

Prof. Dr.-Ing. Friedel Hartmann
Fachgebiet Baustatik
Fachbereich 14 Bauingenieurwesen

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Bedienungsanleitung und Programmbeschreibung von WINFEM-P

von

Kai Joachim Niedernolte

August 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Bedienungsanleitung und Programmbeschreibung von WINFEM-P	4
2.1	Allgemein	4
2.2	Starten eines neuen Projektes	4
2.3	Abmessungen, Eingabe der Plattenparameter	5
2.3.1	Beispiel zur Eingabe der Abmessungen	5
2.3.2	Lager setzen	6
2.3.3	Lager ändern oder löschen	8
2.3.4	Stützen	9
2.4	Belastungen oder Einflussfunktionen aufbringen	10
2.4.1	Beispiel zur Eingabe der Last	10
2.4.2	Beispiel zur Eingabe einer Einflussfunktionen	11
2.4.3	Lasten und Einflussfunktionen löschen	12
2.5	Die Berechnung	13
2.5.1	FE- Berechnung für eine Einflussfunktion	14
2.6	Die Ergebnisse	15
2.6.1	Verformung	15
2.6.2	Schnittgrößen	17
2.6.3	Originallastfall p	18
2.6.4	FE-Lastfall p_h	19
2.6.5	Niveaulinien	20
2.6.6	Textausgabe	21
2.7	Recovery, eine weitere Berechnung	21
2.7.1	Einstellungen bei der Recovery-Option	23
2.7.2	Die Randkorrektur	23
2.7.3	Verbesserung der Biegefläche, das Stützenanschnittsmoment	24
3	Schlusswort	26

1 Einleitung

Die Methode der finiten Elemente ist bei Ingenieuren heute ein gebräuchliches Werkzeug zur Berechnung von Weg- und Kraftgrößen in der Strukturmechanik. Allerdings wird oft vergessen, dass es sich bei der FE- Methode um ein Näherungsverfahren handelt und die Genauigkeit der Ergebnisse streuen. Daher ist es wichtig, die Lösungen, die ein FE-Programm liefert, kritisch zu hinterfragen. Neben Fehlern, die durch Wahl eines falschen Berechnungsmodells verursacht werden, treten häufig auch Diskretisierungsfehler auf. Da dem Ingenieur bei komplexen Strukturen keine exakte Lösung bekannt ist, fällt es schwer, die Ergebnisse zu bewerten. Der Fehler kann im Allgemeinen nur abgeschätzt werden. In der letzten Zeit hat sich daher die „Fehlerschätzung“ zu einem speziellen Forschungsgebiet entwickelt. Um die Fehler der FE-Ergebnisse bei Platten zu minimieren, kann man die Grundlösung der Greenschen Funktion mit der FE-Lösung der Randwerte kombinieren und so ein besseres Ergebnis bei gleicher Netzstruktur bekommen.

Im Rahmen der Forschungstätigkeit des Fachgebietes Baustatik der Universität Kassel wurde das Programm WINFEM-P entwickelt, welches für Platten die unbekannten Kraft- und Weggrößen in den Knotenpunkten berechnet und insbesondere dabei die Grundlösung der Greenschen Funktion mit der Randelementemethode kombiniert.

WINFEM-P ist ein auf der Methode der finiten Elemente basierendes Programm zur linear elastischen Berechnung von Platten. Es werden Plattenelemente auf Basis der Kirchhoff-Platte mit bikubischen Plattenelementen verwendet.

In der vorliegenden Arbeit soll der Umgang mit dem Programm WINFEM-P dokumentiert, die Berechnungsmöglichkeiten aufgezeigt und der theoretische Hintergrund in den Grundzügen beschrieben werden.

2 Bedienungsanleitung und Programmbeschreibung von WINFEM-P

2.1 Allgemein

WINFEM-P ist ein auf der Windows-Oberfläche basierendes Programm. Es hat sowohl Menüleisten, sowie Short Buttons, die unter der Menüleisten zu finden sind und einen schnelleren Zugriff auf bestimmte Funktionen des Programmes ermöglichen. Wenn man sich mit FE-Programmen bereits auskennt, kann es intuitiv bedient werden, da es sehr übersichtlich strukturiert ist. Um jedoch etwas tiefer in die Vorgehensweise des Programmes zu blicken, wurde diese Anleitung geschrieben.

WINFEM-P besteht aus vier einzelnen Programmen. Zur Eingabe der Plattengeometrie und der Lagerbedingungen wird das Programm **Abmessungen** aufgerufen und um einen Lastfall einzugeben das Programm **Belastung**. Die Lösung wird im Programm **Rechnen** berechnet. Die visuelle Ausgabe der berechneten Daten wird im Programm **Ergebnisse** ausgegeben.

2.2 Starten eines neuen Projektes

Es wird mit einem neuen Projekt begonnen. Dazu wird in der Menüleiste der erste Punkt geöffnet **Projekt, Neue Position**, siehe Abb. 2.1 a. Es öffnet sich ein Fenster, in dem als erstes der Name des Projektes und dann der Speicherort, an dem es gespeichert werden soll, eingetragen wird, siehe Abb. 2.1 b.



