abschnitte, in Abbildung 18 sowie in Tabelle 14, zusammengefasst.

5.2.1 Materialkennwerte

Untergrund

Die grundlegenden Anforderungen, die in Österreich gemäß RVS 08.15.01:2010 an den Untergrund bezüglich dessen Tragfähigkeit gestellt werden, betreffen den Verformungsmodul auf dem Unterbauplanum. Dabei müssen bestimmte Werte entsprechend der RVS 08.03.01:2010 garantiert werden, damit eine ungebundene untere Tragschichte aufgebracht werden darf [Blab et al., 2011]. Da dies im gegenständlichen Beispiel auf die Frostschuttschichte zutrifft (siehe Abbildung 14), können die beschriebenen Werte als Mindestwerte für die Berechnung herangezogen werden, die durch etwaige Bodenverbesserungen an allen Stellen eines projektierten Oberbaus und zu jeder Jahreszeit sichergestellt werden müssen. Den Wert, der für die österreichischen Standardaufbauten im Straßenwesen und außerdem adaptiert für die Österreichische Bemessungsmethode von Flugbetriebsflächen vorgegeben wird, gibt die RVS als minimalen statischen Verformungsmodul aus Erstbelastung von $E_{V1} = 35 \text{ MN/m}^2$ an. Da ein statischer Modul die kurzzeitig auftretenden Verkehrslasten nur unzureichend berücksichtigt, ist es für die Bemessung erforderlich, den dynamischen E-Modul des Untergrunds zu kennen. Dieser wird

neben der elastischen auch aus der zeitabhängigen, viskosen Dehnungskomponente ermittelt. Dadurch wird auch der dynamische E-Modul von der Dauer der Lasteinwirkung beeinflusst und ergibt wesentlich höhere Werte als der statische Verformungsmodul. Nach [Wistuba, 2003] lässt er sich entsprechend Gleichung (14) näherungsweise als das Zweifache von E_{V1} berechnen.

$$\min E_{dyn,UG} = 2 \cdot \min E_{V1,UP} \text{ (Abnahmeprüfung)} = 2 \cdot 35 = 70 \text{ MN/m}^2 \quad (14)$$

$\min E_{dyn,UG}$... minimaler dynamischer E-Modul des Untergrunds
 $\min E_{V1,UP}$... minimaler statischer Verformungsmodul aus Erstbelastung am Unterbauplanum

Aus den Anforderungen der RVS ergibt sich somit ein Minimalwert von $E_{dyn,UG} = 70 \text{ MN/m}^2$, der für die Frühjahrstauperiode als maßgebende Jahreszeit angesetzt werden muss. Die sich daraus ableitenden Moduln für alle vier Untergrundtragfähigkeitsperioden wurden bereits in Abschnitt 4.3 erläutert und sind in Tabelle 7 zusammengestellt; sie werden für die weiteren Berechnungen herangezogen. Die Gewichtung der einzelnen Teilschädigungsraten, denen hinsichtlich der jeweils betrachteten Jahresperiode eine gewisse Untergrundtragfähigkeit zugrunde liegt, erfolgt schließlich in Übereinstimmung mit den Wichtungsfaktoren ρ_j für die Temperaturperioden der bituminösen Schichten. Der Zusammenhang der Untergrund- und der Temperaturperioden kann Tabelle 13 auf Seite 70 entnommen werden. Die Querdehnzahl wird unabhängig vom E-Modul und für jede Temperaturperiode mit einem Wert von $\mu = 0,35$ definiert.

Tabelle 7: Untergrundtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Jahresperiode

Untergrundperiode	1	2	3	4
Zeitraum	16.12. - 15.03.	16.03. - 15.05.	16.05. - 15.06.	16.06. - 15.12.
$E_{dyn,UG}$ [MN/m ²]	280	70	100	140

Die in Tabelle 7 angegebenen Werte stellen die erforderlichen Mindestwerte für das Unterbauplanum dar und gelten für den verdichteten Zustand. Sie sind darüber hinaus bis 1,5 m unter das UP sicherzustellen. Auch darunter sind bis auf mindestens 7,5 m unter Fahrbahn OK bestimmte Sollwerte erforderlich, deren Einhaltung mittels indirekter Messmethoden vor Ort überprüft werden muss. Bei der Bemessung wird zunächst für den gesamten Halbraum ab 1,5 m unter UP, für jede Untergrundtragfähigkeitsperiode ein Rechenwert von $E_{dyn,UG} = 40 \text{ MN/m}^2$ angenommen. Dieser Ansatz wurde in Abstimmung mit einem geotechnischen Gutachter im Rahmen des Projekts des Flughafens Wiens festgelegt

[Blab et al., 2011]. Nach probeweise durchgeführter Modellierung und Berechnung mit Hilfe der Software LEAP und einer anschließenden Spannungsauswertung und Ermüdungsberechnung in EXCEL wird jedoch ersichtlich, dass sehr große Abweichungen zu den Ergebnissen für den Flughafen Wien auftreten. Eine Überprüfung der zugrunde liegenden Berechnungsdaten liefert die Erkenntnis, dass im genannten Projekt ein einschichtiger, homogener Untergrund modelliert wurde, wobei der E-Modul der jeweiligen Untergrundperiode verwendet wurde (siehe Tabelle 7). Die zweischichtige Unterteilung, wie eigentlich im zugehörigen Projektbericht [Blab et al., 2011] beschrieben, kommt nicht zur Anwendung. Eine eigens durchgeführte Vergleichsrechnung mit Hilfe von LEAP und EXCEL und eine anschließende Gegenüberstellung der Ergebnisse am Beispiel des Bemessungsflugzeugs und einer Asphaltschichtdicke von 30 cm zeigt, dass die Schädigung bei Berücksichtigung des zweischichtigen Modells einen um 61 % erhöhten Wert ergibt. Auch wenn die zweischichtige Variante den tatsächlichen Untergrund grundsätzlich näher beschreibt, schließlich sind in großen Tiefen keine nennenswerten Temperaturschwankungen zu erwarten (u.U. jedoch hydrologische Änderungen), wird in weiterer Folge von der weniger konservativen Variante Gebrauch gemacht. Dieser Schritt wird alleine deswegen gewählt, um weiterhin Ergebnisse mit jenen für den Flughafen Wien vergleichen zu können. Diese offensichtliche Diskrepanz im Flughafenprojekt sollte jedoch in Absprache mit dem zuständigen geotechnischen Gutachter beseitigt werden, um eine realistische Bemessung der tatsächlich geplanten Flugbetriebsflächen zu gewährleisten

Frostschuttschicht

Das Verformungsverhalten ungebundener Tragschichten ist stets von den Eigenschaften der darunter liegenden ungebundenen Schichten sowie des Untergrunds abhängig. Die Zusammenhänge sind für die Österreichische Methode in Tabelle 8 dargestellt. Somit hängt auch die Tragfähigkeit der Frostschuttschicht als ungebundene Tragschicht ganz wesentlich mit der des darunter liegenden Untergrunds und in diesem Zusammenhang auch mit den Jahresperioden zusammen. Auch wenn der E-Modul einer ungebundenen Schicht grundsätzlich nichtlinear über die Dicke verläuft, kann der Verlauf im Hinblick auf die Bemessung durch einen konstanten, mittleren Modul ersetzt werden.

Tabelle 8: Annahmen für das E-Modulverhältnis ungebundener Tragschichten im Österreichischen Bemessungsmodell [Milkovics, 1984]

Schicht 1	Schicht 2	Verhältnis der $E_{dyn,UG}$
30 cm ungebundene untere TS	Untergrund	2,0
ungeb. obere TS: 20 cm Rundkörnung	ungeb. untere TS	1,7
ungeb. obere TS: 20 cm Kantkörnung	ungeb. untere TS	1,9
ungeb. obere TS: 15 cm ZGKK	ungeb. untere TS	2,5

Als Näherungslösung wird das E-Modulverhältnis gemäß Zeile 1 in Tabelle 8 mit dem Wert 2,0 gewählt. Die E-Moduln der Frostschutzschichte fließen somit jeweils als doppelter Wert der E-Moduln des Untergrunds (siehe Tabelle 7) entsprechend der betrachteten Untergrundtragfähigkeitsperiode in die Berechnungen ein; die Werte sind in Tabelle 9 angeführt. Die Querdehnzahl ist von den Schwankungen der Untergrundparameter unabhängig und wird ebenso wie beim Untergrund mit einem mittleren Wert von $\mu = 0,35$ angenommen.

Tabelle 9: Tragfähigkeit der Frostschutzschichte in Abhängigkeit von der Jahresperiode

Untergrundperiode	1	2	3	4
Zeitraum	16.12. - 15.03.	16.03. - 15.05.	16.05. - 15.06.	16.06. - 15.12.
$E_{dyn,FSS}$ [MN/m ²]	560	140	200	280

Zementstabilisierte Tragschicht

Der zementstabilisierten Tragschicht wird für die theoretischen Berechnungen ein E-Modul von $E_{dyn} = 5.000 \text{ MN/m}^2$ zugeordnet. Die zugehörige Querdehnzahl wird mit $\mu = 0,20$ angenommen. [Blab et al., 2011]

Bituminöse Schicht

Die bituminöse Schicht umfasst sowohl die Asphaltdeckschichte als auch die bituminöse Tragschichte. Wie bereits in Abschnitt 4.4.5 beschrieben, sind die Materialeigenschaften, in erster Linie der E-Modul von Asphalt, stark temperaturabhängig, weswegen bei der Bemessung 12 Temperaturperioden über das Jahr verteilt berücksichtigt werden müssen. Die zur Anwendung kommenden Temperaturen gehen auf Versuche an der Technischen Universität München zurück, welche in Bezug auf die klimatischen Verhältnisse für Österreich übernommen werden können. Es wurden dabei Messungsergebnisse an verschiedenen Tiefen von Versuchsaufbauten während des gesamten Jahres dokumentiert und daraus charakteristische Temperaturprofile für jede Periode erstellt [Wistuba, 2003]. Aus

dem Verlauf der Temperaturverteilungen wurden weiters gemittelte Werte für verschiedene Schichtdicken festgelegt, da die Berechnung mit Computerprogrammen nach der linearen Mehrschichtentheorie die Eingabe von konstanten Werten erfordert. Diese mittleren Temperaturen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Charakteristische mittlere Temperaturen in der Mitte der bituminösen Schicht in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Schichtstärke h [Milkovics, 1987]

Zeitraum	16.12. - 15.03.		16.03. - 15.05.		16.05. - 15.06.		16.06. - 15.09.		16.09. - 15.10.		16.10. - 15.12.	
Temperatur- periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h [cm]	Bemessungstemperatur [°C]											
6	-1	-7	17	8	31	18	34	20	26	15	10	5
8	-1	-7	16	8	31	18	34	20	25	15	10	6
9	-1	-7	16	8	30	18	33	21	25	15	10	6
10	-1	-7	16	8	30	18	33	21	25	15	10	6
11	-1	-7	16	8	30	18	32	21	24	15	10	6
12	-1	-6	15	8	29	18	32	21	24	15	10	6
14	-1	-6	15	8	29	18	31	21	24	16	10	6
15	-1	-6	15	8	29	18	31	21	23	16	10	7
17	-1	-6	15	9	28	18	30	21	23	16	10	7
18	-1	-6	14	9	28	18	30	21	23	16	10	7
20	-1	-6	14	9	28	18	30	21	23	16	10	7
21	-1	-6	14	9	26	18	29	21	22	16	10	7
22	-1	-6	14	9	26	18	29	21	22	16	10	7
24	-1	-6	14	9	26	18	29	21	22	16	10	7
25	-1	-5	14	9	26	18	28	21	22	16	10	8
26	-1	-5	14	9	26	18	28	21	22	16	10	8
28	-1	-5	13	10	25	18	28	21	21	16	9	8
29	-1	-5	13	10	25	18	27	21	21	16	9	8
32	-1	-4	13	10	24	18	27	21	20	16	9	8
33	-1	-4	13	10	23	18	26	21	20	17	9	8
36	-1	-4	12	10	23	18	26	21	20	17	9	8
37	-1	-3	12	10	23	18	26	21	20	17	9	8
40	-1	-3	12	10	22	18	25	21	19	17	9	8

Im Hinblick auf die gewählten Schichtstärken der bituminösen Schichte von 30, 35 und 40 cm, welche im Rahmen der Untersuchungen am Beispiel des Flughafen Wiens berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 5.2.2), sind in Tabelle 11 die interpolierten Werte für eben diese Dicken angegeben.

Tabelle 11: Mittlere Temperaturen für die bemessungsrelevanten Schichtdicken

Zeitraum	16.12. - 15.03.		16.03. - 15.05.		16.05. - 15.06.		16.06. - 15.09.		16.09. - 15.10.		16.10. - 15.12.	
Temperatur- periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h [cm]	Temperaturmittelwert über Dicke h [°C]											
30	-1	-4	13	10	25	18	27	21	21	16	9	8
35	-1	-4	13	10	23	18	26	21	20	17	9	8
40	-1	-3	12	10	22	18	25	21	19	17	9	8

Die starke Temperaturabhängigkeit des Asphalts ist auf die Eigenschaften des Bitumens zurückzuführen, welches sich durch temperatur- und zeitabhängiges, viskoelastisch-plastisches Materialverhalten auszeichnet. Aus diesem Umstand folgt, dass der temperaturabhängige E-Modulverlauf grundsätzlich vom zur Anwendung kommenden Material abhängig ist und je nach Asphalttyp variiert. Zu diesem Zweck wird in Österreich zur Oberbaubemessung ein generalisierender Ansatz gewählt, der einen Modellasphalt definiert, welcher aus Kurven der SHELL-Bemessungsmethode für Standardasphalte abgeleitet wurde [Shell, 1978]. Dieser Modellasphalt lässt sich durch einen E-Modul von $E_{dyn} = 3.400 \text{ MN/m}^2$ bei 18 °C charakterisieren. Um eine computergestützte Berechnung zu ermöglichen, wird ein Polynom 4. Grades verwendet, welches die Kurven nach SHELL mit hoher Genauigkeit annähert. Dieses Polynom ist in Gleichung (15) angeführt [Wistuba, 2003].

$$E_{dyn} = -2,079 \cdot 10^{-4} \cdot T^4 - 2,065 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 5,271 \cdot T^2 - 4,193 \cdot 10^2 \cdot T + 9218 \quad (15)$$

E_{dyn} ... dynamischer E-Modul eines Modellasphalts [MN/m²]

T ... Temperatur des Modellasphalts [°C]

Werden Asphalttypen verwendet, deren Materialparameter wesentlich von denen des Modellasphalts abweichen, so sind gesonderte Untersuchungen in Form von Laborversuchen zur Ermittlung des temperaturabhängigen E-Modulverlaufs unumgänglich.

Die E-Moduln für die Berechnungen am vorliegenden Beispiel werden für drei verschiedene Stärken der bituminösen Schichte ermittelt. Entsprechend der Temperaturmittelwerte für die jeweilige Temperaturperiode in Tabelle 11 werden die dynamischen E-Moduln E_{dyn} unter Annahme des erläuterten Modellasphalts sowie des Polynoms aus Gleichung (15) berechnet. Die Ergebnisse, die in die weiteren Berechnungen einfließen, sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Gemittelte E-Moduln für die bemessungsrelevanten Schichtdicken

Zeitraum	16.12. - 15.03.		16.03. - 15.05.		16.05. - 15.06.		16.06. - 15.09.		16.09. - 15.10.		16.10. - 15.12.	
Temperatur- periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h [cm]	Dynamischer E-Modul [N/mm ²]											
30	9640	10980	4650	5550	1920	3340	1590	2680	2680	3840	5870	6200
35	9640	10980	4650	5550	2280	3340	1750	2680	2890	3590	5870	6200
40	9640	10520	4940	5550	2470	3340	1920	2680	3110	3590	5870	6200

Entsprechend dem relativen Anteil der einzelnen Klima- bzw. Temperaturperioden am Kalenderjahr, müssen die Schädigungsraten, die sich an einem bestimmten Aufbau mit den der betrachteten Periode zugeordneten Materialparameter errechnen, gewichtet werden. Die Schadensakkumulation der einzelnen Teilschädigungsraten erfolgt schließlich nach Gleichung (9) (siehe Seite 52). Die hierfür erforderlichen Wichtungsfaktoren p_j für die 12 Temperaturperioden sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Wichtungsfaktoren p_j der Schädigung für die 12 Temperaturperioden [geändert nach Wistuba, 2003]

Untergrund- periode	1		2		3		4					
Klimaperiode	1		2		3		4		5		6	
Zeitraum	16.12. - 15.03.		16.03. - 15.05.		16.05. - 15.06.		16.06. - 15.09.		16.09. - 15.10.		16.10. - 15.12.	
Tage	90		61		31		92		30		61	
Jahresanteil %	0,24		0,17		0,09		0,25		0,08		0,17	
Tag/Nacht	T	N	T	N	T	N	T	N	T	N	T	N
Temperatur- periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
p_j	0,16	0,08	0,11	0,06	0,06	0,03	0,17	0,08	0,05	0,03	0,11	0,06

Auch die Querdehnzahl von Asphalt ist grundsätzlich temperaturabhängig. Darüber hinaus ist sie belastungsfrequenzabhängig, nimmt also mit sinkender Frequenz zu und erreicht bei statischer Beanspruchung das materialspezifische Maximum. Die Ergebnisse aus Versuchsauswertungen bewegen sich im Bereich zwischen $\mu = 0,2$ und $\mu = 0,5$ [Wistuba, 2003]. Da die Berücksichtigung dieser Effekte nicht ohne Weiteres möglich ist, wird in der Österreichischen Methode die Querdehnzahl vereinfachend und näherungsweise als konstanter mittlerer Wert von $\mu = 0,35$ für sämtliche bituminöse Schichten angesetzt.

