

MITTEILUNGEN
DES
INSTITUTS
FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT

der
Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen

herausgegeben
von

Univ.-Professor Dr.-Ing. Jürgen Königter

Band 99



Markward Hoffmann

Automatische Generierung von FE-Netzen für Scheibenkonstruktionen am Beispiel von Gewichtsstaumauern

Bibliothek

INSTITUT FÜR WASSERBAU
UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE HOCHSCHULE DARMSTADT
PETERSENSTR. 13, 64287 DARMSTADT
Tel. 0 61 51 / 16 21 43 · Fax: 16 32 43

Juw.-Nr. : 3148

10 JW3 99

Academia Verlag  Sankt Augustin

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung	2
1.2 Literaturübersicht und Stand von Wissenschaft und Forschung	4
1.2.1 Grundlagen der Fehlertheorie bei FE-Methoden.....	5
1.2.2 Praktische Anwendung.....	9
1.2.3 Gegenwärtiger Stand bei der Anwendung von FE-Methoden.....	12
1.2.3.1 FE-Programme.....	12
1.2.3.2 Normen und Vorschriften für FE-Berechnungen.....	17
1.3 Lösungsweg, Vorgehensweise	18
2 Berechnungsverfahren	20
2.1 Numerische Berechnungsverfahren	20
2.1.1 Finite-Differenzen-Methode (FDM).....	20
2.1.2 Finite-Elemente-Methode (FEM).....	20
2.1.3 Randintegralverfahren (BEM).....	21
2.1.4 Distinct Element-Methode (DEM).....	22
2.1.5 Stufenkörpermethode (SKM).....	24
2.1.6 FEM in verschiedenen Fachgebieten.....	24
2.2 Fehlerindikator für Elastizitätsprobleme	29
2.2.1 Lösungsweg.....	29
2.2.2 Erläuterungen.....	33
2.3 Genauigkeit einer FE-Berechnung	37
3 Finite-Elemente-Netze	41
3.1 Elementeigenschaften	41
3.1.1 Elementarten.....	41
3.1.1.1 Isoparametrische Elemente.....	42
3.1.1.2 Konforme Elemente.....	43

3.1.1.3 Höhergradige Elemente	43
3.1.1.4 Dreidimensionale Elemente	44
3.1.1.5 Genaue und Näherungselemente	44
3.1.1.6 Weitere Elementarten und Sonderelemente	45
3.1.2 Spannungsberechnung in Dreieck- und Viereckelementen	46
3.1.3 Vergleich von Dreieck- und Viereckelementen	51
3.1.4 Einfluß des Seitenverhältnisses von Viereckelementen	61
3.1.5 Form der Elemente	63
3.2 Netzformen	65
3.2.1 Regelmäßigkeit des Netzes	65
3.2.2 Symmetrie des Netzes	69
3.2.3 Größenverhältnis der Elemente	73
3.3 Berechnungsraum	76
4 Generierung optimaler Netze	77
4.1 Netzglättung	77
4.2 Bandbreitenoptimierung	86
4.3 Adaptive Netzverfeinerung	90
4.3.1 Die h-Version der Verfeinerung	90
4.3.2 Die p-Version der Verfeinerung	90
4.3.3 Kombination von h- und p-Version	91
4.3.4 Verfeinerungskriterien	92
4.3.5 Kombination mittels Fuzzy-Logik	95
4.3.6 Datenaufbereitung	102
4.3.7 Geschwindigkeit der Verfeinerung	107
4.3.8 Verfeinerung mit und ohne Glättung	111
4.4 Spannungsberechnung	112
4.5 Rechengenauigkeit	120
4.5.1 Einfache Genauigkeit (single precision)	121
4.5.2 Doppelte Genauigkeit (double precision)	121
4.5.3 Vergleich	122

4.5.4 Konditionszahl des Gleichungssystems	126
4.5.4.1 Konditionszahl nach HADAMARD	126
4.5.4.2 Konditionszahl nach der Euklidischen Matrixnorm	127
4.5.4.3 Konditionszahl aus Eigenwerten	127
4.5.4.4 Bewertung der Konditionszahl	128
4.6 Rechenzeitbedarf	129
5 Fallbeispiel: Staumauer mit Dreieckprofil.....	133
5.1 Lösung mit der Airy'schen Spannungsfunktion (Scheibentheorie)	133
5.2 Ergebnisse nach Balken- bzw. Elastizitätstheorie.....	134
5.2.1 Formänderungen	134
5.2.2 Spannungen.....	136
5.3 Berechnungsraum für die Staumauer.....	137
5.3.1 Berechnung einer Staumauer mit Dreieckquerschnitt	137
5.3.2 Bestimmung der notwendigen Untergroundtiefe	138
5.4 Finite-Elemente-Lösung mit Netzverfeinerung.....	143
5.4.1 Netzgenerierung	143
5.4.2 Konvergenz der maßgebenden Ergebnisse	147
5.4.3 Spannung am wasserseitigen Mauerfuß.....	149
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	154
Anhang: Anwendungsvorschlag (Staumauer mit vorgesetzter Dichtwand)	156
A.1 Materialbereiche	158
A.2 Netzverfeinerung	162
A.3 Spannungen.....	163
A.4 Konstruktionsvarianten.....	164
A.4.1 Gemeinsames.....	171
A.4.2 Varianten mit "Fuelbecke"-Fugen (1A - 1C)	172
A.4.3 Varianten mit "Heilenbecke"-Fugen (2A - 2D).....	173

A.4.4 Sonstige Varianten	173
A.4.4.1 Tiefer gelegter Kontrollgang	174
A.4.4.2 Breitere Verstärkung	174
A.4.4.3 Sohlbalken mit senkrecht durchlaufender Wasserseite	175
A.4.5 Ausgeführte Lösung	175
Glossar	180
Literaturverzeichnis	191