Abb. 2.1: a) In der Menüzzeile **Projekt** öffnen und **Neue Position** starten. b) Eingabefenster um die neue Position zu benennen und den Speicherort festzulegen.

Nach dem Bestätigen durch **OK**, springt das Programm automatisch in den Menüpunkt **Abmessungen**, um dort die Abmessungen der Platte festzulegen.

2.3 Abmessungen, Eingabe der Plattenparameter

Das Programm **Abmessungen** wurde nun gestartet. Um eine Platte einzugeben, wird einfach in der Menüleiste **Geometrie** aufgerufen. Es erscheint ein neues Eingabefeld. In diesem können nun die maßgebenden Plattenparameter eingegeben werden, siehe Abb. 2.2. Zu beachten ist, dass die maximalen Abmessungen der Rechteckplatte einzugeben sind. Aussparungen bzw. Kragplatten (Balkons) werden erst später modelliert.

Wenn das vorige Projekt nicht mehr benötigt wird, kann mit dem Short Button, das Programm **Abmessungen** direkt gestartet werden. Die alten Daten werden dann überschrieben.

-  = Short Button zur Eingabe der Abmessungen und dem Setzen der Lager.

2.3.1 Beispiel zur Eingabe der Abmessungen

Es soll eine Platte mit den Maßen $7,5\text{ m} \times 5\text{ m}$, der Dicke $0,2\text{ m}$ und dem Beton C 30/37 berechnet werden. Die Elementbreite und Elementlänge sollen $0,5\text{ m}$ betragen.

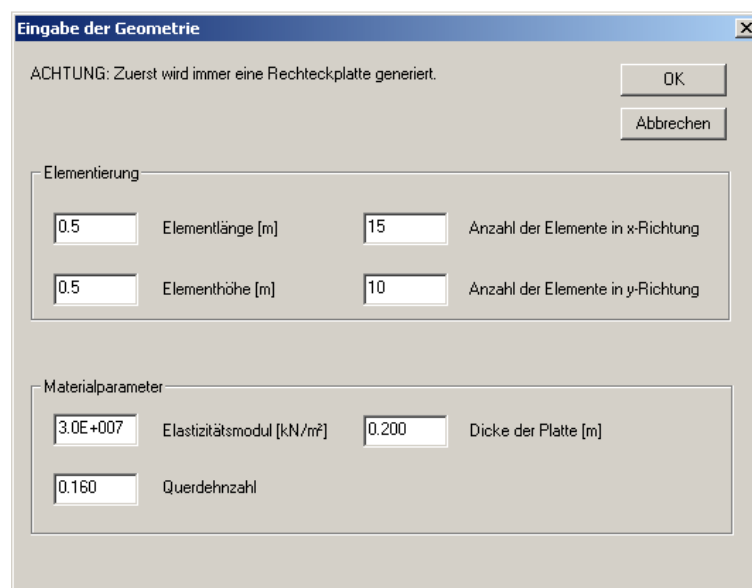


Abb. 2.2: Eingabefenster für die wesentlichen Eigenschaften der Platte

Damit ist die Geometrie mit ihren Abmessungen eingegeben. Um die Platte weiter modellieren zu können, müssen einzelne Elemente gelöscht werden. Dieses kann unter dem Menüpunkt **Tools** öffnen **Elemente einzeln löschen** oder **mehrere Elemente löschen** ausgeführt werden. Es können natürlich auch die Short Buttons an der rechten Seite des Fensters benutzt werden, siehe Abb. 2.3.

Einzelne oder auch mehrere Elemente können durch Anklicken gelöscht werden. Nachdem eine Öffnung in die Platte modelliert wurde, muss noch die Lagerung der

einzelnen Ränder bestimmt und gesetzt werden. Dieses ist im Menü Tool zu finden, Lager setzen.