Im vorliegenden Beispiel wird bei der Modellierung, wie bereits beschrieben, ein konstanter Mittelwert des E-Moduls für die gesamte bituminöse Schichte angesetzt (siehe Tabelle 12). Ein etwas realitätsnäherer Ansatz besteht darin, die Temperaturmittelwerte gesondert für die Deckschichte und die bituminöse Tragschichte zu ermitteln. Dadurch kann der tatsächliche E-Modulverlauf eine Spur besser angenähert werden. Der Einfluss kann jedoch als eher gering angenommen werden, da der Anteil der Deckschichte an der gesamten bituminösen Schichte mit 4 cm Dicke relativ gering ist. Diese Vorgehensweise wurde im Rahmen der Berechnungen für den Flughafen Wien gewählt, weshalb eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse möglich ist. Es erfolgt eine Simulation mit dem Berechnungsprogramm LEAP und eine anschließende Auswertung und Ermüdungsberechnung in EXCEL unter Anwendung sämtlicher in Abschnitt 4.4 beschriebener Formeln. Der Vergleich des Ergebnisses mit dem für den Flughafen Wien liefert am Beispiel einer Asphaltschichtdicke von 30 cm eine rechnerische Abweichung von 2,21 %. Das in dieser Arbeit gewählte Modell der Temperaturverteilung liegt somit grundsätzlich auf der unsicheren Seite, der Unterschied ist jedoch ausreichend gering, sodass diese Vorgehensweise ohne Bedenken fortgeführt werden kann.

5.2.2 Schichtenaufbau

Im Rahmen des betrachteten Beispiels sollen drei verschiedene Schichtdicken behandelt und ein Zusammenhang mit der strukturellen Lebensdauer hergestellt werden, um durch abschließende Interpolation der Ergebnisse einen Dimensionierungsvorschlag zu erlangen (siehe Abschnitt 4.1.3). Die Variation erfolgt dabei innerhalb der bituminösen Tragschichte (AC Tragschicht), wobei Dicken von 26, 31 und 36 cm untersucht werden. Mit einer konstanten Dicke der bituminösen Deckschichte (AC Deckschicht) von 4 cm ergeben sich somit Gesamtstärken der Asphaltschichte von 30, 35 und 40 cm, die in getrennten Berechnungen untersucht werden. Darunter befindet sich die zementstabilisierte Tragschichte (ST-Z) mit einer einheitlichen Dicke von 30 cm, die Frostschutzschichte (FSS) mit 35 cm und der (verbesserte) Untergrund. Letztgenannter wird als Halbraum modelliert, mit einem saisonal schwankenden, gleichmäßig verteilt angenommenen E-Modul. Der gewählte Schichtenaufbau sowie sämtliche relevante Parameter sind in Abbildung 18 zusammengefasst.

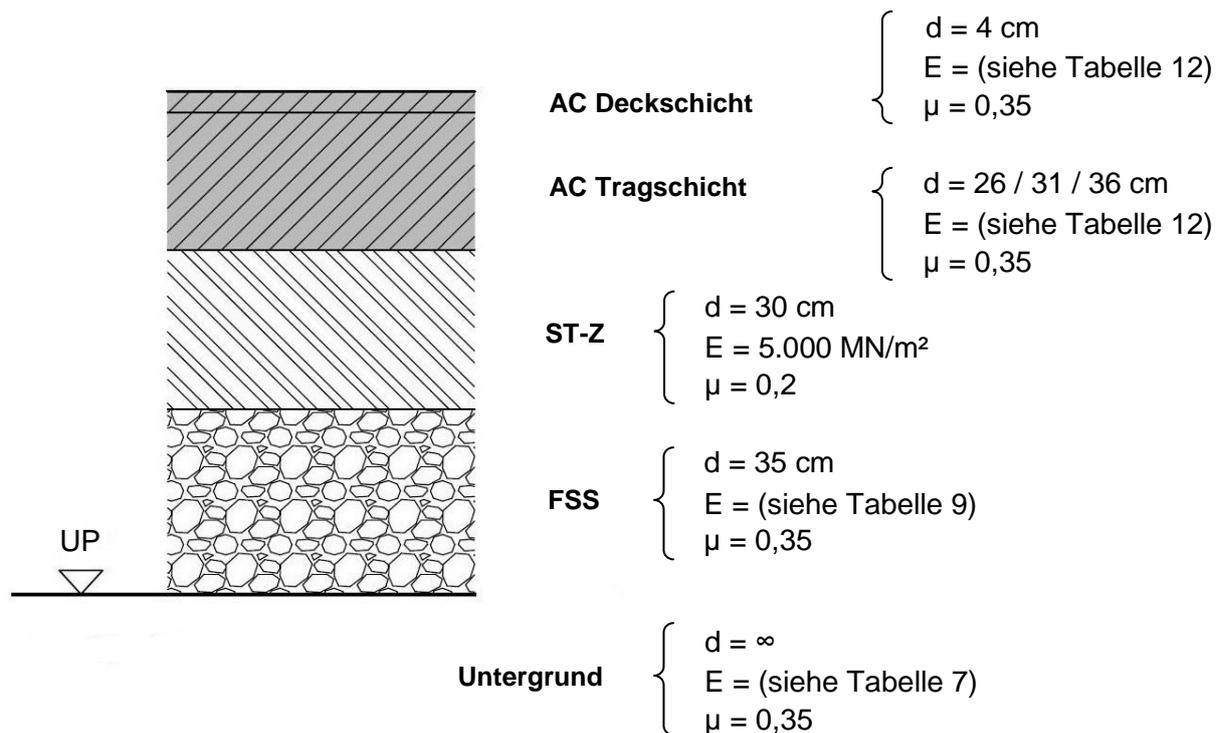


Abbildung 18: Schichtenaufbau und Parameter der untersuchten halbstarren Oberbauvariante

5.2.3 Belastungsdaten der Flugzeugflotte

Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 erläutert, kann die Belastung unter Anwendung der Bemessungssoftware LEAP nur in Form von kreisförmigen Toplasten aufgebracht werden, was jedoch eine akzeptable Vereinfachung darstellt. Mit Hilfe von Gleichung (16) lässt sich, bei Kenntnis des Reifeninnendruck, der zugehörige Lastradius r einer Radlast ermitteln. Im Berechnungsprogramm wird aus der Kreisfläche mit dem Radius r und der angegebenen Einzellast eine äquivalente Spannung berechnet, die in etwa der realen Belastung durch ein Rad entspricht.

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot p_i}} \quad (16)$$

r	... Lastradius [mm]
P	... Radlast [N]
p_i	... Reifeninnendruck [N/mm ²]

Die nötigen Reifendruckangaben werden aus den jeweiligen Flugzeugdatenblättern der Hersteller entnommen. Entsprechend dem Hinweis eines Reifenherstellers, wird der angegebene Reifeninnendruck jeweils um 4 % erhöht in der Berechnung angesetzt. Grund

dafür ist die Verringerung des Luftkammervolumens und die einhergehende Erhöhung des Innendrucks bei voller Beladung des Luftfahrzeugs [Blab et al., 2011].

Die für die Belastung erforderliche Maximalmasse eines LFZ wird grundsätzlich aus dem jeweiligen Flugzeugdatenblatt entnommen. Ebenso die Verteilung des Gewichts auf das Bug- und das Hauptfahrwerk, bzw. auf die einzelnen Fahrwerksbeine des Hauptfahrwerks. Ist das Datenblatt eines Flugzeugmusters nicht öffentlich einsehbar, so können die notwendigen Angaben aus der FAA-Software FAARFIELD entnommen werden, die eine umfangreiche Flugzeugdatenbank beinhaltet. Ist ein LFZ auch hier nicht auffindbar (beispielsweise Bombardier Q400), wird die Lastverteilung so angenommen, dass 95 % der Gesamtlast auf das Hauptfahrwerk fallen. Diese Vorgehensweise entspricht dem Vorschlag der ICAO [ICAO, 1983] und wird auch beim Bemessungsluftfahrzeug angewandt, da dieses eine fiktive Konfiguration darstellt (siehe Abschnitt 4.2). Sämtliche notwendige Eingangsdaten für die LEAP-Modellierung sind in Tabelle 14 für alle (für den Flughafen Wien) bemessungsrelevanten Luftfahrzeugtypen zusammengestellt. Die Werte der Lastradien wurden dabei unter Anwendung von Gleichung (16) ermittelt.

Tabelle 14: Bemessungsrelevante Belastungsdaten der Flugzeugflotte

Flugzeugmuster	Gesamtmasse [t]	% der Gesamtmasse am HFW	Radlast [N]	Reifeninnendruck* [N/mm ²]	Lastradius [mm]
BLFZ	850,0	95,0	397.000	1,67	275
Bombardier Q400	30,0	95,0	69.900	1,00 **	149
Fokker 100	45,8	95,0	106.700	1,12	174
B 737-800	79,2	93,5	181.800	1,46	199
A 321-200	93,5	95,3	218.000	1,56	211
B 767-300 ER	187,3	92,3	212.000	1,44	216
A 340-300	Main	277,4	255.300	1,48	234
	Center			1,13	268
MD 11	Main	287,1	273.000	1,48	242
	Center		237.000	1,29	242
B 777-300 ER	352,4	92,5	266.400	1,58	232
B 747-400 ER	414,2	93,6	237.600	1,43	230

Anmerkungen: * inklusive Erhöhung um 4 %

** geschätzter Wert

Das Aufbringen der Radlasten erfolgt schließlich entsprechend der Fahrwerks- bzw. Radkonfiguration der einzelnen Flugzeugtypen. Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln beschrieben, muss für die Bemessung nur das Hauptfahrwerk eines LFZ berücksichtigt werden, nicht aber das Bugfahrwerk. Bei der Wahl der Ausgabepunkte kann grundsätzlich von der Symmetrie eines HFW gebraucht gemacht und nur eine Hälfte angesetzt werden.

Dadurch wird eine unnötig große Menge an Ausgabedaten vermieden. Beim Aufbringen der Belastung selbst darf von dieser Vorgehensweise jedoch nicht Gebrauch gemacht werden, da der Einfluss benachbarter Fahrwerksbeine auf die Spannungen im Oberbau je nach Abstand beträchtlich sein kann. Da schon geringe Erhöhungen der bemessungsrelevanten Spannungen zu einer unverhältnismäßig starken Erhöhung der Schädigung führen, ist dieser Umstand mit besonderer Aufmerksamkeit zu berücksichtigen. Eine Vergleichsrechnung am Beispiel des Bemessungsluftfahrzeugs für einen Oberbau mit einer Dicke der bituminösen Schichte von 30 cm zeigt folgende starke Abweichung: Wird anstatt des gesamten HFW nur der symmetrische Anteil als äußere Last angesetzt, beträgt die errechnete Schädigung in der maßgebenden Achse lediglich etwa 18 % des Werts bei vollständiger Belastung. Die Berechnung wurde unter Verwendung der maßgebenden Radialspannungen durchgeführt.

5.3 Berechnungsergebnisse

Um die Aggressivitätszahlen nach beschriebenem Verfahren zu erhalten, müssen die Spannungsberechnungen und entsprechenden Auswertungen für das BLFZ und jedes erforderliche Flugzeugmuster für jede der drei untersuchten Oberbauvarianten und für jede der 12 Temperaturperioden getrennt durchgeführt werden. Es werden somit 36 Strukturen pro Flugzeugmuster getrennt ermittelt und die drei erhaltenen Schädigungsraten mit jenen des BLFZ in Verhältnis gebracht.

Tabelle 15 zeigt beispielhaft die Ermüdungsberechnung für das Bemessungsluftfahrzeug bei einem Oberbau mit einer Dicke der bituminösen Schichte von 35 cm (AC 35). Da das Hauptfahrwerk des BLFZ drei Räder in der maßgebenden Achse aufweist (siehe Abbildung 12 auf Seite 41), müssen drei Radübergänge mit verschiedenen Teilschädigungsraten berücksichtigt werden. Die Vergleichsspannungen σ_v müssen unter Berücksichtigung von Gleichung (7) (siehe Seite 49) für jede einzelne Überrollung an der jeweils maßgebenden Stelle berechnet werden. Die zugrunde liegenden Hauptspannungen stammen aus der zugehörigen LEAP-Simulation, während die Ermittlung der maßgebenden Überrollungsachse in EXCEL erfolgt. Das Inputfile für LEAP des vorliegenden Beispiels ist ausschnittsweise (nur Periode 1) im Anhang dargestellt. Die zulässige Anzahl an Lastwechsel N_{zul} für jede einzelne Periode sowie Überrollung errechnet sich unter Anwendung des Ermüdungskriteriums aus Gleichung (8) (siehe Seite 50). Die einzelnen Teilschädigungsraten C_{teil} ergeben sich aus dem Kehrwert von N_{zul} , wobei die in der Tabelle angeführten Werte bereits mit dem Faktor p_i (siehe Tabelle 13 auf Seite 70) für die relative Dauer der Temperaturperiode gewichtet wurden. Eine abschließende Summation sämtlicher

Teilschädigungsraten ergibt schließlich die mittlere Schädigung pro Übergang des BLFZ beziehungsweise als Kehrwert die zulässige Anzahl an Überrollungen.

Tabelle 15: Ermüdungsberechnung für das BLFZ für halbstarre Aufbauten mit AC 35

Temp.- periode	p_j [-]	1. Überrollung			2. Überrollung			3. Überrollung			
		σ_v [N/mm ²]	N_{zul} [-]	C_{teil} [-]	σ_v [N/mm ²]	N_{zul} [-]	C_{teil} [-]	σ_v [N/mm ²]	N_{zul} [-]	C_{teil} [-]	
1	0,16	1,12	34.490	4,64 E-6	1,01	57.885	2,76 E-6	0,62	668.470	2,39 E-7	
2	0,08	1,10	36.927	2,17 E-6	1,00	60.502	1,32 E-6	0,61	707.196	1,13 E-7	
3	0,11	2,57	537	2,05 E-4	2,39	776	1,42 E-4	1,59	5.884	1,87 E-5	
4	0,06	2,52	588	1,02 E-4	2,35	833	7,20 E-5	1,59	6.002	1,00 E-5	
5	0,06	2,32	891	6,73 E-5	2,09	1.505	3,99 E-5	1,32	14.928	4,02 E-6	
6	0,03	2,24	1.060	2,83 E-5	2,04	1.698	1,77 E-5	1,30	16.273	1,84 E-6	
7	0,17	1,96	2.056	8,27 E-5	1,73	3.931	4,32 E-5	1,09	38.724	4,39 E-6	
8	0,08	1,91	2.396	3,34 E-5	1,70	4.276	1,87 E-5	1,07	43.591	1,84 E-6	
9	0,05	1,89	2.463	2,03 E-5	1,69	4.342	1,15 E-5	1,06	44.389	1,13 E-6	
10	0,03	1,86	2.669	1,12 E-5	1,68	4.544	6,60 E-6	1,05	46.604	6,44 E-7	
11	0,11	1,79	3.272	3,36 E-5	1,63	5.163	2,13 E-5	1,03	51.939	2,12 E-6	
12	0,06	1,78	3.357	1,79 E-5	1,63	5.255	1,14 E-5	1,03	52.643	1,14 E-6	
				6,09 E-4					3,88 E-4		

Mittlere Schädigung pro BLFZ (3 Überrollungen)	1,04 E-3
Zulässige Überrollungen BLFZ $N_{BLFZ,zul}$	959

Die Schädigungsraten pro Überrollung eines bestimmten Flugzeugtyps der bemessungsrelevanten Flugzeugflotte sind in Tabelle 16 für die drei untersuchten Oberbauvarianten zusammengestellt.

Tabelle 16: Schädigungsraten C für die bemessungsrelevante Flugzeugflotte

Flugzeugmuster	AC 30	AC 35	AC 40
BLFZ	1,56 E-03	1,04 E-03	7,13 E-04
A321 - 200	1,51 E-05	8,26 E-06	4,70 E-06
A340 - 300	7,86 E-05	4,34 E-05	2,46 E-05
B737 - 800	7,45 E-06	4,19 E-06	2,47 E-06
B767 - 300 ER	2,25 E-05	1,28 E-05	7,00 E-06
B777 - 300 ER	7,54 E-05	4,02 E-05	2,19 E-05
B747 - 400 ER	3,62 E-04	2,22 E-04	1,40 E-04
MD 11	1,69 E-04	9,68 E-05	5,62 E-05
Fokker 100	1,18 E-06	6,73 E-07	3,96 E-07
Bombardier Q400	1,20 E-07	6,75 E-08	3,89 E-08

Die Aggressivitätszahlen werden schließlich nach Gleichung (13) (siehe Seite 63) mit den Schädigungswerten aus Tabelle 16 berechnet. Eine Zusammenstellung der Werte erfolgt in Tabelle 17.