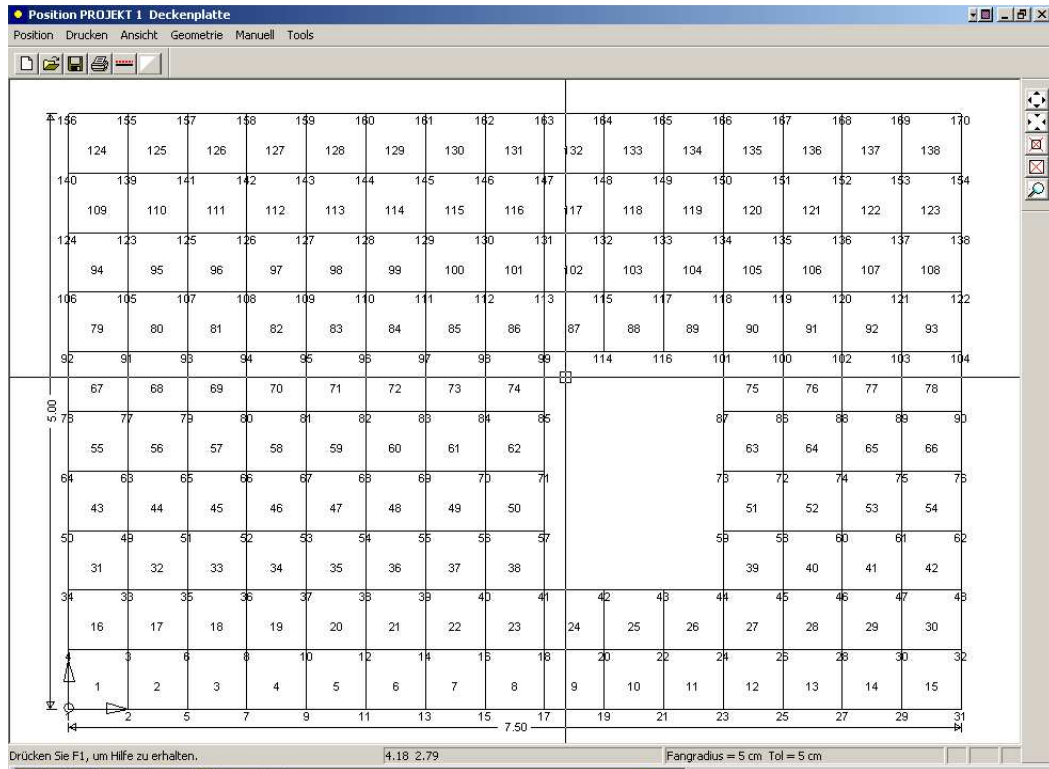







Abb. 2.3: Durch wählen von Elemente einzeln löschen können mit der Maus Elemente gelöscht werden.

-  = An das Fenster anpassen
-  = Verkleinern
-  = Einzelnes Element löschen
-  = Mehrere Elemente löschen
-  = Vergrößern eines Bereiches

2.3.2 Lager setzen

Lager können im Menüpunkt Tools, Lager setzen gesetzt werden, siehe Abb. 2.4.

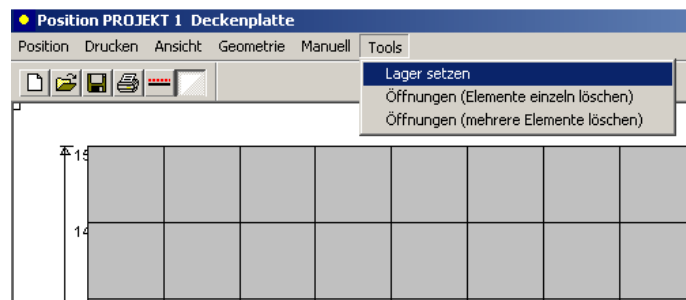


Abb. 2.4: Nach dem öffnen von Lager setzen öffnet sich das in Abb. 2.5 dargestellte Fenster.



Abb. 2.5: Im Eingabefenster der Lager kann die entsprechende Lagerungsart gewählt werden.

Um ein Lager zu setzen, wählt man die gewünschte Lagerungsart durch Anklicken aus. Der Radiobutton zeigt einem dann die derzeitige gewählte Lagerung. Wenn die Dreh- oder die Senkfeder gewählt wurde, muss noch zusätzlich die Federsteifigkeit in kNm/m angegeben werden. Diese wird in das sich öffnende Textfenster eingetragen. Die Lager werden nacheinander gesetzt, indem man nun zwischen zwei Knoten die gewünschte Linie markiert. Wenn die äußere Lagerung die gleiche ist, können auch mit dem Button **Ganzer Rand** alle äußeren Linien auf einmal markiert werden.

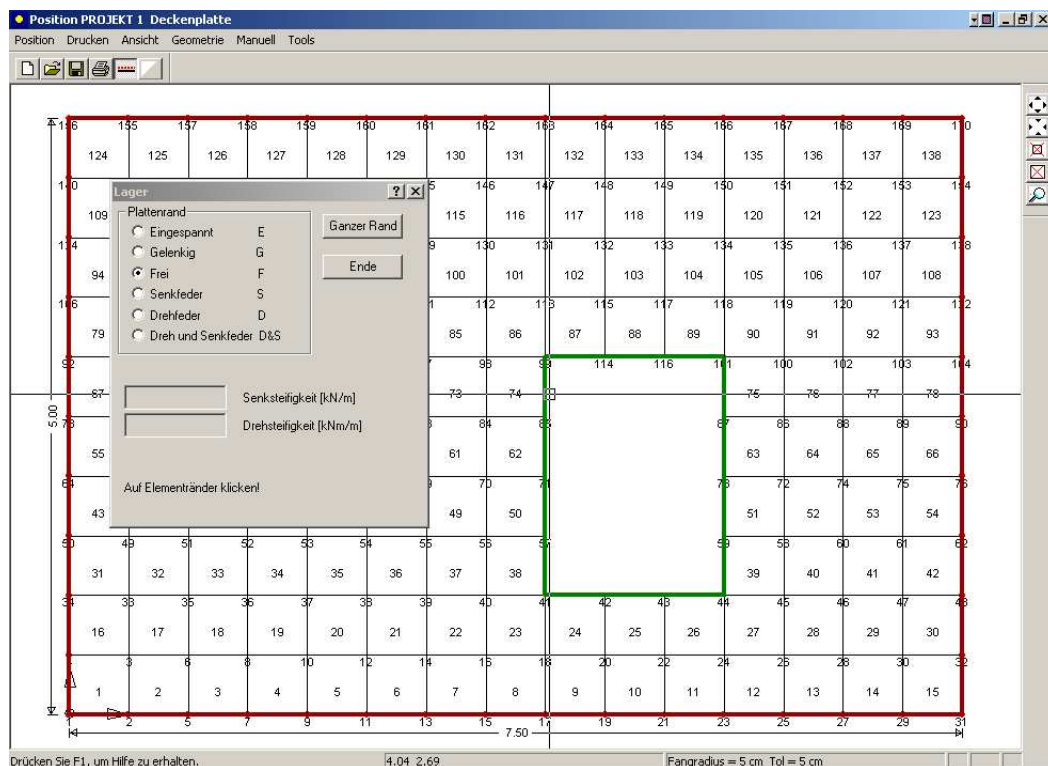


Abb. 2.6: Beispiel: Die zuvor eingegebene Platte mit der Öffnung hat nun außen eine Einspannung, durch die dicke rote Linie dargestellt. Bei der Öffnung wurde ein freier Rand gesetzt, durch die dicke grüne Linie gekennzeichnet.

2.3.3 Lager ändern oder löschen

Um Lagerungen zu ändern, kann einfach eine neue Lagerungsart gewählt und über die vorige gelegt werden. Die alte Lagerung wird dadurch automatisch gelöscht. Soll die gesamte Lagerung gelöscht werden, können im Menüpunkt **Manuell** unter **Knoten, Lager** löschen alle gesetzten Lager gelöscht werden. In der Tabelle ist es weiterhin möglich, alle Lager einzeln nach seinen Wünschen zu ändern. Wenn nur Federn gelöscht werden müssen, können unter **Manuell, Federn** die Federn mit dem Button **Federn löschen** gelöscht werden. Damit werden die Werte wieder auf Null zurückgesetzt. Es funktioniert natürlich auch, dass in der Tabelle, alle Federn manuell gelöscht oder geändert werden.

Des Weiteren können auch einzelne Elemente verändert werden. Dazu gibt es die Befehle im Menüpunkt **Manuell Elemente** bzw. **Elastische Bettung**. Bei dem Menüpunkt **Elemente** können die Parameter der Elemente einzeln bearbeitet und verändert werden. Falls eine elastische Bettung der Elemente nötig ist, können diese in dem selben Menüpunkt durch eine Bettungszahl angegeben werden.

2.3.4 Stützen

Stützen müssen über die Menüzelle **Manuell**, **Knoten** eingegeben werden, siehe Abb. 2.7.

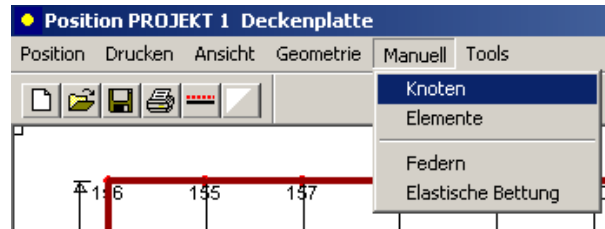


Abb. 2.7: Stützen werden unter **Manuell**, **Knoten** eingegeben.

Um eine Stütze zu modellieren, wird die Verformung w für den gestützten Knoten gesperrt, d.h. der Freiheitsgrad erhält den Wert Eins, wie in Abb. 2.8 zu sehen. Dies ist bei der weiteren Berechnung nicht übernommen worden, es dient lediglich zur Darstellung der Möglichkeiten, die das Programm bietet und in einem späteren Abschnitt, um zu zeigen, wie ein Stützenanschnittsmoment verbessert werden kann.

	x [m]	y [m]	w	w,x	w,y	w,xy
70	3.50000	2.00000	0	0	0	0
71	4.00000	2.00000	0	0	0	0
72	6.00000	2.00000	0	0	0	0
73	5.50000	2.00000	0	0	0	0
74	6.50000	2.00000	0	0	0	0
75	7.00000	2.00000	0	0	0	0
76	7.50000	2.00000	1	1	1	1
77	0.50000	2.50000	0	0	0	0
78	0.00000	2.50000	1	1	1	1
79	1.00000	2.50000	0	0	0	0
80	1.50000	2.50000	0	0	0	0
81	2.00000	2.50000	0	0	0	0
82	2.50000	2.50000	0	0	0	0
83	3.00000	2.50000	0	0	0	0
84	3.50000	2.50000	1	0	0	0
85	4.00000	2.50000	0	0	0	0
86	6.00000	2.50000	0	0	0	0
87	5.50000	2.50000	0	0	0	0
88	6.50000	2.50000	0	0	0	0
89	7.00000	2.50000	0	0	0	0
90	7.50000	2.50000	1	1	1	1
91	0.50000	3.00000	0	0	0	0
92	0.00000	3.00000	1	1	1	1
93	1.00000	3.00000	0	0	0	0
94	1.50000	3.00000	0	0	0	0
95	2.00000	3.00000	0	0	0	0
96	2.50000	3.00000	0	0	0	0
97	3.00000	3.00000	0	0	0	0


Abb. 2.8: Bei dem Knoten 84 wurde w auf Eins gesetzt, damit ist dieser Knoten in vertikaler Richtung unverschieblich und stellt eine Stütze dar.