Tabelle 17: Aggressivitätszahlen für die bemessungsrelevante Flugzeugflotte

Flugzeugmuster	AC 30	AC 35	AC 40
A321 - 200	9,68E-03	7,92E-03	6,59E-03
A340 - 300	5,05E-02	4,16E-02	3,45E-02
B737 - 800	4,79E-03	4,02E-03	3,46E-03
B767 - 300 ER	1,45E-02	1,23E-02	9,82E-03
B777 - 300 ER	4,85E-02	3,85E-02	3,07E-02
B747 - 400 ER	2,32E-01	2,13E-01	1,96E-01
MD 11	1,08E-01	9,28E-02	7,88E-02
Fokker 100	7,60E-04	6,45E-04	5,55E-04
Bombardier Q400	7,74E-05	6,47E-05	5,45E-05

Das Diagramm in Abbildung 19 zeigt die Aggressivitätszahlen am Beispiel von AC 35 anschaulich in logarithmischer Darstellung.

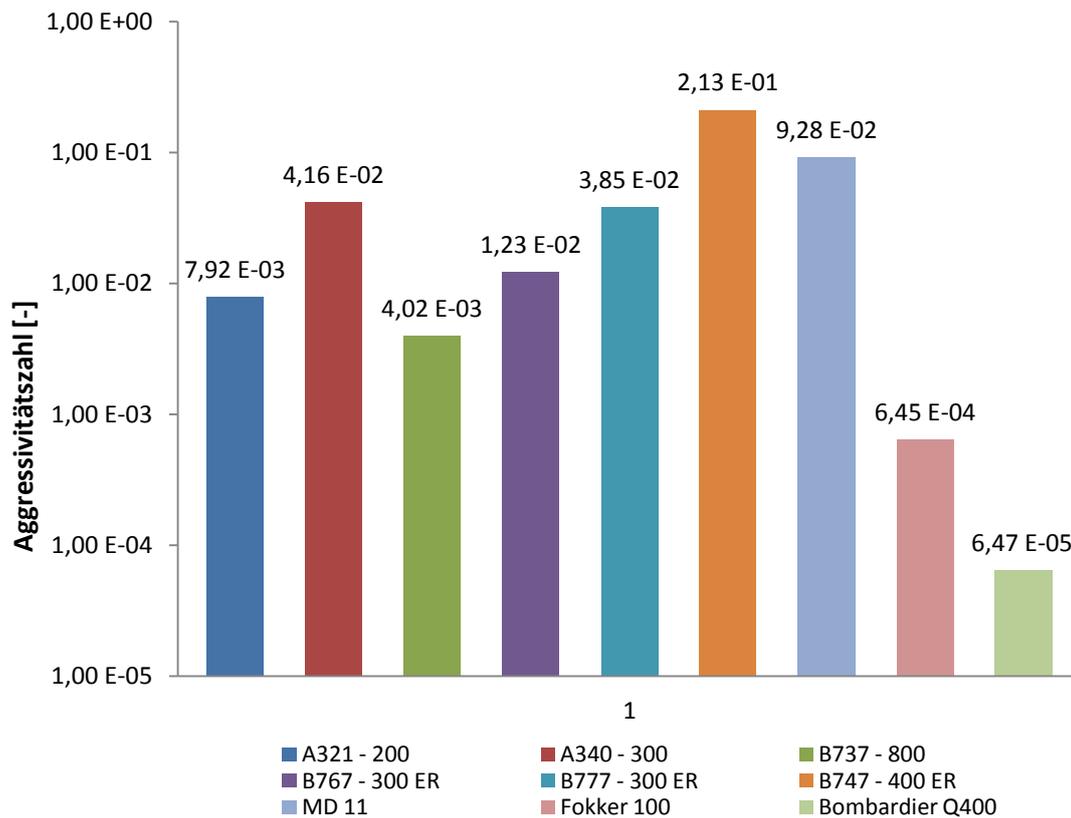


Abbildung 19: Aggressivitätszahlen der maßgebenden Flugzeugflotte für halbstarre Aufbauten mit AC 35

Bei den zugrunde liegenden Ermüdungsberechnungen (siehe Gleichung (8) auf Seite 50) wurden die einaxialen Vergleichsspannungen als maßgebende Beanspruchungen herangezogen, um den dreidimensionalen Spannungszustand gebührend zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise liegt gegenüber der Verwendung der senkrecht zur Belastung stehenden Radialspannungen grundsätzlich auf der sicheren Seite. Um einen quantitativen Vergleich der Auswirkungen der Spannungsauswahl auf die Aggressivitätszahlen zu ermöglichen, wurden sämtliche Berechnungen ab dem Zeitpunkt der Spannungsauswertung (bei gleichen LEAP Ausgangsfiles) für sämtliche Flugzeugtypen erneut durchgeführt, diesmal jedoch mit den jeweils höchsten Radialspannungen als maßgebende Beanspruchungen. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt Abweichungen der Aggressivitätszahlen, die je nach Flugzeugmuster zwischen 7 und 11 % schwanken; im Schnitt sind die Aggressivitätszahlen um 9,6 % erhöht, werden die Vergleichsspannungen, anstatt der Radialspannungen berücksichtigt. Auf eine Darstellung der einzelnen Werte wird an dieser Stelle verzichtet.

Nach umfangreicher Anwendung von LEAP in einer Vielzahl von Simulationen, können einige Schlussfolgerungen zu diesem Programm gezogen werden: Grundsätzlich ist die Programmoberfläche als kaum benutzerfreundlich anzusehen, wie bereits in Abschnitt 4.4.2 beschrieben wurde. Die Gestaltung der Inputfiles erfordert einiges an manueller Arbeit,

beträchtlich größer ist jedoch der Zeitaufwand bei der Auswertung der Outputfiles (in Textform) oder gar bei der Fehlersuche. Dieser Aufwand steigt häufig unverhältnismäßig an, da LEAP die Outputfiles regelmäßig falsch strukturiert. Bei etwa jeder zweiten Berechnung wurde die Reihenfolge der gerechneten Strukturen ohne erkennbaren Grund vertauscht, was eine Ergebnisauswertung in EXCEL um ein Vielfaches erschwert, da sämtliche Rechenvorgänge bei jeder Datei einzeln überprüft und bei Bedarf manuell umprogrammiert werden müssen. Darüber hinaus wurden vereinzelt Ausgabewerte wahllos weggelassen. Diese genannten Eigenheiten führen abschließend zum Fazit, dass LEAP nur beschränkt weiterzuempfehlen ist. Bei derartigen formalen Fehlern ist unter Umständen auch nicht garantiert, dass die errechneten Spannungen und Verzerrungen an der richtigen Stelle angezeigt oder überhaupt korrekt sind.

5.4 Unterschiede zur Berechnung mit FAARFIELD

Da die Ermittlung der Aggressivitätszahlen von der Projektgruppe im Auftrag des Flughafen Wiens mit FAARFIELD durchgeführt wurde, kann ein direkter Vergleich dieser Ergebnisse mit jenen aus Abschnitt 5.3 erfolgen. Um eine sinnvolle Gegenüberstellung zu gewährleisten, sind zunächst die Unterschiede zwischen den Berechnungsprogrammen und -modellen ausfindig zu machen.

5.4.1 Elastizitätsmoduln

Einen ganz wesentlichen Unterschied in den beiden Berechnungsvarianten bilden die zur Anwendung kommenden E-Moduln der bituminösen Schichten. Während bei der LEAP-Simulation die E-Moduln von den jahreszeitlich schwankenden Temperaturmittelwerten in den Schichten abhängig gemacht werden (siehe Abschnitt 5.2.1), nimmt FAARFIELD ganzjährig konstante Werte an. Sämtliche Parameter sind den einzelnen Baustoffen als Fixwerte zugeordnet und können vom Benutzer nicht geändert werden. Trotz des hohen Einflusses der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften des Asphalts, kann dieser Umstand nicht berücksichtigt werden, was eindeutig zu den Schwachstellen von FAARFIELD zählt. Den mittleren Werten der E-Moduln für die gesamte bituminöse Schichte aus Tabelle 12 (siehe Seite 70), die nach der Österreichischen Methode aus dem tatsächlichen, saisonal schwankenden Temperaturverlauf ermittelt wurden, steht in FAARFIELD je Schicht (AC Deckschicht und AC Tragschicht) nur ein konstanter Wert gegenüber: 1.379 MN/m² für die Deckschicht und 2.758 MN/m² für die Tragschicht. Da die Schichtstärke der obersten Lage vom Programm mit 10,2 cm nach unten beschränkt ist, wurde die Deckschicht anstatt von 4 cm (siehe Abschnitt 5.2.1) mit 11 cm angesetzt. Gewichtet man die genannten Werte

entsprechend der Schichtdicken, so lässt sich am Beispiel AC 35 vergleichsweise ein mittlerer E-Modul von 2.325 MN/m² für die gesamte Asphaltsschicht ermitteln. Verfährt man analog mit den Werten für AC 35 nach der Österreichischen Methode aus Tabelle 12 (gewichtet mit den Faktoren p_i aus Tabelle 13 auf Seite 70), erhält man einen ganzjährigen Mittelwert des E-Moduls von 5.284 MN/m². Der Vergleich zeigt, dass die E-Moduln nach der Österreichischen Methode (bzw. dem Berechnungsverfahren mit LEAP) im Schnitt in etwa doppelt so hohe Werte annehmen, als bei der Vorgehensweise mittels FAARFIELD. Dass in FAARFIELD nicht auf ein vorhandenes Temperaturprofil eingegangen werden kann, ist eindeutig als Nachteil zu sehen; schließlich können der Standort eines Flughafens und die entsprechenden klimatischen Bedingungen nicht in eine Bemessung mit einbezogen werden.

Neben den Parametern der bituminösen Schichten weicht auch der E-Modul der zementstabilisierten Tragschicht vom Österreichischen Modell ab. Der Wert in FAARFIELD ist mit 3.447 MN/m² fix vorgegeben und steht dem Wert von 5.000 MN/m² (siehe Abschnitt 5.2.1) gegenüber.

Die E-Moduln der Frostschutzschicht werden von FAARFIELD automatisch ermittelt. Das Programm bedient sich dabei eines Verfahrens der *US Army Corps Waterways Experiment Station*, das die Werte in Abhängigkeit der Schichtdicke und der Untergrundtragfähigkeit errechnet. In Tabelle 18 sind die E-Moduln des betrachteten Beispiels den Werten der Österreichischen Methode gegenübergestellt. Die Dicke der FSS wurde bei der Berechnung in FAARFIELD jedoch mit 40 cm anstatt mit 35 cm angesetzt.

Tabelle 18: Gegenüberstellung der E-Moduln der FSS [MN/m²]

Untergrundperiode	1	2	3	4
Zeitraum	16.12. - 15.03.	16.03. - 15.05.	16.05. - 15.06.	16.06. - 15.12.
FAARFIELD	280	161	191	221
Österr. Methode	560	140	200	280

Die Tragfähigkeit des Untergrunds kann in FAARFIELD beliebig gewählt werden, muss jedoch als CBR-Wert definiert sein. Die FAA gibt in ihrer Veröffentlichung [FAA, 2009] einen Zusammenhang an, mit dem der CBR-Wert in einen äquivalenten E-Modul des Untergrunds umgeformt werden kann. Der errechnete E-Modul aus Gleichung (17) trägt jedoch die Einheit [psi] und muss für weitere Berechnungen in [MN/m²] umgeformt werden.

$$E = 1500 \cdot CBR \quad (17)$$

E ... E-Modul des Untergrunds [psi]

CBR ... California Bearing Ratio

Für die Ermittlung der Aggressivitätszahlen wurden, entsprechend dem österreichischen Ansatz, getrennte Berechnungen unter Berücksichtigung der vier Perioden der Untergrundtragfähigkeit durchgeführt. Die gewählten CBR-Werte sowie die äquivalenten E-Moduln in [MN/m²] sind in Tabelle 19 den Werten aus der LEAP-Simulation gegenübergestellt.

Tabelle 19: Gegenüberstellung der E-Moduln des Untergrunds [MN/m²]

Untergrundperiode		1	2	3	4
Zeitraum		16.12. - 15.03.	16.03. - 15.05.	16.05. - 15.06.	16.06. - 15.12.
FAARFIELD	CBR [-]	28	7	10	14
	E-Modul	290	72	103	145
Österr. Methode		280	70	100	140

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Modelle der E-Moduln aufzuzeigen, wurden Vergleichsrechnungen am BLFZ und an der Boeing 777 durchgeführt. Neben den aufgezählten Materialparametern wurde außerdem die Dicke der Frostschuttschicht von 35 auf 40 cm erhöht, analog zu den Ausarbeitungen für den Flughafen Wien. Im Gegensatz zu den bisherigen Berechnungen, sind in diesem Fall nur vier unterschiedliche Strukturen entsprechend der Untergrundperioden zu berücksichtigen, die zwölf Temperaturperioden für die bituminösen Schichten fallen weg. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt Folgendes: Trotz der geringeren E-Moduln der bituminösen sowie der zementstabilisierten Schicht fallen die resultierenden Spannungen bei Anwendung der Werte nach FAARFIELD minimal geringer aus, was eine verstärkte Abnahme der Schädigungen nach sich zieht. Die Schädigung der B 777 reduziert sich auf 62 %, die des BLFZ auf 40 % des Vergleichswerts; das BLFZ reagiert aufgrund seiner hohen Masse somit stärker auf Änderungen der Tragstruktur. Die erhöhte Differenz der Schädigungen führt zu einer Erhöhung des Werts der Aggressivitätszahl um 54 %. Dass trotz der verringerten E-Moduln die Spannungen geringer ausfallen, ist folglich auf zwei Eigenschaften zurückzuführen: die minimal erhöhte Untergrundtragfähigkeit (siehe Tabelle 19 auf Seite 80) und die um 5 cm verstärkte FSS. Wie eine Studie der FAA [Garg et al., 2004] bestätigt, hat eine Variation des E-Moduls der Deckschicht die geringsten Auswirkungen. Die Dicke der Tragschichten übt hingegen, neben der Flugzeugmasse, den größten Einfluss auf die Lebensdauer flexibler (und somit halbstarre) Aufbauten aus.

5.4.2 Schadensmodell

Im Gegensatz zur Österreichischen Methode, bei der die Materialermüdung an der Unterseite der zementstabilisierten Tragschichte als maßgebend betrachtet wird, beruht das Programm FAARFIELD für flexible Oberbauten auf zwei verschiedenen Ermüdungskriterien. Ein Kriterium berücksichtigt die maximalen horizontalen Dehnungen an der Unterseite der bituminösen Tragschichte und schließt daraus auf Materialermüdung nach wiederholter Beanspruchung. Es ist in Gleichung (18) angegeben. [Garg et al., 2004]

$$\log(N_{zul}) = 2,68 - 5 \cdot \log(\varepsilon_H) - 2,665 \cdot \log(E_A) \quad (18)$$

N_{zul}	...	zulässige Anzahl an Lastwechseln
ε_H	...	maximale horizontale Verzerrung an der Unterseite der bituminösen Tragschicht
E_A	...	E-Modul der bituminösen Schicht [psi]

Das zweite Kriterium bezieht sich auf den Untergrund. Anhand der dort im oberen Bereich auftretenden maximalen vertikalen Verformungen kann auf ein Versagen am Unterbauplanum geschlossen werden. Das Kriterium wird durch Gleichung (19) und Gleichung (20) definiert. [Garg et al., 2004]

$$N_{zul} = \left(\frac{0,004}{\varepsilon_v} \right)^{8,1} \quad \text{wenn } N_{zul} \leq 12.100 \quad (19)$$

bzw.

$$N_{zul} = \left(\frac{0,002428}{\varepsilon_v} \right)^{14,21} \quad \text{wenn } N_{zul} > 12.100 \quad (20)$$

N_{zul}	...	zulässige Anzahl an Lastwechseln
ε_v	...	maximale vertikale Verzerrung am Unterbauplanum

Eine durchgeführte Vergleichsrechnung, erneut am Beispiel des Bemessungsluftfahrzeugs und der Boeing 777, zeigt einige Besonderheiten dieses Schadensmodells auf. Als Grundlage wurden wiederum die Parameter aus FAARFIELD für einen Aufbau mit AC 35 übernommen, wie in Abschnitt 5.4.1 beschrieben. Zunächst verdeutlicht die Berechnung, dass fast in jedem Fall das Versagen am Unterbauplanum maßgebend ist, wobei meistens Gleichung (20) zu tragen kommt. Lediglich in der Winterperiode ist unter manchen Radlasten die bituminöse Schichte für das Versagen maßgebend, da der Untergrund einen ausreichend hohen Widerstand aufweist. Die errechnete Schädigungsrate des BLFZ liegt in etwa eine

Zehnerpotenz über jener, die sich aus dem Ermüdungskriterium an der ST-Z ergibt; die der Boeing 777 unterschreitet hingegen den Vergleichswert um etwa vier Zehnerpotenzen. Diese enorme Abweichung ist auf folgenden Sachverhalt zurückzuführen: Das Versagen des Oberbaus tritt diesen Kriterien zufolge fast ausschließlich am Unterbauplanum auf. Durch sein überproportionales, (und auch unrealistisch) hohes Gewicht erreicht das BLFZ, auf Basis des Airbus A380, eine wesentlich stärkere Tiefenwirkung als die Boeing 777. Daraus erklärt sich die große Differenz der Schädigungsraten der beiden Flugzeugmuster (und somit die stark verkleinerte Aggressivitätszahl) im Vergleich zum Ermüdungskriterium an der Unterseite der zementstabilisierten Tragschichte, die im Oberbau wesentlich höher liegt als das UP (siehe Abbildung 18 auf Seite 72). Eine genaue Betrachtung der, für die Gleichungen (18) bis (20) nötigen, Verzerrungen an der Unterseite der bituminösen Tragschichte bzw. am UP bestätigt diese Überlegung. Während bei der oberen Ebene die Auswirkungen infolge BLFZ und Boeing 777 in etwa ausgeglichen sind (zum Teil sogar die Konfiguration der B777 minimal höhere Verzerrungen bewirkt), sind in der Ebene des UP die Verzerrungen infolge des BLFZ um etwa eine Zehnerpotenz größer.