2.4 Belastungen oder Einflussfunktionen aufbringen

Wenn das Programm **Belastung** gestartet wird, kann entschieden werden, ob ein Lastfall oder eine Einflussfunktion berechnet werden soll. Es ist nicht möglich eine Belastung und eine Einflussfunktion gleichzeitig einzugeben und zu berechnen.

Dieses ist nicht möglich bzw. nicht sinnvoll, da das Programm bei der Berechnung einer Einflussfunktion einen bestimmten Lastfall vorgibt und so durch eine weitere Belastung nicht mehr der bestimmte Lastfall vorhanden wäre. Genauer wird dieses bei der Berechnung von Einflussfunktionen erläutert.

Wenn ein gespeichertes Projekt geöffnet wird und es bei der Lasteingabe weiter bearbeitet werden soll, kann vom Hauptprogramm aus mit dem Short Button sofort die Lasteingabe gestartet werden. Die Abmessungen der Platte müssen dann allerdings schon bearbeitet worden sein.

-  = Short Button zur Eingabe der Last.

2.4.1 Beispiel zur Eingabe der Last

Es stehen vier verschiedene Lastvarianten zur Verfügung: Gleichlast, Elementlast, Linielast und Knotenlast. Diese können alle miteinander überlagert bzw. kombiniert werden. Die Gleichlast gilt für die gesamte Platte. Es kann die Betonrohddichte in kN/m^3 als Eigengewicht eingegeben werden und eine Flächenlast in kN/m^2 als Schneelast oder einfache eine Belastung angegeben werden. Nun gibt es zwei Wege, die Last einzugeben; entweder über die Menüleiste mit dem entsprechenden Lastfall oder mit dem speziellen Lastfall-Button.

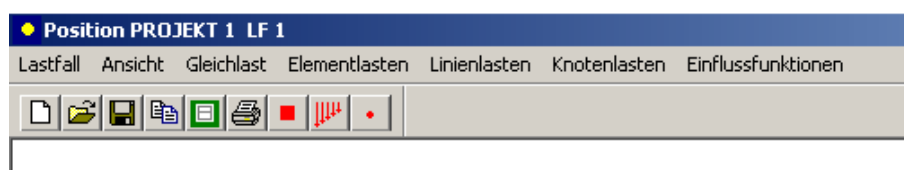





Abb. 2.9: In der Menüleiste werden die Tabellenprogramme geöffnet, um die Last direkt einzugeben. Die Buttons öffnen ein Eingabefenster, in die man die Werte für die markierte Stelle eingibt.

-  = Elementlast
-  = Linienlast
-  = Knotenlast

Über die Menüleiste werden Tabellen aufgerufen, in welche von Hand alle Lasten eingegeben werden können. Mit dem Button wird zuerst die gewünschte Lastvariante aktiviert und danach das jeweilige Element, Linie oder Knoten angeklickt, um die Belastung in das sich öffnende Fenster einzugeben.