5.5 Gegenüberstellung

Um einen Vergleich der Aggressivitätszahlen mit denen des Flughafen Wiens (berechnet mittels FAARFIELD) zu ermöglichen, wurden mit Hilfe linearer Interpolation der Werte aus Tabelle 17 (siehe Seite 76) Werte für AC 38 ermittelt. Das Diagramm in Abbildung 20 zeigt eine Gegenüberstellung anschaulich in umgekehrt logarithmischer Darstellung. Die roten Balken stellen die interpolierten Aggressivitätszahlen nach hier beschriebener Bestimmungsmethode dar, die grünen Balken die mittels FAARFIELD berechneten Werte aus [Blab et al., 2011].

Der Vergleich der jeweiligen Ergebnisse zeigt unterschiedlich hohe Abweichungen, wobei die Werte nach FAARFIELD meist wesentlich geringer ausfallen. Die Beschreibung der Unterschiede in den Berechnungsmodellen in Abschnitt 5.4 verdeutlicht, dass bereits kleine Änderungen der maßgebenden Beanspruchungen zu sehr großen Abweichungen der Schädigungen und damit der Aggressivitätszahlen führen. Die Kombination aus Gewicht und Radanordnung und somit die Tiefenwirkung eines LFZ hat bei der Berechnung mittels FAARFIELD einen wesentlich stärkeren Einfluss als bei der Österreichischen Methode, weshalb bei leichten Flugzeugen (vor allem Bombardier Q400) die Abweichungen am größten sind. Bei manchen Flugzeugtypen relativieren sich die Unterschiede aus den Materialparametern und dem Ermüdungsmodell hingegen, sodass die Werte jenen aus Abschnitt 5.3 sehr nahe kommen.

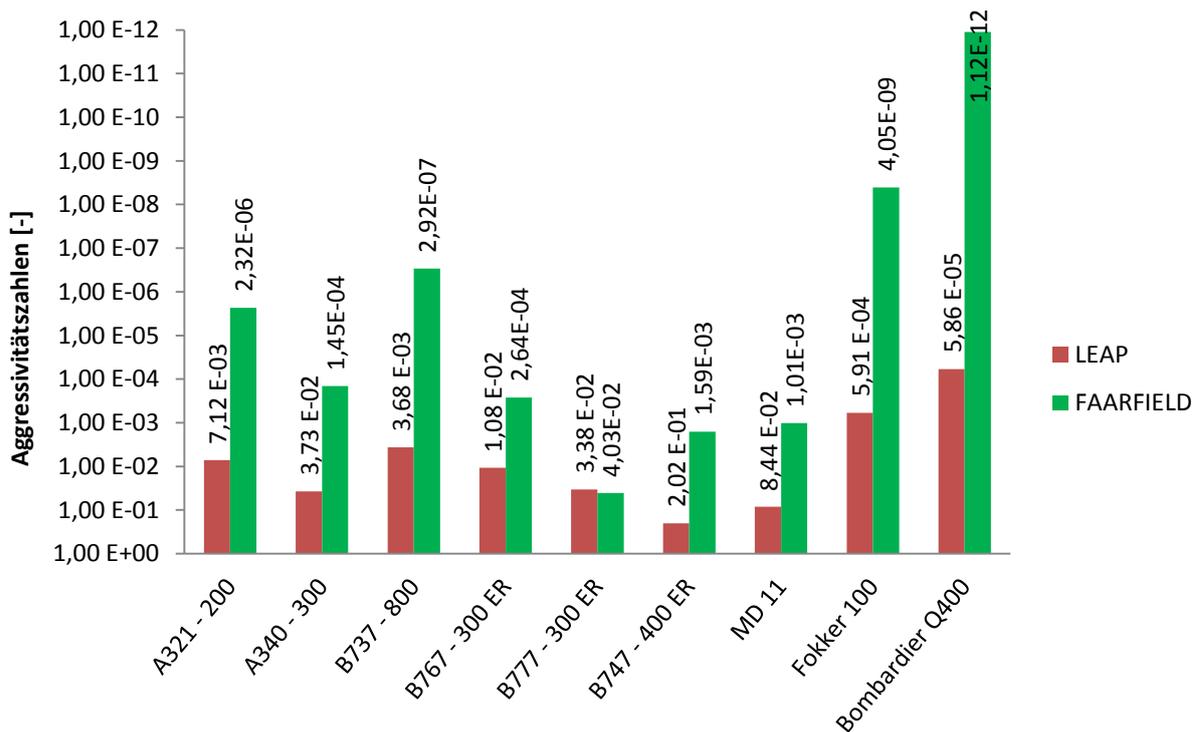


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Aggressivitätszahlen der maßgebenden Flugzeugflotte für halbstarre Aufbauten mit AC 38

5.6 Bemessungsbeispiel

Wie bereits in Abschnitt 4.1 ausführlich beschrieben, sind für die Oberbaubemessung neben den Aggressivitätszahlen als Äquivalenzfaktoren, vor allem auch die prognostizierten Flugbewegungen für den Bemessungszeitraum erforderlich. Die für das Beispiel zugrunde liegenden Daten stammen aus einer Prognose des Flughafen Wiens für das Jahr 2010. Die in Tabelle 20 aufgelisteten Zahlen beziehen sich dabei auf Klassen der Richtlinie Nr. 24, Blatt 5 des Österreichischen Arbeitsrings für Lärmbekämpfung (ÖAL). Für jede ÖAL-Klasse wurde ein maßgebender Flugzeugtyp ausgewählt, dessen Konfiguration in die Bemessung einfließt [Blab et al., 2011]. Entsprechend zuvor genannter Erläuterungen werden bei den gesamten Flugbewegungen nur die Starts berücksichtigt.

Tabelle 20: Geplante Anzahl an Starts der bemessungsrelevanten Flugzeugflotte im Jahr 2010 [Blab et al., 2011]

ÖAL - Klasse	Flugzeugtyp	Starts 2010 Piste 11R/29L
P 2.1 + P 2.2	Bombardier Q400	10.221
S 1.2	B 737 - 800	8.437
S 5.1	Fokker F100	14.058
S 5.2 + S 5.3	A321 - 200	21.219
S 6.1	B767 - 300 ER	1.595
S 6.1	B777 - 300 ER	692
S 6.2	MD 11	14
S 6.3	A340 - 300	81
S 7	B747 - 400 ER	612
Gesamt		56.929

Die gesuchte Bemessungsverkehrsbelastung $N_{\text{BLFZ,eff}}$ errechnet sich schließlich unter Berücksichtigung der jährlichen Starts der bemessungsrelevanten Luftfahrzeuge aus Tabelle 20 sowie der Aggressivitätszahlen aus Tabelle 17 (siehe Seite 76), unter Anwendung von Gleichung (3) (siehe Seite 38). Als prognostizierte jährliche Zuwachsrate an Starts wird ein Wert von 3 % angenommen. Die Bemessung erfolgt beispielhaft für eine Periode von 20 Jahren.

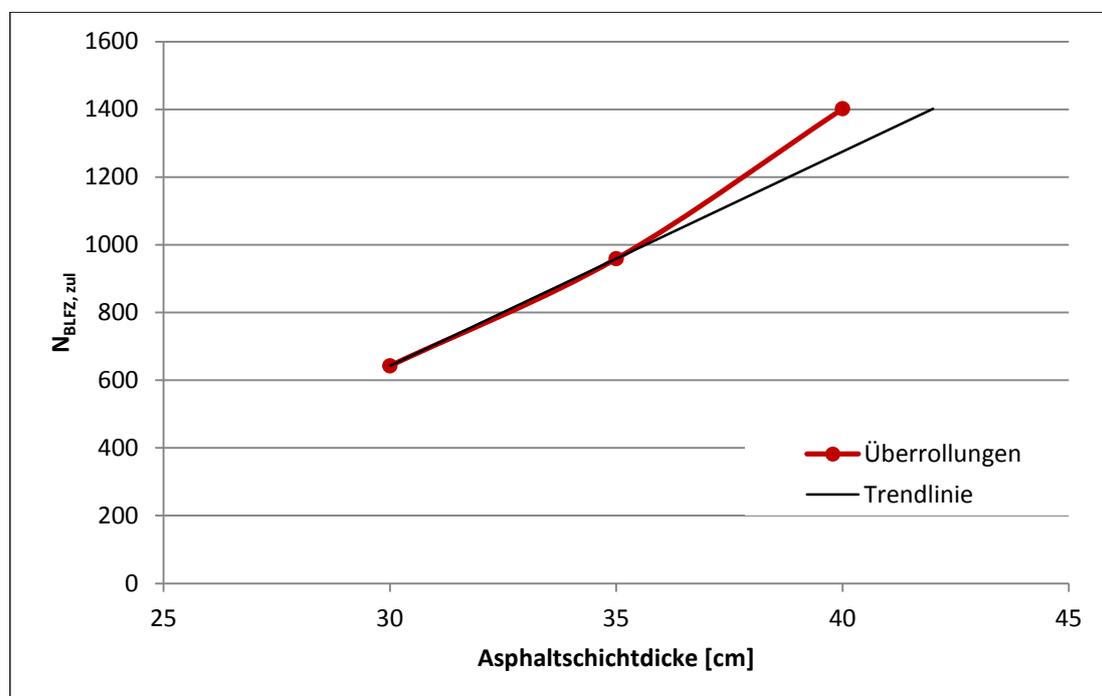


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Asphaltschichtdicke und zulässigen Überrollungen des BLFZ

Die maximal zulässigen Überrollungen durch das Bemessungsluftfahrzeug $N_{\text{BLFZ,zul}}$, welche die Widerstandsseite des Bemessungskonzepts darstellen, werden aus der Ermüdungsberechnung für das BLFZ als Kehrwert der Schädigung gewonnen. Für das

Beispiel AC 35 ist die gesamte tabellarische Berechnung in Tabelle 15 (siehe Seite 75) zusammengefasst. Das Diagramm in Abbildung 21 zeigt die Werte $N_{\text{BLFZ,zul}}$ für alle drei untersuchten Aufbauvarianten. Am Vergleich mit der linearen Trendlinie ist der überproportionale Anstieg der zulässigen Überrollungen mit zunehmender Asphaltsschichtdicke ersichtlich.

Die Bemessung erfolgt schließlich nach Gleichung (5) auf Seite 40 durch Gegenüberstellen der Einwirkungs- und der Widerstandsseite. Die Einwirkungsseite wird durch die Bemessungsverkehrsbelastung $N_{\text{BLFZ,erf}}$, die erforderliche Anzahl an Überrollungen durch das Bemessungsluftfahrzeug, in direkter Proportionalität mit den Aggressivitätszahlen gebildet. Da diese bei der Vorgehensweise mit LEAP viel höhere Werte einnehmen, ergibt sich bei gleichem Bemessungszeitraum eine wesentlich stärkere Verkehrsbelastung, als beim Projekt des Flughafens Wiens. Die Widerstandsseite wird durch $N_{\text{BLFZ,zul}}$ gebildet. Durch die vergleichsweise höhere Schädigung des BLFZ bei der Berechnung mit LEAP fällt die zulässige Anzahl an Überrollungen geringer aus, was sich wiederum nachteilig auf die Bemessung auswirkt. Der mittels LEAP (und linearer Interpolation) berechnete Wert für AC 38 von $N_{\text{BLFZ,zul}} = 1.225$ steht dabei beispielsweise einem Wert von $N_{\text{BLFZ,zul}} = 2.635$ aus FAARFIELD [Blab et al., 2011] gegenüber.

In Summe führen diese beiden Einflüsse dazu, dass die Bemessungsgleichung bei der Vorgehensweise mit LEAP für die untersuchten Schichtdicken der bituminösen Schichte von 30, 35 und 40 cm nicht erfüllt werden kann. Eine Zusammenstellung der zugehörigen Werte ist in Tabelle 21 angeführt.

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Bemessungswerte für verschiedene Schichtdicken

	$N_{\text{BLFZ,erf}}$		$N_{\text{BLFZ,zul}}$
AC 30	12.406	>	642
AC 35	10.548	>	959
AC 40	9.080	>	1.402

Die Bemessung unter Anwendung von FAARFIELD nach [Blab et al., 2011] liefert hingegen ein Ergebnis bei AC 38. Schon unter Berücksichtigung der oben genannten, ungünstigen Abweichungen der Werte aus der Berechnung mit LEAP sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite wird sichtbar, dass eine positive Bemessung hier nicht möglich ist, zumal AC 38 bereits knapp an der oberen Grenze der untersuchten Schichtdicken liegt. Dass die Bemessung aus Tabelle 21 nicht ganz der Realität entsprechen

kann, zeigt alleine schon die Erfahrung, die gezeigt hat, dass Aufbauten dieser Größenordnung sehr wohl über längere Bemessungsperioden standhalten.

Grundsätzlich ist die Verwendung von LEAP zu überdenken, das oft widersprüchliche Ergebnisse liefert und vor allem nicht sehr zuverlässig ist. Einen großen Einfluss auf das Bemessungsergebnis hat weiters das Ermüdungskriterium: Bei FAARFIELD werden die tiefer gelegenen Schichten für das Versagen als maßgebend erachtet, womit die Aggressivitätszahlen aufgrund der stärkeren Tiefenwirkung des BLFZ wesentlich geringer ausfallen. Beim Versagensmodell an der ST-Z ist dieser Einfluss hingegen weniger ausgeprägt, was in den größeren Aggressivitätszahlen resultiert, die die Einwirkungsseite so stark erhöhen.

6 AGGRESSIVITÄTSZAHLEN FÜR STARRE AUFBAUTEN

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Aggressivitätszahlen für starre Aufbauten aufgezeigt. Die Berechnungen werden nur demonstrativ und zu Vergleichszwecken am Beispiel des BLFZ und der Boeing 777 durchgeführt. Die restlichen Aggressivitätszahlen der relevanten Flotte werden aus einer anderen, am selben Institut durchgeführten, Arbeit entnommen und im Vergleich mit den Werten für den Flughafen Wien dargestellt.

6.1 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Aggressivitätszahlen starrer Aufbauten stimmt grundsätzlich mit jener für halbstarre Aufbauten überein. Das betrifft vor allem die Bestimmungsgleichung (13) auf Seite 63. Grundlegende Unterschiede gibt es nur bei der Berechnung der maßgebenden Beanspruchungen sowie beim Ermüdungskriterium, welche in den Abschnitten 4.5.2 und 4.5.3 beschrieben sind. Aufgrund fehlender Temperaturempfindlichkeit der Parameter des Betons müssen darüber hinaus anstatt 12 nur 4 Temperaturperioden entsprechend der Untergrundtragfähigkeitsperioden unterschieden werden.

6.2 Eingangsparmeter

Die Parameter der folgenden Abschnitte beziehen sich ausschließlich auf die Anforderungen und Gegebenheiten des Flughafen Wiens und wurden der vorliegenden Literatur [Blab et al., 2011] entnommen.

6.2.1 Materialkennwerte

Untergrund

Der anstehende Untergrund unterscheidet sich in keinsten Weiße von jenem für halbstarre Aufbauten. Sämtliche Parameter werden unverändert aus Abschnitt 5.2.1 übernommen.

Frostschuttschicht

Die Frostschuttschicht wird bei starren und halbstarren aufbauten identisch ausgeführt. Es gelten dieselben Parameter wie in Abschnitt 5.2.1.

Zementstabilisierte Tragschicht

Es gelten dieselben Anforderungen, wie für halbstarre Aufbauten. Die Parameter aus Abschnitt 5.2.1 können übernommen werden.

Betondecke

Im Gegensatz zu bituminösen Oberbauten, verfügt der Baustoff Beton über einen konstanten, temperaturunabhängigen E-Modul. Dieser kann als Rechenwert mit $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$ angenommen werden. Als weitere Parameter fließen die Querdehnzahl mit $\mu = 0,15$, der thermische Ausdehnungskoeffizient mit $\alpha = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ sowie die Biegezugfestigkeit mit $f_{ct} = 5,5 \text{ N/mm}^2$ in die Berechnung ein [Eisenmann, 1979]. Da Beton aufgrund seiner hohen Steifigkeit und mangelnder Relaxationseigenschaften temperaturbedingten Verformungen (insbesondere auch Verkrümmungen) unterliegt, müssen die daraus zusätzlich auftretenden Spannungen berücksichtigt werden. Es gilt die Annäherung nach EISENMANN aus Abschnitt 4.5.2.

6.2.2 Schichtenaufbau

Die Dicke der Betondecke wird zum Zwecke des Vergleichs der Aggressivitätszahlen mit 40 cm gewählt. Die zementstabilisierte Tragschicht wird mit 20 cm, die Frostschuttschicht mit 35 cm angesetzt. Der Untergrund wird als Halbraum mit saisonal schwankendem, gleichmäßig verteiltem E-Modul angenommen. Die Berechnung mit Hilfe der FEM-Software wird für ein äquivalentes System, bestehend aus drei Schichten, durchgeführt. Die Frostschuttschicht wird dabei mit dem Untergrund zusammengefasst. Für diesen äquivalenten Halbraum werden, entsprechend der untersuchten Untergrundperiode, charakteristische Bettungsmoduln definiert und an der Unterseite der zementstabilisierten Tragschicht angesetzt. Diese werden analog zu den CBR-Werten gewählt, die bei der Ermittlung der PCN-Werte für starre Oberbauten gefordert werden [Blab et al., 2011]. Die gewählten Bettungsmoduln sowie die prozentuellen Anteile der Perioden am Kalenderjahr sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Bettungsmodul k und deren Anteile über den Jahresverlauf zur Berücksichtigung unterschiedlicher Untergrundtragfähigkeiten [geändert nach Blab et al., 2011]

Periode	Elastizitätsmodul E [N/mm ²]	CBR-Wert [%]	Bettungsmodul k [N/mm ³]	Jahresanteil [%]
Winterperiode	280	28	0,086	24
Frühjahrsperiode	70	7	0,026	17
Übergangsperiode	100	10	0,035	9
Sommer-/Herbstperiode	140	14	0,050	50

Der gewählte Schichtenaufbau sowie sämtliche relevante Parameter sind in Abbildung 22 zusammengefasst.

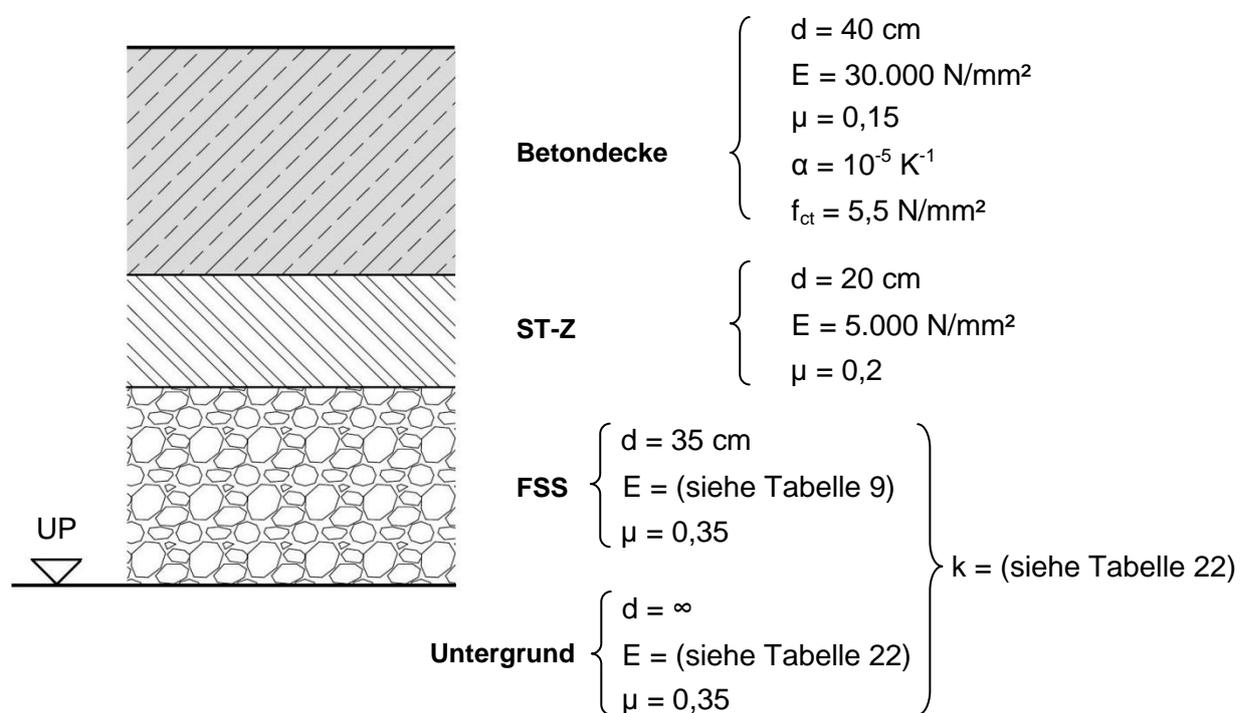


Abbildung 22: Schichtenaufbau und Parameter der untersuchten starren Oberbauvariante

6.2.3 Belastungsdaten der Flugzeugflotte

Die Belastungsdaten der bemessungsrelevanten Flugzeugflotte können unverändert aus Abschnitt 5.2.3, insbesondere aus Tabelle 14 (siehe Seite 73), übernommen werden. Die Berechnungssoftware ISLAB 2000 erfordert jedoch im Gegensatz zu LEAP keine Eingabe der Radien kreisförmiger Toplasten, sondern lediglich des Reifeninnendruckes. In Kombination mit den Einzellasten werden daraus automatisch äquivalente Rechtecklasten ermittelt.

Der Abstand der Fugen des starren Oberbaus wird mit 6 m in beiden Richtungen gewählt, was quadratische Plattenelemente zur Folge hat. Da die relative Positionierung eines Flugzeugfahrwerks zum Fugengraster erheblichen Einfluss auf die maximalen Spannungen hat, muss die maßgebende Laststellung durch Auswerten verschiedener Anordnungen ermittelt werden. Die maßgebende Lage des Hauptfahrwerks des Bemessungsluftfahrzeugs ist in Abbildung 23 dargestellt. An diesem Screenshot des Programms ISLAB 2000 ist außerdem die FE-Netzstruktur erkennbar. Das Netz wurde in den außen liegenden Platten gröber gewählt, um die erforderliche Rechenkapazität gering zu halten.

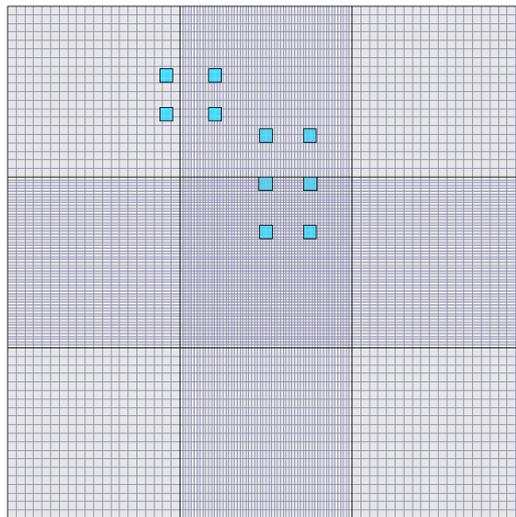


Abbildung 23: Maßgebende Laststellung des BLFZ für die Spannungsermittlung [ISLAB 2000]

6.3 Berechnungsergebnisse

Die Aggressivitätszahlen werden nach Gleichung (13) (siehe Seite 63) aus den Schädigungsraten der einzelnen Flugzeugtypen und des Bemessungsluftfahrzeugs ermittelt. Die Berechnung der Verkehrslastspannungen erfolgt mit ISLAB 2000 für jeweils vier Untergrundperioden, die weiteren Berechnungen werden in MS EXCEL durchgeführt. Abbildung 24 stellt die Verteilung der horizontalen Biegezugspannungen in y-Richtung (quer zur Fahrtrichtung) an der Unterseite der Betondecke graphisch dar. Das Beispiel zeigt das BLFZ in der Frühjahrstauperiode ($k = 0,026 \text{ N/mm}^3$) und dem Lastfall „Plattenrand“ (siehe Abbildung 23), welcher der maßgebenden Laststellung entspricht. Um eine graphische Ergebnisausgabe in ISALB 2000 zu ermöglichen, muss die Maschenweite des FE-Netzes maßgeblich vergrößert werden, was zu abgeänderten Ergebnissen führt. Aus diesem Grund wird auf die Darstellung einer Legende verzichtet, es soll lediglich die qualitative Spannungsverteilung gezeigt werden. Die maximale Spannung tritt an der linken rot gefärbten Stelle auf und beträgt $4,12 \text{ N/mm}^2$.

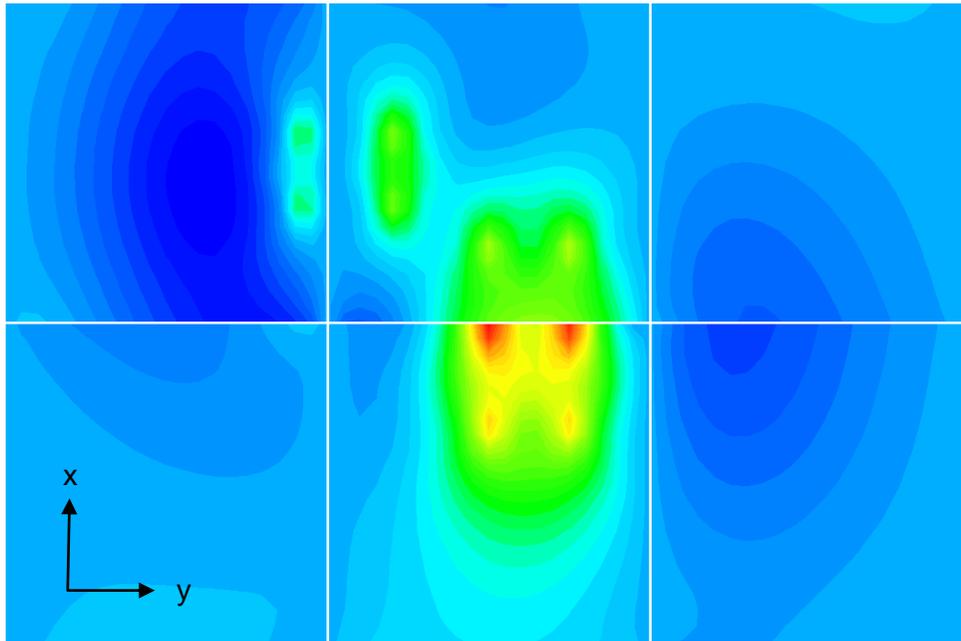


Abbildung 24: Qualitative Darstellung der Biegezugspannungen des BLFZ in y-Richtung für den Lastfall Plattenrand

Tabelle 23 zeigt die Ermittlung der Gesamtschädigung am Beispiel des BLFZ. Die Bettungsmoduln stammen dabei aus Tabelle 22, die Verkehrslastspannungen aus der zugehörigen Berechnung mit ISLAB 2000 für die Laststellung des HFW am Plattenrand. Die Wölbspannungen werden für die vorliegenden Plattenabmessungen von 6 m, entsprechend dem Ansatz nach EISENMANN (siehe Tabelle 6 auf Seite 58), als *reduzierte Spannungen* bestimmt. Die Berechnung von N_{zul} erfolgt unter Anwendung von Gleichung (10) (siehe Seite 59). Dass die Wölbspannungen auf Basis des als Maximalwert angenommenen Temperaturgradienten von $\Delta t = 0,09 \text{ K/mm}$ nur zu einem geringen Anteil von etwa 10 % des Jahres auftreten, muss berücksichtigt werden. Hierfür wird N_{zul} zweimal berechnet: Einmal wird die (Unter-)Spannung σ_w in Gleichung (10) entsprechend dem Wert der Wölbspannung aus Tabelle 23 angesetzt, einmal mit dem Wert 0. Die Gewichtung in Bezug auf den Jahresanteil der Wölbspannungen („nach Temp.“, aufgrund deren temperaturbedingten Ursprungs) erfolgt schließlich durch Umformen von Gleichung (11) (siehe Seite 60). Im nächsten Schritt werden die daraus erhaltenen Werte nach der Dauer der Untergrundperioden gewichtet; die zugehörigen Jahresanteile werden Tabelle 22 entnommen. Durch Summation und anschließende Division durch drei ergibt sich die zulässige Anzahl an Überrollungen durch das BLFZ $N_{BLFZ,zul}$. Das Teilen durch drei rührt daher, dass das Hauptfahrwerk des Airbus A 380 in der maßgebenden Achse aus drei Rädern besteht. Diese Vorgehensweise liegt auf der sicheren Seite, schließlich wurde mit den Maximalwerten der Spannungen gerechnet. Die mittlere Schädigung pro Überrollung des BLFZ ergibt sich abschließend als Kehrwert von $N_{BLFZ,zul}$.

Tabelle 23: Ermüdungsberechnung für das BLFZ für starre Aufbauten mit einer Betondeckendicke von 40 cm

Bettungs- modul	Verkehrslast- spannungen	Wölb- spannungen	N_{zul} ohne Wölbsp.	N_{zul} mit Wölbsp.	N_{zul} gewichtet nach Temp.	N_{zul} gewichtet nach Perioden
[N/mm ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,026	4,12	0,99	5,45 E+02	4,44 E-01	4,40 E+00	2,59 E+01
0,035	3,82	0,99	3,23 E+03	4,40 E+00	4,35 E+01	4,83 E+02
0,050	3,46	0,99	2,69 E+04	6,76 E+01	6,61 E+02	1,32 E+03
0,086	2,95	0,99	5,69 E+05	3,45 E+03	3,27 E+04	1,36 E+05

Zulässige Überrollungen BLFZ $N_{BLFZ,zul}$ (3 Radübergänge)	46.039
Mittlere Schädigung pro BLFZ	2,17 E-05

Das Diagramm in Abbildung 25 zeigt sämtliche Aggressivitätszahlen der bemessungsrelevanten Flugzeugflotte in negativ logarithmischer Darstellung. Die roten Balken stellen die Werte nach hier beschriebener Bestimmungsmethode dar, die im Rahmen einer interdisziplinären Seminararbeit an der TU Wien ermittelt wurden [Müller, 2014]. Die grünen Balken beschreiben die Werte aus dem Projekt für den Flughafen Wien, welche mit Hilfe der Software FAARFIELD bestimmt wurden [Blab et al., 2011]. Die Unterschiede der beiden Berechnungsmethoden, die zu den abweichenden Ergebnissen führen, werden im nächsten Abschnitt erläutert.

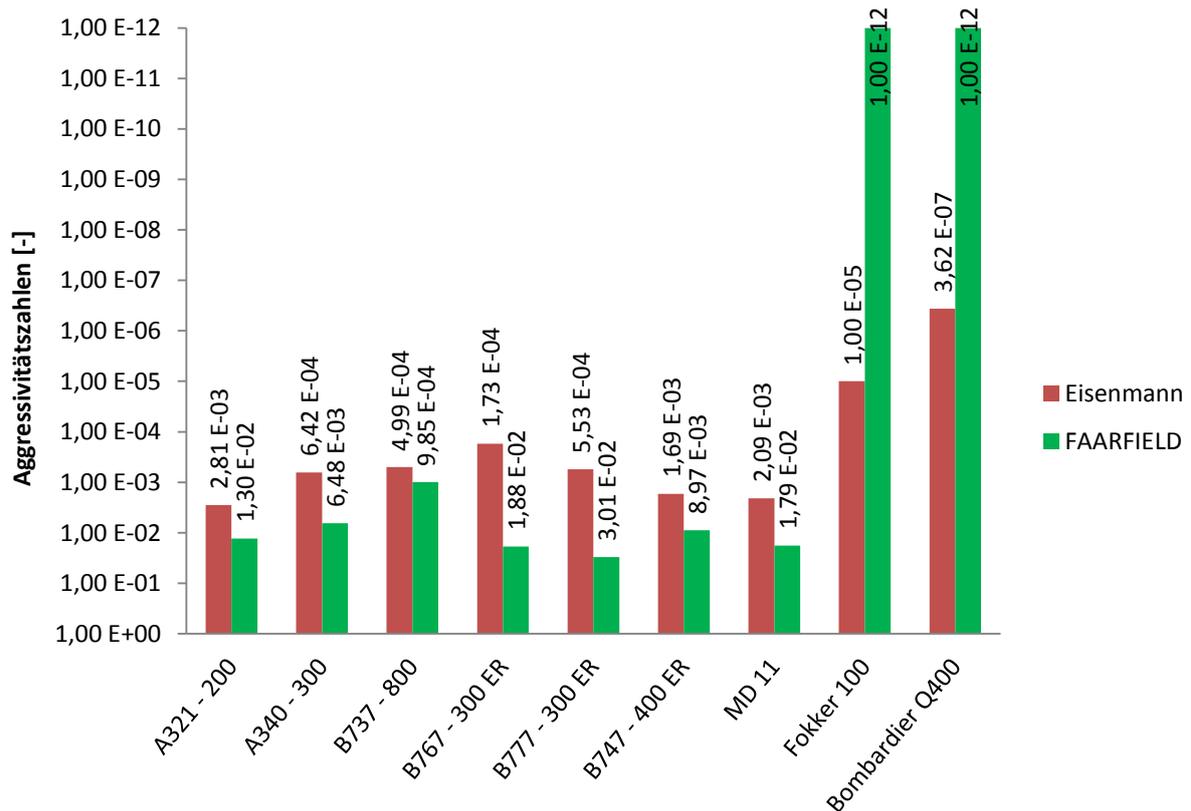


Abbildung 25: Gegenüberstellung der Aggressivitätszahlen der maßgebenden Flugzeugflotte für starre Aufbauten mit einer Betondeckendicke von 40 cm

6.4 Unterschiede zur Berechnung mit FAARFIELD

Die Anwendung des Programms FAARFIELD bringt einige Einschränkungen mit sich, da die meisten Parameter fix vorgegeben sind und vom Benutzer nicht geändert werden können. Des Weiteren läuft die Berechnung im Verborgenen ab; Einsicht in die zugrunde liegenden Berechnungsmethoden kann jedoch über diverse Veröffentlichungen der FAA erfolgen. Die Unterschiede der Berechnung mit FAARFIELD gegenüber der zuvor beschriebenen Vorgehensweise nach EISENMANN betreffen in erster Linie die gewählten Materialparameter, das Schadensmodell sowie die Plattenanordnung.