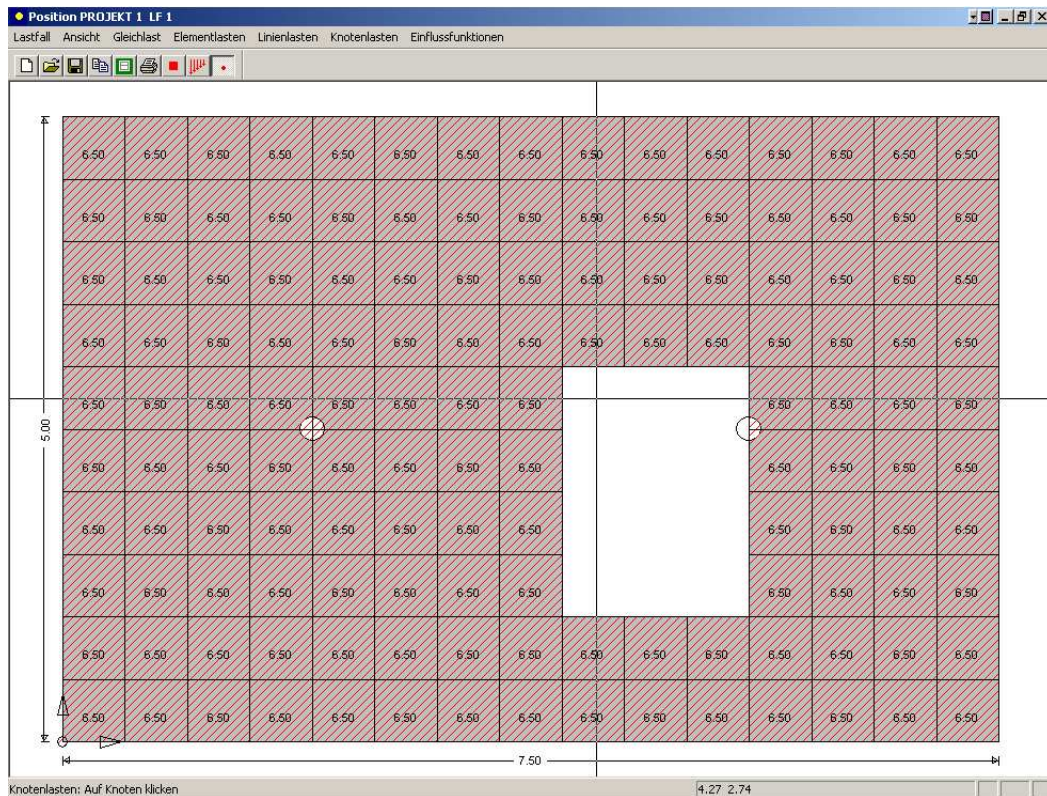


Abb. 2.10: Es wurde eine Gleichlast, Eigengewicht = 25 kN/m^3 + Verkehrslast = $1,5 \text{ kN/m}^2$ und zwei Knotenlasten von jeweils $P = 5 \text{ kN}$ aufgebracht.

2.4.2 Beispiel zur Eingabe einer Einflussfunktionen

Um eine Einflussfunktion zu erhalten, öffnet man in der Menüleiste das Menü Einflussfunktionen.

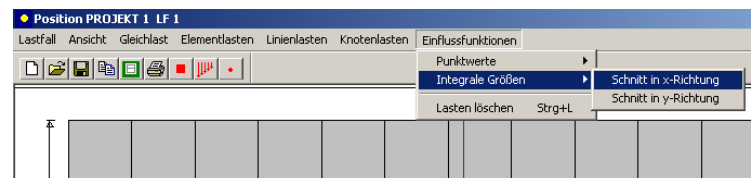


Abb. 2.11: Beispiel, um eine Einflussfunktion für eine integrale Größe zu berechnen.

Es können an vier verschiedenen Stellen Einflussfunktionen berechnet werden; Punktuell im Element oder Knoten und Schnitte in die jeweilige globale Koordinatenrichtung.

Eine Überlagerung von mehreren Einflussfunktionen ist nicht möglich, wie in der Einleitung zur Thema Belastung kurz erläutert wurde. Um Einflussfunktionen für Punktgrößen zu bekommen, kann man unter **Punktwerte** zwischen **Knoten** und **Element** wählen. Wenn man eine Einflussfunktion für eine integrale Größe, z.B. ein Schnitt über mehrere Elemente, haben möchte, öffnet man wie in Abb. 2.11 dargestellt **Integrale Größe** und kann sich dann für einen Schnitt in x - oder in y -Richtung entscheiden.

Wenn die integrale Größe in x -Richtung ausgewählt wurde, kann ein beliebiges Element markiert werden. Es öffnet sich ein Eingabefenster, siehe Abb. 2.12, in denen die Schnittparameter eingestellt werden können. Es können die Lage und die zur Einflussfunktion gehörige Kraftgröße verändert werden. Zur Auswahl stehen die verschiedenen Momente m_{xx} , m_{yy} , m_{xy} , die Querkräfte q_x und q_y und der Kirchhoffschub v_x und v_y .