6.4.1 Elastizitätsmoduln

Die E-Moduln der Baustoffe sind in FAARFIELD fest definiert und können nicht geändert werden. Bei der Betondecke steht dem Wert nach EISENMANN von 30.000 N/mm² ein E-Modul von 27.579 N/mm² gegenüber. Die für die Bemessung erforderliche Zugfestigkeit kann jedoch innerhalb eines vorgegebenen Rahmens frei gewählt und somit mit $f_{ct} = 5,5$ N/mm² definiert werden. Die zementstabilisierte Tragschicht wird mit einem E-Modul von 3.447 N/mm² beschrieben, welcher einem Wert von 5.000 N/mm² gegenüber steht.

Um die Auswirkungen dieser verringerten E-Moduln zu untersuchen, wurden Vergleichsrechnungen am Beispiel des BLFZ sowie der Boeing 777 mittels Spannungsermittlung in ISLAB 2000 und einer Ermüdungsberechnung in EXCEL (analog zu Tabelle 23) durchgeführt. Die Oberbaustruktur wird erneut wie in Abbildung 22 (siehe Seite 89) und mit Plattenabmessungen von 6 m gewählt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass die maßgebenden Biegezugspannungen an der Unterseite der Betonplatte, unter Anwendung der E-Moduln nach FAARFIELD, im Schnitt um 6,7 % erhöht sind. Die geringere Tragfähigkeit macht sich beim BLFZ stärker bemerkbar, wodurch eine höhere Differenz der Spannungen (und folglich der Schädigungen) zwischen BLFZ und Boeing 777 auftritt. Die Folge ist eine verringerte Aggressivitätszahl der Boeing 777, die sich um knapp die Hälfte auf 47 % des Werts reduziert, der mit den E-Moduln nach EISENMANN errechnet wurde. Am Vergleich dieser Prozentwerte wird ersichtlich, wie unverhältnismäßig stark die Schädigungen (bzw. deren Differenz) schon bei geringer Erhöhung der Spannungen anwachsen.

6.4.2 Schadensmodell

Die Schadensmodelle sowohl nach EISENMANN als auch in FAARFIELD berücksichtigen ausschließlich das Entstehen von Rissen an der Unterseite der Betondecke als für die Ermüdung maßgebend. Zu diesem Zweck werden die horizontalen Spannungen in Bezug auf die Biegezugfestigkeit des Betons begrenzt. Das Ermüdungsmodell, welches in FAARFIELD implementiert ist, ist empirischen Ursprungs und stammt aus umfangreichen Auswertungen von Großversuchen an der NAPTF. Die Bestimmungsgleichung ist in Gleichung (21) angeführt [FAARFIELD, 2009].

$$\frac{DF}{F_{CAL}} = \left[\frac{F'_s \cdot b \cdot d}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right) \cdot (d - b) + F'_s \cdot b} \right] \cdot \log N_{zul} + \left[\frac{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right) \cdot (a \cdot d - b \cdot c) + F'_s \cdot b \cdot c}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right) \cdot (d - b) + F'_s \cdot b} \right] \quad (21)$$

mit

$$DF = \frac{f_{ct}}{\sigma}$$

DF	...	Design Factor
F_{CAL}	...	Stress Calibration Factor (=1,13)
F'_s	...	Korrekturfaktor für hochstandfeste Tragschichten
SCI	...	struktureller Zustandsindex
N_{zul}	...	zulässige Anzahl an Lastwechseln

a	...	Parameter (0,5878)
b	...	Parameter (0,2523)
c	...	Parameter (0,7409)
d	...	Parameter (0,2465)
f_{ct}	...	Biegezugfestigkeit des Betons [N/mm ²]
σ	...	maßgebende Zugspannung [N/mm ²]

Durch Umformen von Gleichung (21) kann die zulässige Anzahl an Lastwechseln N_{zul} ermittelt werden. Der Korrekturfaktor F_s' berücksichtigt dabei die positiven Auswirkungen hochstandfester Tragschichten. Ist die zementstabilisierte Tragschicht dicker als 10 cm (Mindestwert) kann F_s' reduziert werden, was eine Erhöhung der zulässigen Lastwechseln zur Folge hat. Im Rahmen der hier durchgeführten Vergleichsrechnungen wird der Faktor konservativ mit dem Wert 1 festgelegt. Die Berücksichtigung der ST-Z erfolgt bereits bei der Spannungsberechnung; der Einfluss des Korrekturfaktors ist sehr gering. Der strukturelle Zustandsindex SCI charakterisiert den Zustand eines Oberbaus bezüglich seiner Tragfähigkeit: Ein Wert von 100 beschreibt einen einwandfreien Zustand und 0 ein komplettes Versagen. FAARFIELD definiert das Versagen eines Oberbaus mit dem Erreichen des SCI von 80.

Die Spannungen für die folgende Vergleichsrechnung stammen aus der Simulation mit ISLAB 2000 auf Basis der Eingangsparameter aus Abschnitt 6.2. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse des BLFZ und der B777 bei Berechnung nach dem Ermüdungskriterium der FAA zeigt folgende Besonderheiten auf: Die Schädigungen erhöhen sich im Vergleich zum Verfahren nach EISENMANN durchschnittlich um den Faktor 4, wobei die Auswirkungen beim BLFZ stärker sind. Aufgrund der vergrößerten Differenz ergibt sich eine geringere Aggressivitätszahl, die mit 83 % des Werts nach EISENMANN diesem jedoch sehr nahe kommt.

6.4.3 Plattenanordnung

FAARFIELD bietet den Nachteil, dass die Plattenanordnung nicht variiert werden kann. Das Programm fixiert die Abmessungen automatisch und lässt dem Nutzer keinen Zugriff. Weiters kann die Verdübelung benachbarter Platten nur unzureichend berücksichtigt werden. Es wird dabei so vorgegangen, dass die Fahrwerkslasten am freien Plattenrand angesetzt und die daraus resultierenden maximalen Spannungen berechnet werden. Um die Lastübertragung auf benachbarte Platten durch Dübel oder profilierte Fugen zu berücksichtigen, werden die Spannungen vor der Ermüdungsberechnung um 25 % reduziert. Um einen Vergleich dieser Rahmenbedingungen mit den, in Abschnitt 4.5.2, beschriebenen

zu ermöglichen, wird die Struktur in ISLAB 2000 modelliert. Dies ist jedoch nur mit Einschränkungen möglich, da das Programm eine Kraftübertragung an den Fugen größer 0 erfordert; der Anteil wird somit näherungsweise mit 1 % angesetzt. Die Laststellung bleibt unverändert, wie in Abbildung 23 auf Seite 90 dargestellt. Die Gegenüberstellung der erhaltenen Spannungen nach beiden Modellen zeigt Folgendes: Wie erwartet, sind die Spannungen (in y-Richtung – siehe Abbildung 24 auf Seite 91) am freien Plattenrand im Schnitt etwas höher, als beim verdübelten Pendant. Beim BLFZ beträgt die (über die Untergrundperioden gemittelte) Erhöhung 3 %, bei der Boeing 777 7 %. Berücksichtigt man weiters jedoch die oben erläuterte Reduktion der Randspannungen um 25 %, so beträgt die Abweichung -23 % bzw. -20 %. Die Spannungen als Eingangswerte in die Ermüdungsberechnung fallen beim Verfahren der FAA somit wesentlich geringer aus, als bei der Vorgehensweise nach EISENMANN.

6.5 Gegenüberstellung

Ermittelt man die Aggressivitätszahl für die Boeing 777, unter Berücksichtigung sämtlicher in Abschnitt 6.4 beschriebenen Unterschiede, mit den E-Moduln, dem Schadensmodell sowie der Plattenanordnung nach FAARFIELD, kann diese dem Wert nach EISENMANN aus Abbildung 25 (siehe Seite 93) gegenübergestellt werden. Die Abweichung des berechneten Werts beträgt -8 % und fällt somit relativ gering aus. Dies zeigt, dass sich die, in den Abschnitten 6.4.1 bis 6.4.3 aufgezeigten, Abweichungen in Summe relativieren und dass die Modelle aus FAARFIELD und nach EISENMANN miteinander durchaus vergleichbare Ergebnisse liefern.

Betrachtet man jedoch den Wert für die B777 aus Abbildung 25 (siehe Seite 93), der tatsächlich mit FAARFIELD berechnet wurde [Blab et al., 2011], zeigt sich eine Abweichung der Aggressivitätszahl um ca. zwei Zehnerpotenzen. Eine Begründung dieser Differenz lässt sich in folgenden Erklärungen finden: FAARFIELD ist eine Blackbox und gewährt nur wenig Einblick in die tatsächlich ablaufenden Vorgänge. Zum Beispiel kann nicht nachvollzogen werden, wie genau ein Fahrwerk am Plattenrand zur Spannungsermittlung angesetzt wird; ob das Fahrwerk gänzlich am Rand einer einzigen Platte angreift, als wäre es der Fahrbahnrand, oder ob es mehrere Platten belastet (analog zu Abbildung 23 auf Seite 90), die lediglich unverdübelt sind. Auch ob und in welcher Form der Einfluss der Temperatur auf den Beton Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis hat, ist nicht deutlich ersichtlich. Während die Vorgehensweise nach EISENMANN die Entstehung von Wölbspannungen bei ungleichmäßiger Erwärmung von oben berücksichtigt, könnte dieser Einfluss bei FAARFIELD höchstens im Schadensmodell implementiert sein. Zu guter Letzt stellt die

Beschreibung der Untergrundtragfähigkeit (inklusive Frostschutzschichte) mittels Bettungsmoduln bei den Vergleichsrechnungen mit ISLAB 2000 nur eine Näherung dar, die unter Umständen zu abweichenden Spannungen führen kann. Wie in Abschnitt 6.4.2 gezeigt, haben bereits geringe Änderungen der Spannungen sehr großen Einfluss auf die Schädigungen. Vorhandene Differenzen der Schädigungen zwischen einzelnen Flugzeugmustern und dem BLFZ wachsen dabei überproportional an, was in starken Abweichungen der Aggressivitätszahlen resultiert.

7 FUGEN BEI STARREN OBERBAUTEN

Die gewissenhafte und wirtschaftlich nachhaltige Bemessung eines Oberbaus ist von fundamentaler Wichtigkeit, jedoch muss auch der konstruktiven Durchbildung Beachtung geschenkt werden. Erst nach korrekter Bauausführung in Übereinstimmung mit den Planunterlagen, kann die geforderte Gebrauchstauglichkeit über die geplante Bemessungsperiode garantiert werden, wobei auch regelmäßige Wartungsintervalle berücksichtigt werden müssen. Die häufigsten Schadensfälle, die einer Instandsetzung bedürfen, sind nicht auf eine fehlerhafte Bemessung zurückzuführen, sondern entstehen durch eine mangelnde Planung oder Ausführung von Details. Vor allem die Anordnung und Ausbildung von Fugen in starren Oberbauten bedarf einiger Aufmerksamkeit, da diese sehr häufig der Ausgangspunkt von Strukturschäden sind, welche die Lebensdauer herabsetzen und die Kosten für Instandsetzungsmaßnahmen erhöhen. Aus diesem Grund und im Hinblick auf eine ausreichende Dauerhaftigkeit von geplanten Flugbetriebsflächen wird im vorliegenden Kapitel auf die Fugenausbildung sowie deren Anordnung näher eingegangen.

Der Werkstoff Beton verfügt über eine hohe Festigkeit und zeichnet sich durch eine hohe, im Gegensatz zum Asphalt temperaturunabhängige, Steifigkeit aus. Ein Nachteil dieser Eigenschaften ist der damit einhergehende Mangel an Relaxationsfähigkeit, weshalb induzierte Bauteilverzerrungen nicht aufgenommen werden können und folglich zu Zwängungsspannungen führen. Vor allem Schwankungen der Temperatur, sowohl räumlich (zwischen Ober- und Unterseite) als auch zeitlich (täglich und saisonal) und Änderungen im Feuchtegehalt führen zu Volumenänderungen der Betondecke. Da solche Dehnungen und vor allem Stauchungen von einer durchgehenden Betondecke nicht schadlos aufgenommen werden können und zu einer willkürlichen Ausbildung von Rissen führen würden, müssen in regelmäßigen Abständen Fugen angeordnet werden. Durch diesen definierten Raster entsteht eine Gruppe aneinanderliegender Plattenelemente, die nach Möglichkeit immer quadratisch bzw. rechteckig mit ähnlichen Seitenabmessungen sein sollten. Unregelmäßige Plattenformen sollen bei Gelegenheit vermieden werden, was aufgrund von Anschlussstellen oder Einbauten nicht immer möglich ist. Ist eine Abweichung vom rechten Winkel erforderlich, müssen die ansonsten unbewehrten Platten bei Bedarf bewehrt werden, vor allem bei schmalen oder spitz zulaufenden Plattenteilen. Hier besteht aufgrund der Spitzenwirkung eine erhöhte Gefahr von Eckabbrüchen.

wirksam werden kann. Die deutsche *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen*, gibt verschiedene Grenzbereiche für die Schnitttiefe an [ZTV Beton, 2001]: Bei Querscheinfugen muss die Kerbe mindestens 25 % der Deckendicke tief sein, darf jedoch einen Wert von 30 % nicht überschreiten. Längsscheinfugen erfordern dagegen eine tiefere Einkerbung von mindestens 40 bis maximal 45 % der Dicke. Die FAA gibt die Kerbtiefe pauschal mit 25 % der Plattendicke an [FAA, 2009]. Die Empfehlungen für den Flughafen Wien sehen dagegen einen Einschnitt von 33 % der Deckendicke sowohl für Quer- als auch für Längsscheinfugen vor [Blab et al., 2011]. Bei einer festgelegten Plattenstärke von 38 cm ist somit eine Kerbe von 13 cm einzuschneiden.

Scheinfugen sind grundsätzlich mittels Stufenschnitt herzustellen. Die eigentliche Kerbe ist entsprechend der verwendeten Säge in etwa 2,0 – 3,5 mm dick [Blab et al., 2012]. Der obere Bereich der Fuge ist durch erneutes Einschneiden so aufzuweiten, dass ein ausreichend breiter Spalt vorliegt, der ein ordnungsgemäßes Verfüllen zulässt. Die Abmessungen dieser Fugenkammer müssen dabei so abgestimmt sein, dass der Fugenfüllstoff die zu erwartenden maximalen Relativbewegungen der Fugenflanken schadlos aufnehmen kann. Die Breite des erweiterten Fugenspalt ist laut [ZTV Fug, 2001] grundsätzlich mit 20 mm zu beschränken. Als Gründe werden eine erhöhte Lärmemission und die Gefahr der mechanischen Beschädigung der Kanten genannt, wobei der erstgenannte Grund für den Straßenverkehr gilt und bei Flugbetriebsflächen aufgrund der ohnehin dominierenden Triebwerksgeräusche irrelevant ist. In Österreich ist in der Regel eine Spaltbreite von 8 bis 12 mm einzuhalten [Blab et al., 2012]. Da Flugzeuge Räder mit größeren Durchmessern als Straßenfahrzeuge aufweisen, treten Schäden bei weit auseinanderliegenden Fugenkanten weniger leicht auf, weshalb die genannten 12 mm nicht als oberster Grenzwert gesehen werden müssen. Die Tiefe des erweiterten Fugenspalt ist abhängig vom verwendeten Fugenfüllstoff sowie der größten zu erwartenden Änderung der Fugenspaltbreite und kann im Maximalfall bis zu 50 mm betragen [ZTV Fug, 2001]. Die FAA gibt einen Mindestwert von 32 mm ab der Fahrbahnoberkante an. Dabei soll der Fugenfüllstoff jedoch erst ab 6 bis 10 mm unter der OK beginnen, in Übereinstimmung mit der (optionalen) Abschrägung der Fugenkanten von 6 mm [FAA, 2009]. Diese Abfasungen werden in einem Winkel von 45° hergestellt und dienen dazu, einer mechanischen Beschädigung der Kanten vorzubeugen. In Österreich und Deutschland ist eine Breite der Abfasung von 3 mm (+- 1 mm) in der Draufsicht üblich [Blab et al., 2012], wobei dieser Wert in erster Linie für den Straßenverkehr gilt. Im Hinblick auf die erwähnten größeren Radien von Flugzeugrädern ist eher dem von der FAA empfohlenen Wert Vorzug zu geben. Bei sehr großen Fugenspaltbreiten kann bei Anwendung mancher Fugenfüllstoffe unter Umständen von einer Abfasung abgesehen werden [ZTV Fug, 2001].

7.1.2 Pressfugen

Pressfugen sind jene Fugen, die entstehen, wenn an bereits bestehende Betonplatten anbetoniert wird. Sie sind grundsätzlich zu verdübeln (bzw. zu verankern) und mit Fugenfüllstoff abzudichten. Zu diesem Zweck müssen eine Fugenkammer eingeschnitten und die freiliegenden Kanten abgefast werden (siehe Abschnitt 7.1.1). Spezielle Formen der Pressfugen sind die Abschluss- und Anschlussfugen: Abschlussfugen entstehen immer dort, wo zu Beginn einer Tagesschicht am Abschluss der vorigen Tagesleistung anbetoniert wird. Anschlussfugen ergeben sich beim Übergang zwischen einer Betonplatte und einer Asphaltdecke. Beide Varianten sind mit einem erweiterten Fugenspalt zu versehen und dicht zu verschließen. Anschlussfugen können nicht verdübelt werden und müssen somit bei einer Berechnung als freier Plattenrand berücksichtigt werden. Abbildung 27 zeigt den Schnitt durch eine Pressfuge am Beispiel einer Abschlussfuge.

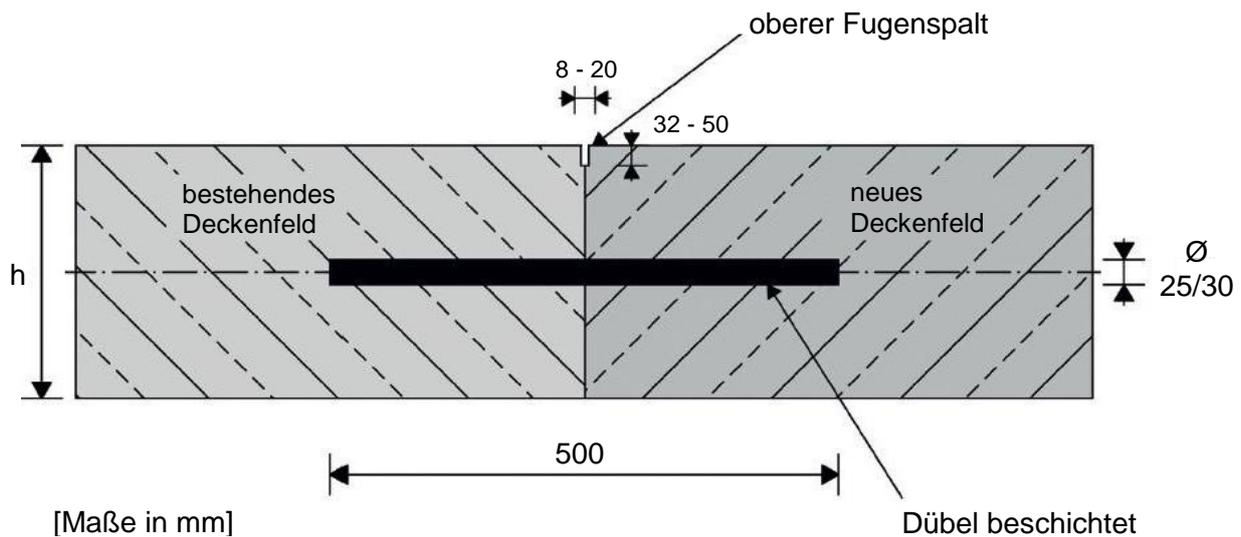


Abbildung 27: Verdübelte Pressfuge ohne Fugenverschluss [geändert nach Blab et al., 2012]

7.1.3 Raufugen

Raufugen trennen die Betonplatten über die gesamte Dicke und ermöglichen eine zwängungsfreie Ausdehnung benachbarter Platten. In erster Linie werden dadurch störende Längsdruckkräfte abgebaut, was beispielsweise Einbauten vor Schäden schützt bzw. deren Lage sichert. Zur Herstellung von Raufugen, wird eine durchgehende Fugeneinlage vor dem Betonieren verlegt und in ihrer Lage gesichert. Sie muss vollständig auf der Unterlage aufliegen und bis knapp unter die Betonoberfläche reichen. An der Oberseite muss nach Fertigstellung der Betondecke ein abgefasteter Fugenspalt eingeschnitten werden, der genau über der Fugeneinlage liegen und mindestens die gleiche Breite aufweisen muss. Die Tiefe

des Spalts muss zumindest bis zur Einlage reichen, ansonsten gelten dieselben Kriterien in Bezug auf die Verfüllung wie bei den Scheinfugen. Die Fugeneinlage muss dauerhaft kompressibel sein, wobei häufig Weichholzbretter oder bituminierte Weichfaserplatten zur Anwendung kommen; die Breite wird mit 20 mm empfohlen [Blab et al., 2012] (bzw. 19 mm nach [FAA, 2009]). Je nach Anwendungszweck werden Raumfugen auch verdübelt bzw. verankert, wobei die Dübel zu beschichten und auf einer Seite mit einer Aufsteckhülse mit integriertem Dehnungsraum von ca. 20 mm zu versehen sind (siehe Abbildung 28). Dadurch wird eine ausreichende Relativbeweglichkeit der Platten ermöglicht. Da eine Verschiebung der Fahrbahnplatten grundsätzlich nicht wünschenswert ist, sollen Raumfugen nur in Sonderfällen angeordnet werden. Dazu zählen vor allem: [Blab et al., 2012]

- Änderungen der Deckenstärke
- Objekte mit Übergangskonstruktionen (z.B. Schlepp-Platten)
- Anschlussbereiche
- enge Radien (unter 400 m)

Trennfugen sind spezielle Varianten der Raumfugen, die den Übergang zu Einbauten oder Randeinfassungen herstellen. Sie sind naturgemäß unverdübelt (bzw. unverankert) und müssen bei der Bemessung folglich als freies Plattenende betrachtet werden. Darüber hinaus kann die Herstellung aufgrund fehlender Dübel durch nachträgliches Einschneiden und Verfüllen erfolgen.

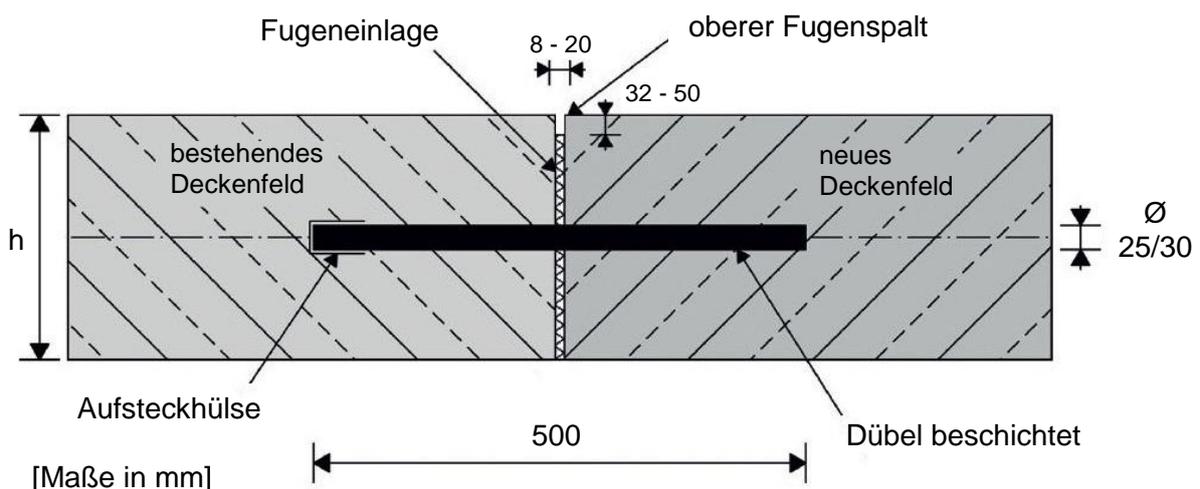


Abbildung 28: Verdübelte Raumfuge ohne Fugenverschluss [geändert nach Blab et al., 2012]

7.2 Fugenverschluss

Unabhängig von der Ausführungsart einer Fuge, ist der obere Fugenspalt nach Herstellung dicht zu verschließen. Einerseits muss das Eindringen von Oberflächenwasser verhindert werden, was an den darunterliegenden Tragschichten zu Schäden führen kann, andererseits dürfen keine Feinstoffe in den Fugenzwischenraum gelangen und diesen verstopfen. Dies würde ein Ausdehnen der Platten verhindern und dadurch die Gebrauchstauglichkeit der Fugen einschränken. Fugenfüllstoffe müssen dauerelastisch sein und einer Versprödung widerstehen, um eine Unterbrechung des Flugbetriebs durch zusätzliche Wartungsarbeiten zu vermeiden. Unabhängig von der Art des verwendeten Fugenfüllstoffs, soll dessen Abstand bis zur Fahrbahnoberkante ausreichend groß sein, sodass ein möglicher Reifenkontakt vermieden wird. Sind die Fugenkanten abgefast, soll die Fugenmasse die untere Kante der Abfasung nicht übersteigen. Wichtig ist, dass der Fugenverguss auch bei hohen Temperaturen und direkter Sonneneinstrahlung nicht überquillt. Die FAA gibt den Abstand zur Oberfläche mit 6 – 10 mm an [FAA, 2009]. Abbildung 29 zeigt den Fugenverguss im Detail, am Beispiel einer Scheinfuge.

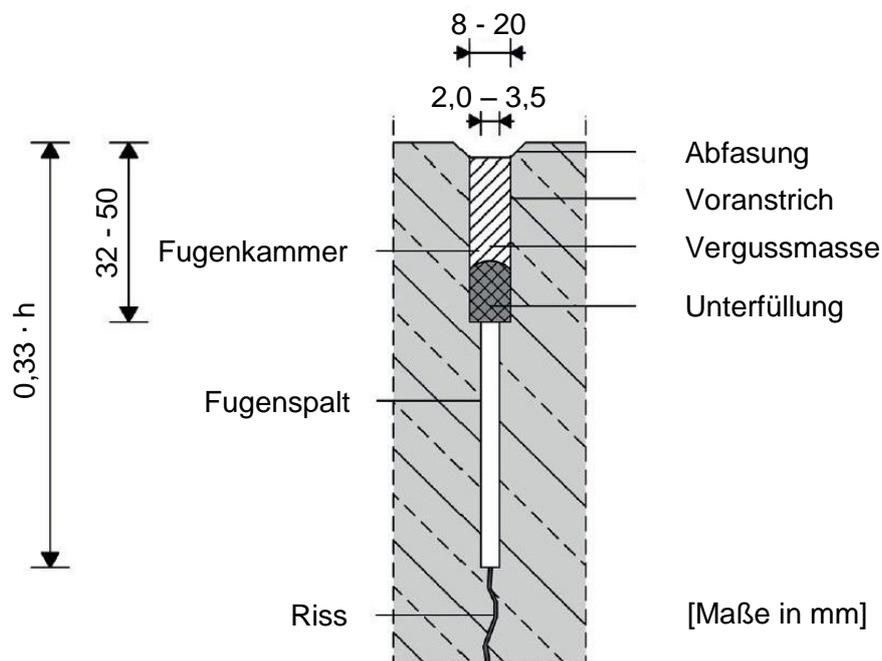


Abbildung 29: Fugenverschluss am Beispiel einer Scheinfuge [geändert nach Blab et al., 2012]

Da die Vergussmasse den Fugenspalt ungleichmäßig ausfüllen würde, ist eine Unterfüllung erforderlich, die aus unverrottbarem und hitzebeständigem (bei Heißverguss) Material bestehen muss. Diese Unterfüllung erfüllt darüber hinaus den Zweck, eine Dreiflächenhaftung der Füllmasse zu unterbinden; die Fugendichtmasse haftet somit nur an den mit Voranstrich bearbeiteten Fugenflanken, nicht aber an der Unterseite. Andernfalls

würde eine Ausdehnung des Fugenspalts die Fugenmasse durch entstehende Keilspannungen von unten einreißen und zerstören. Dies gilt nur für die Fugenabdichtung mittels Fugenmassen, Fugenprofile sind davon ausgenommen. Grundsätzlich sind folgende Arten des Fugenverschlusses üblich:

7.2.1 Heißverguss

Heißvergussmassen sind kunststoffmodifizierte thermoplastische Bitumenvergussmassen, die mit beheizten und temperaturgeregelten Geräten eingebaut werden. Der Einbau erfordert entsprechend saubere und vorbehandelte Fugenflanken und darf erst bei ausreichend geringer Restfeuchtigkeit des Betons erfolgen. Das Verhältnis der Vergusstiefe zur Fugenspaltbreite muss zwischen 1,5 und 2,5 liegen, unter anderem um ein Überquellen bei hohen Temperaturen zu vermeiden [ZTV Fug, 2001]. Die Wahl einer Heißvergussmasse für die Verwendung auf Vorfeldern ist grundsätzlich zu überdenken, da diese eine ausreichende Verkehrsbeanspruchung für dauerhafte Funktionsfähigkeit voraussetzt, was beispielsweise bei Parkpositionen nicht gegeben ist [Merkblatt, 2002].

7.2.2 Kaltverguss

Kaltvergussmassen werden ohne Wärmebehandlung verarbeitet, erfordern dafür jedoch das Einhalten bestimmter Temperaturgrenzwerte und trockene Witterung während des Einbaus. Der Vorteil liegt in der höheren Beständigkeit gegenüber Chemikalien, im Vergleich zu Heißvergussmassen, was gerade auf Flugbetriebsflächen wegen der starken Belastung durch Kerosin und Enteisungsmitteln von Bedeutung ist.

7.2.3 Fugenprofile

Fugenprofile sind komprimierbare elastomere Bauelemente, die maschinell in den Fugenspalt gezwängt werden. Durch den Anpressdruck der dauerhaft elastischen Profile wird eine Abdichtung der Fugen hergestellt. Vor dem Einbringen hat die Fugenkammer lediglich frei von Verunreinigungen zu sein, es ist weder eine Unterfüllung noch ein Voranstrich der Fugenflanken vonnöten. Zudem kann die Montage bei nahezu jeder Witterung erfolgen, lediglich angeeiste Flanken sollen vermieden werden. Laut [Merkblatt, 2002] liegen keine Erfahrungen für die Verwendung von Fugenprofilen auf Start- und Landebahnen sowie auf Rollwegen vor. Da eine ausreichende Sicherheit gegen ein mögliches Herauslösen der Profile aus dem Fugenspalt gewährleistet sein muss, wird eher

von deren Verwendung abgeraten. Auch in [Blab et al., 2011] werden Fugenprofile für die Verwendung auf Flugbetriebsflächen ausgeschlossen.

7.3 Anordnung von Fugen

Bei Fahrbahnen und somit auch bei Pisten und Rollwegen wird zwischen Längs- und Querfugen unterschieden; die Längsfugen verlaufen parallel zur Fahrbahnrichtung, die Querfugen normal dazu. Auf großflächigen Oberbauten wie dem Vorfeld trifft diese Einteilung nicht zu und sämtliche Fugen verhalten sich grundsätzlich wie Querfugen. Der entstehende Raster soll möglichst quadratische Plattenelemente formen, da diese die höchste Tragfähigkeit gewährleisten. Ein Seitenverhältnis von mehr als 1,25 ist bei unbewehrten Betonplatten jedenfalls zu vermeiden. Unabhängig von der Plattendicke, dürfen die Seitenabmessungen keinesfalls 7,5 m übersteigen, da dies zu übermäßig starker Fugendehnung führen und die Funktionsfähigkeit der Fugeneinlagen beeinträchtigen würde [Merkblatt, 2002]. Die FAA gibt maximale Fugenabstände, abhängig von der Plattendicke, für unbewehrte Platten auf einer zementstabilisierten Tragschicht an. Bei einer Dicke von ca. 34 bis 40 cm und bei typischen Geometrien der Pisten und Rollwege wird ein Abstand der Längsfugen von 5,7 m empfohlen. In keinem Fall soll eine Abmessung von 6,1 m überschritten werden [FAA, 2009]. Die Österreichische Methode sieht einen Fugenabstand von 6 m vor [Blab et al., 2011].