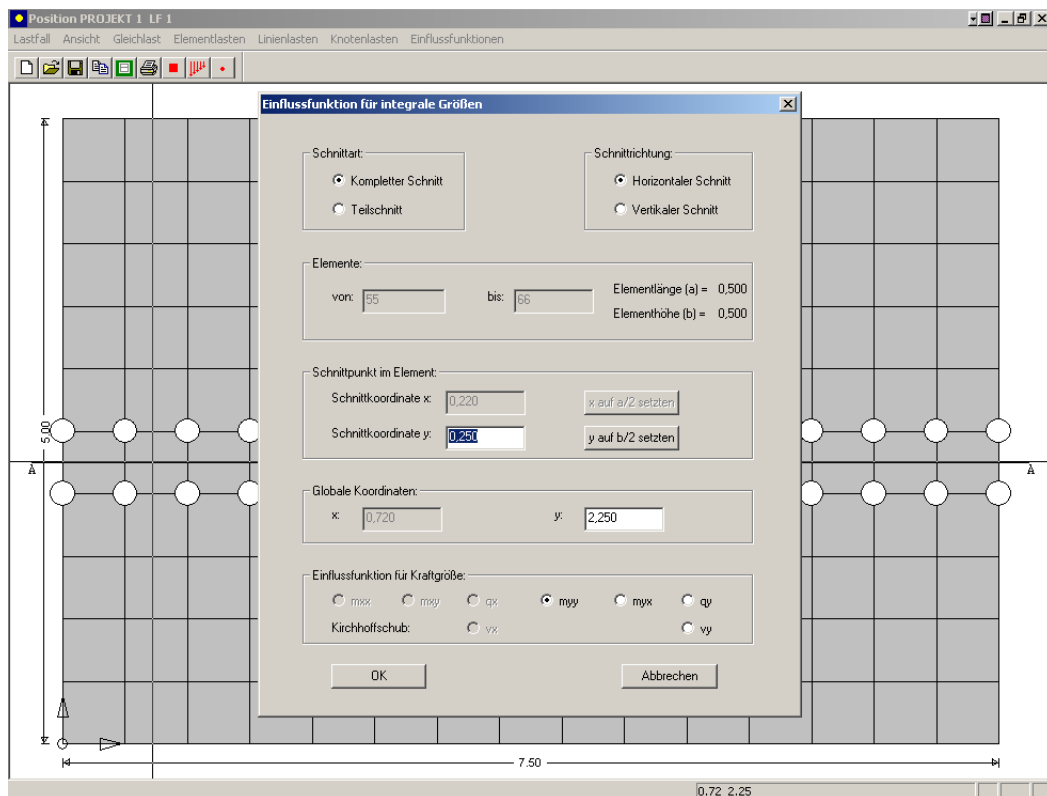


Abb. 2.12: Eingabefenster, um die Lage und Schnittgröße der Einflussfunktion zu definieren.

2.4.3 Lasten und Einflussfunktionen löschen

Um einen Lastfall oder eine Einflussfunktion zu löschen, kann im Menü unter **Einflussfunktion**, **Lasten löschen** alles das, was im Programm **Belastung** eingegeben worden ist, wieder gelöscht werden. Die Platte bleibt mit ihren Eingaben erhalten und wird

nicht verändert.

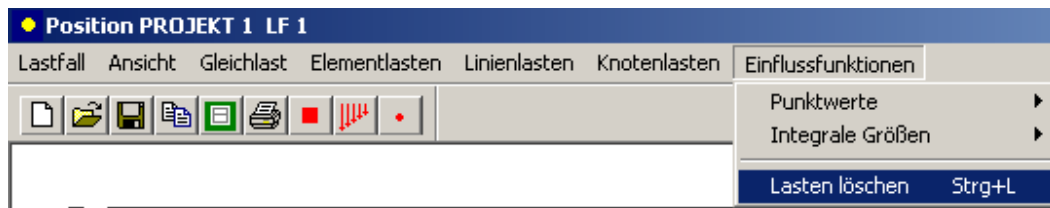


Abb. 2.13: Der Befehl zum Löschen der Lasten, ist im Menü unter „Einflussfunktionen“ zu finden.

Soll nur eine Last verändert werden, kann man in der Menüzeile das entsprechende Tabellenprogramm öffnen und dort die gewünschten Werte verändern.

2.5 Die Berechnung

Um die Berechnung zu starten, wird in der Menüzeile das Programm **Rechnen** geöffnet oder es kann der Short Button benutzt werden. Dann kann die Berechnung mit **Starten der Berechnung** gestartet und nach der Rechnung mit **Ende** beendet werden.

-  = Short Button zum Starten des Berechnungsprogrammes.

Die FE-Lösung von WINFEM-P wird, wie jede andere Berechnung eines FE-Programmes auch, über die Gleichung

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (2.1)$$

ermittelt. \mathbf{K} bezeichnet die Steifigkeitsmatrix des Systems, \mathbf{u} ist der Vektor der Weggrößen und \mathbf{f} die auf die Struktur einwirkenden äußeren Kräfte.

Die FE-Lösung kann verbessert werden, allerdings erst nach einer Berechnung. Um eine Verbesserung von einem Punktwert zu erhalten, kann unter **Ergebnisse**, **Recovery** eine Verbesserung des Ergebnisses durchgeführt werden. Im Kapitel 2.7 auf der Seite 21 wird beschrieben, wie diese Verbesserung erzielt werden kann.

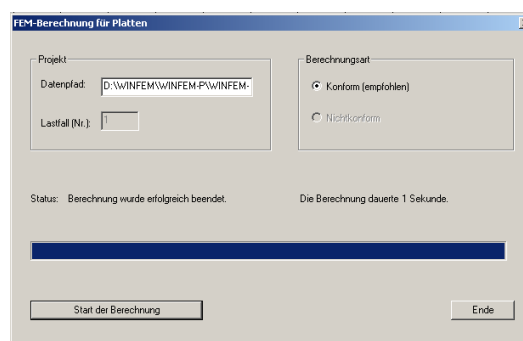


Abb. 2.14: Im Berechnungsprogramm wird der aktuelle Lastfall berechnet. Danach können die Ergebnisse im Programm **Ergebnisse** betrachtet werden.