Bei der Regelbauweise werden Querfugen stets als Scheinfugen ausgeführt, lediglich beim Tagesabschluss entstehen Pressfugen. Raumfugen sind grundsätzlich zu vermeiden und nur in zuvor genannten Sonderfällen anzuordnen, wie zum Beispiel der Einmündung von Rollbahnen in Pisten. Längsfugen werden als Scheinfugen oder Pressfugen ausgebildet, wobei die Anzahl der Pressfugen durch möglichst große Einbaubreiten gering zu halten ist. Am Vorfeld gelten dieselben Grundsätze wie bei Querfugen. Vor allem bei Parkpositionen am Vorfeld sind diverse Einbauten im Oberbau nötig. Diese reichen von Vorrichtungen zur Abfertigung der Luftfahrzeuge, wie z.B. Anschlüsse an Unterflurbetankungsanlagen, über Entwässerungseinrichtungen bis hin zur Flughafenbeleuchtung. Einerseits stellen solche Einbauten Schwachstellen dar, die vor der temperaturbedingten Ausdehnung der Betonplatten gegen Verschieben bzw. Zerdrücken gesichert werden müssen, andererseits können Einbauten, wie z.B. die Auflager von Lichtmasten, die Bewegung des Oberbaus beeinflussen, da sie wie Festlager wirken. Aus diesen Gründen sind in solchen Fällen Raumfugen anzuordnen.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Für die Bemessung von Flugbetriebsflächen gibt es keine international empfohlene oder vorgeschriebene Methode; lediglich das Resultat, die Tragfähigkeit, muss entsprechend den Vorgaben der ICAO als PCN bekanntgegeben werden. Da bis heute veraltete empirische Verfahren Anwendung finden, wurde im Auftrag des Flughafens Wiens eine Österreichische Methode entwickelt, die auf modernen Ansätzen beruht. Diese baut auf dem amerikanischen Konzept der *Standardisierten Methode zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Flugbetriebsflächen* [FAA, 2009] auf und integriert dadurch die Vorgaben der ICAO. Der Vorteil dieser Österreichischen Methode liegt unter anderem darin, dass die verpflichtend geforderte PCN nicht nachträglich ermittelt werden muss, sondern von vornherein bekannt ist. Als Eingangsgröße in das Bemessungsverfahren kann sie so gewählt werden, dass zukünftige Entwicklungen der Flugzeugindustrie miteinbezogen werden und die Flugbetriebsfläche auch zukünftig ohne Einschränkungen benutzt werden kann. Ein weiterer großer Vorteil der Österreichischen Methode ist, dass klimatische Verhältnisse sowohl bei flexiblen als auch bei starren Oberbauten berücksichtigt werden können, wodurch die realen Gegebenheiten sehr genau nachgebildet werden. Durch das Unterscheiden einzelner Flugzeugtypen bei der Bemessung mittels der Aggressivitätszahlen und deren jeweiligen Anteil am gesamten Verkehr kann weiters ein für jeden Flughafen maßgeschneiderter Oberbau ermittelt werden.

Die Berechnung der Aggressivitätszahlen zeigt, dass bereits geringe Unterschiede in den Eingangsparametern zu sehr großen Abweichungen der Ergebnisse führen können. Dies betrifft in erster Linie die Spannungen bzw. Verzerrungen, die wiederum stark von den gewählten Schichtdicken abhängig sind. Da die Parameter bei Anwendung des Programms FAARFIELD teilweise nicht geändert werden können, ist ein direkter Vergleich von Ergebnissen mit denen aus anderen Programmen nicht immer sinnvoll möglich. Grundsätzlich ist der Verwendung von FAARFIELD jedoch nichts entgegenzusetzen. Das Programm entsprang einem jahrelangen Entwicklungsprozess und wird in den USA und über deren Grenzen hinaus erfolgreich eingesetzt. Weiters erlaubt die integrierte Flugzeugbibliothek in Kombination mit der benutzerfreundlichen Programmoberfläche eine rasche Durchführung einzelner Berechnungen. Deshalb ist die Anwendung zur Ermittlung der Aggressivitätszahlen in der Österreichischen Methode aus praktischer Sicht durchaus vertretbar.

9 LITERATURVERZEICHNIS

ACI, 2014: *Airports Council International*, <http://www.aci.aero>, 2014

Airbus, 2012: *Airbus Aircraft Characteristics, Airport and Maintenance Planning – A380*: Airbus S.A.S. Customer Service, Technical Data Support and Services, 2012

ASFINAG, 2014: *Zahlen und Fakten*, <http://www.asfinag.at>, Jänner 2014

Blab R., et al.: *Betonstraßen – das Handbuch*, Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H, Wien, 2012

Blab R., et al.: *Schlussbericht – Parallelpiste 11R/29L, Bemessungs- und bautechnische Optimierung der Flugbetriebs- und Bewegungsflächen*, im Auftrag der Flughafen Wien AG, Wien, Jänner 2011

bmvit, 2013: *Statistik – Straße und Verkehr*, <http://www.bmvit.gv.at>, 2013

Boeing, 2012: *747-8 Airplane Characteristics for Airport Planning*, Boeing Commercial Airplanes, Dezember 2012

Eisenmann J.: *Betonfahrbahnen*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin – München – Düsseldorf, 1979

FAA, 2009: *Airport Pavement Design and Evaluation. Advisory Circular 150/5320-6E*, Federal Aviation Administration, 2009

FAA, 2011: *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN. Advisory Circular 150/5335-5B*, Federal Aviation Administration, 2011

FAA, 2014: <http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/images/Test%20Vehicle.JPG>

FAARFIELD, 2009: *FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design – Airport Pavement Design*, Version 1.305, Federal Aviation Administration, 2009

Fredrickson F.C.: *Frost Considerations in Highway Pavement Design: West-Central United States*. Highway Research Record No. 33, Washington D.C., 1963

Garg N., Guo E., McQueen R.: *Operational Life of Airport Pavements*. Report DOT/FAA/AR-04/46, Federal Aviation Administration, 2004

Han, j.: *Airport Pavement Design and Evaluation*, Präsentation, University of Kansas, School of Engineering, 2007

ICAO, 1983: *Aerodrome Design Manual – Part 3: Pavements*. 2. Ausgabe, Doc 9157, International Civil Aviation Organization, 1983

ICAO, 2005: *Aerodrome Design Manual – Part 2: Taxiways, Aprons and Holding Bays*. 4. Ausgabe, Doc 9157, International Civil Aviation Organization, 2005

ICAO, 2006: *Aerodrome Design Manual – Part 1: Runways*. 3. Ausgabe, Doc 9157, International Civil Aviation Organization, 2006

ICAO, 2009: *Annex 14 – Aerodromes. Volume I – Aerodrome Design and Operations*, 5th Edition, International Civil Aviation Organization, 2009

ISLAB 2000: Version 1.1, Eres Consultants – Division of ARA, USA, 1999

Kawa I., Brill D., Hayhoe G.: *FAARFIELD – New FAA Airport Thickness Design Software*. FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, NJ, USA, 2007

LEAP, 1998: *Layered Elastic Analysis Program*, Version 1.0, Symplectic Engineering Software, 1998

LFG, 1957: *Bundesgesetz vom 2. Dezember 1957 über die Luftfahrt (Luftfahrtgesetz – LFG)*, Fassung vom 20.01.2014, www.ris.bka.gv.at

Litzka J.: *Die Bemessung des Straßenoberbaus nach der neuen RVS 3.63. Baumaschine, Baugerät, Baustelle*, Heft 2, 1987

Litzka J., Molzer C. und Blab R.: *Modifikation der Österreichischen Bemessungsmethode zur Dimensionierung des Straßenoberbaues*. Schriftenreihe Straßenforschung, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Heft 465, Wien, 1996

Mais R.: *Zur Beanspruchung von bituminösen Fahrbahnbefestigungen. Ein Beitrag zur Ermittlung standardisierter Fahrbahnbefestigungen mit Hilfe der Mehrschichtentheorie*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 138, Bonn, 1973

Merkblatt für den Bau von Flugbetriebsflächen aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Köln, 2002

Milkovics T.: *Ergänzende Berechnungen und Untersuchungen zur neuen Oberbaurichtlinie RVS 3.63*. Diplomarbeit am Institut für Geotechnik und Verkehrswesen, Universität für Bodenkultur, Wien, 1984

Müller C.: Interdisziplinäre Seminararbeit am Institut für Verkehrswissenschaften, Fachbereich für Straßenwesen, TU Wien, Wien, 2014

Packard R. G.: *Design of Concrete Airport Pavement*. Engineering Bulletin, Portland Cement Association, 1995

Shell: *Shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic*. Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978

Wistuba M.: *Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen – Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich*. Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung Nr. 15, Technische Universität Wien, Wien, 2003

ZFV, 1972: *Verordnung des Bundesministers für Verkehr vom 1. Juli 1972 betreffend Zivilflugplätze* (Zivilflugplatz-Verordnung – ZFV 1972), Fassung vom 20.11.2013

ZTV Beton – StB 01, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Köln, 2001

ZTV Fug – StB 01, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugen in Verkehrsflächen*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Köln, 2001

10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Spurverteilung auf einer Landebahn	2
Abbildung 2: Fahrwerksarten – (1) Spornradfahrwerk, (2) Bugradfahrwerk	5
Abbildung 3: Mögliche Radanordnung [FAA, 2009]	6
Abbildung 4: Beispiele von Fahrwerksanordnungen	7
Abbildung 5: Versuchsaufbau an der NAPTF [FAA, 2014].....	9
Abbildung 6: Bemessung starrer Oberbauten nach der PCA-Methode für Airbus A380-800 [Airbus, 2012].....	15
Abbildung 7: Bemessung flexibler Oberbauten nach der Methode des U.S. Army Corps of Engineers für Airbus A380-800 [Airbus, 2012]	17
Abbildung 8: Effektive Radaufstandsbreite [FAA, 2009].....	23
Abbildung 9: Beispiel der CDF-Verteilung für einen Flugzeugmix [FAA, 2009]	24
Abbildung 10: Ablaufschema zur Ermittlung der ACN [geändert nach ICAO, 1983].....	30
Abbildung 11: ACN-Ermittlung für flexible Oberbauten [ICAO, 1983].....	31
Abbildung 12: Radkonfiguration eines Airbus A380-800 [Airbus, 2012]	41
Abbildung 13: Änderungen der Untergrundtragfähigkeit mit der Jahreszeit [Fredrickson, 1963].....	43
Abbildung 14: Schichtenabfolge eines halbstarren Oberbaus.....	46
Abbildung 15: Schichtenabfolge eines starren Oberbaus	54
Abbildung 16: Verformungen und Spannungen infolge ungleichmäßiger Erwärmung von oben [Eisenmann, 1979].....	57
Abbildung 17: Smith'sches Schaubild für Normalbeton [Eisenmann, 1979]	59
Abbildung 18: Schichtenaufbau und Parameter der untersuchten halbstarren Oberbauvariante	72
Abbildung 19: Aggressivitätszahlen der maßgebenden Flugzeugflotte für halbstarre Aufbauten mit AC 35.....	77
Abbildung 20: Gegenüberstellung der Aggressivitätszahlen der maßgebenden Flugzeugflotte für halbstarre Aufbauten mit AC 38.....	83
Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Asphaltstichtdicke und zulässigen Überrollungen des BLFZ.....	84
Abbildung 22: Schichtenaufbau und Parameter der untersuchten starren Oberbauvariante	89
Abbildung 23: Maßgebende Laststellung des BLFZ für die Spannungsermittlung [ISLAB 2000]	90
Abbildung 24: Qualitative Darstellung der Biegezugspannungen des BLFZ in y-Richtung für den Lastfall Plattenrand	91

Abbildung 25: Gegenüberstellung der Aggressivitätszahlen der maßgebenden Flugzeugflotte für starre Aufbauten mit einer Betondeckendicke von 40 cm	93
Abbildung 26: Verdübelte Scheinfuge ohne Fugenverschluss [geändert nach Blab et al., 2012]	99
Abbildung 27: Verdübelte Pressfuge ohne Fugenverschluss [geändert nach Blab et al., 2012]	101
Abbildung 28: Verdübelte Raumfuge ohne Fugenverschluss [geändert nach Blab et al., 2012]	102
Abbildung 29: Fugenverschluss am Beispiel einer Scheinfuge [geändert nach Blab et al., 2012]	103

11 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Lebensdauer des Oberbaus in Bezug auf CDF-Werte [geändert nach FAA, 2009]	22
Tabelle 2: ACN-Werte einer Boeing 747-8I [geändert nach Boeing, 2012]	29
Tabelle 3: ACN-Werte für das Bemessungsluftfahrzeug [geändert nach Blab et al., 2011]...42	
Tabelle 4: Untergrundtragfähigkeit in Abhängigkeit von den Jahresperioden [Litzka, 1987]..44	
Tabelle 5: Einteilung des Jahres in 6 Klimaperioden bzw. in 12 Temperaturperioden in Abhängigkeit von der Jahres- und Tageszeit [Mais, 1973].....	51
Tabelle 6: Formeln zur Berechnung der Biegezugspannungen [N/mm ²] an der Plattenunterseite in Plattenmitte bei einer Erwärmung von oben mit linearem Verlauf des Temperaturgradienten $\Delta t = 0,09$ K/mm [geändert nach Eisenmann, 1979]	58
Tabelle 7: Untergrundtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Jahresperiode	65
Tabelle 8: Annahmen für das E-Modulverhältnis ungebundener Tragschichten im Österreichischen Bemessungsmodell [Milkovics, 1984].....	67
Tabelle 9: Tragfähigkeit der Frostschutzschichte in Abhängigkeit von der Jahresperiode.....	67
Tabelle 10: Charakteristische mittlere Temperaturen in der Mitte der bituminösen Schicht in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Schichtstärke h [Milkovics, 1987]	68
Tabelle 11: Mittlere Temperaturen für die bemessungsrelevanten Schichtdicken.....	69
Tabelle 12: Gemittelte E-Moduln für die bemessungsrelevanten Schichtdicken	70
Tabelle 13: Wichtungsfaktoren ρ_i der Schädigung für die 12 Temperaturperioden [geändert nach Wistuba, 2003].....	70
Tabelle 14: Bemessungsrelevante Belastungsdaten der Flugzeugflotte	73
Tabelle 15: Ermüdungsberechnung für das BLFZ für halbstarre Aufbauten mit AC 35	75
Tabelle 16: Schädigungsraten C für die bemessungsrelevante Flugzeugflotte	76
Tabelle 17: Aggressivitätszahlen für die bemessungsrelevante Flugzeugflotte.....	76
Tabelle 18: Gegenüberstellung der E-Moduln der FSS [MN/m ²]	79
Tabelle 19: Gegenüberstellung der E-Moduln des Untergrunds [MN/m ²].....	80
Tabelle 20: Geplante Anzahl an Starts der bemessungsrelevanten Flugzeugflotte im Jahr 2010 [Blab et al., 2011]	84
Tabelle 21: Gegenüberstellung der Bemessungswerte für verschiedene Schichtdicken.....	85
Tabelle 22: Bettungsmoduln k und deren Anteile über den Jahresverlauf zur Berücksichtigung unterschiedlicher Untergrundtragfähigkeiten [geändert nach Blab et al., 2011].....	89
Tabelle 23: Ermüdungsberechnung für das BLFZ für starre Aufbauten mit einer Betondeckendicke von 40 cm.....	92

ANHANG

Inputfile BLFZ (AC 35, Periode 1)

struct

```
add ACdeck 9640.0 0.35 40.0 0 0.0
add ACtrag 9640.0 0.35 310.0 0 0.0
add ST-Z 5000.0 0.2 300.0 0 0.0
add Frost 560.0 0.35 350.0 0 0.0
add UG 280.0 0.35 0 0 0.0
```

load

```
add 1wing111 7876 2500 275 0,000 0,000 396900
add 1wing112 6076 2500 275 0,000 0,000 396900
add 1wing121 7876 3850 275 0,000 0,000 396900
add 1wing122 6076 3850 275 0,000 0,000 396900
add 1body111 5400 6006 275 0,000 0,000 396900
add 1body112 3700 6006 275 0,000 0,000 396900
add 1body113 2000 6006 275 0,000 0,000 396900
add 1body121 5400 7536 275 0,000 0,000 396900
add 1body122 3700 7536 275 0,000 0,000 396900
add 1body123 2000 7536 275 0,000 0,000 396900
add 1body211 5400 11270 275 0,000 0,000 396900
add 1body212 3700 11270 275 0,000 0,000 396900
add 1body213 2000 11270 275 0,000 0,000 396900
add 1body221 5400 12800 275 0,000 0,000 396900
add 1body222 3700 12800 275 0,000 0,000 396900
add 1body223 2000 12800 275 0,000 0,000 396900
add 1wing211 7876 14956 275 0,000 0,000 396900
add 1wing212 6076 14956 275 0,000 0,000 396900
add 1wing221 7876 16306 275 0,000 0,000 396900
add 1wing222 6076 16306 275 0,000 0,000 396900
```

outpoint

```
add 1P1 2000 6006 649,9
add 1P2 3700 6006 649,9
add 1P3 5400 6006 649,9
```