2.5.1 FE- Berechnung für eine Einflussfunktion

Um allgemein eine Einflussfunktion zu bestimmen, wird die zur Greenschen Funktion duale Größe als Belastung an der Stelle x aufgebracht. Um eine Einflussfunktion mit einem FE-Programm berechnen zu können, muss diese zur Greenschen Funktion duale Größe in arbeitsäquivalente Knotenkräfte umgerechnet werden, siehe Abb. 2.15. Mit diesen Knotenkräften kann jetzt eine FE-Berechnung gestartet werden und man erhält so die genäherte Einflussfunktion G_h .

Die Knotenkräfte erhält man, in dem die zur Einflussfunktion gehörige Belastungsgröße, z.B. für G_0 ist es die Weggröße in vertikaler Richtung, aus den Einheitsverformungen, siehe Abb. 2.16 für den Balken, an der Stelle x ermittelt wird. Die Formel hierfür lautet

$$f_i = \int_{\Omega} \delta_j(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \cdot \varphi_i(\mathbf{y}) d\Omega_{\mathbf{y}}. \quad (2.2)$$

Das δ stellt die vier möglichen Lastfälle, Einslast, Einsmoment, Knick von Eins und Versatz von Eins dar. Damit sind die Knotenkräfte bestimmt und diese werden als Belastung aufgebracht. Es existiert nun ein Lastfall und die FE-Berechnung kann durchgeführt werden.

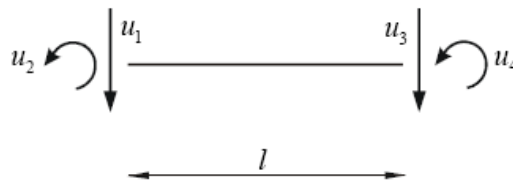


Abb. 2.15: Die Freiheitsgrade u_i an einem Element.

Da mit einem Lastfall die Einflussfunktion bestimmt wird, ist es jetzt auch klar, wieso das gleichzeitige Aufbringen von Lasten und den äquivalenten Knotenkräften für die Berechnung einer Einflussfunktion nicht sinnvoll ist, denn es würde die Knotenkräfte verändern und keine Einflussfunktion mehr berechnet, sondern eine „normale“ Biegefläche, die nichts mehr mit einer Einflussfunktion zu tun hat.

Das Ergebnis ist eine genäherte Einflussfunktion für die jeweilige Schnittgröße am ausgewählten Punkt oder im ausgewählten Schnitt.

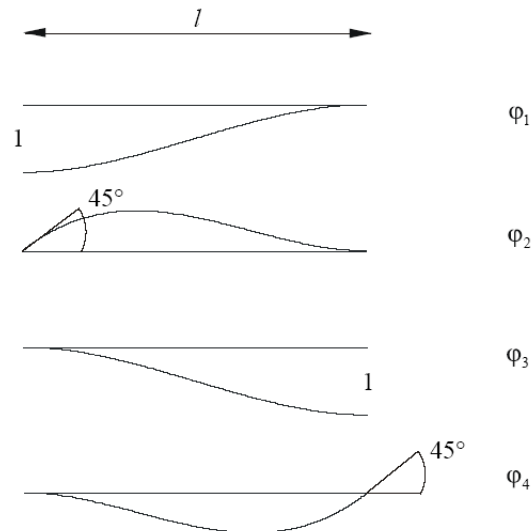


Abb. 2.16: Die vier Einheitsverformungen mit denen die Werte der Freiheitsgrade ermittelt werden.

2.6 Die Ergebnisse

Im Programm **Ergebnisse** können die Ergebnisse angesehen werden.

Wenn bereits eine Berechnung vorliegt, kann aus dem Hauptmenü mit dem Short Button das Programm **Ergebnisse** direkt aufgerufen werden.

-  = Short Button um die Ergebnisse der Berechnung zu bekommen.

2.6.1 Verformung

Bei der Darstellung der Verformung können Sie im Menü oder durch die linke Maustaste die **Auswahl** öffnen, um sich Biegemomente m_{xx} , m_{yy} , m_{xy} oder eine Querkraft q_x , q_y eine gleichzeitige Darstellung von ihnen, oder die Durchbiegung w darstellen zu lassen, siehe Abb. 2.17.

Durch drücken der rechten Maustaste und gleichzeitiger Bewegung kann die Sicht verändert werden. Das Mausexplorer verändert die Stärke der Verformung. Dieses kann auch durch + und – auf dem Nummernblock skaliert werden.

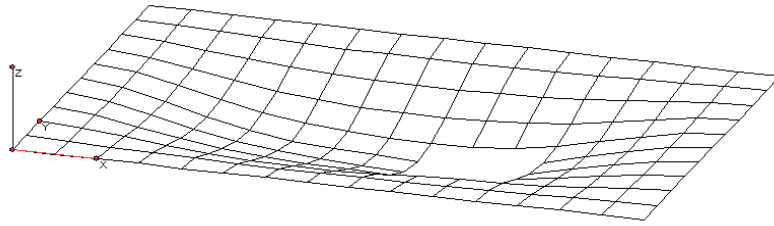


Abb. 2.17: Darstellung der Durchbiegung w .

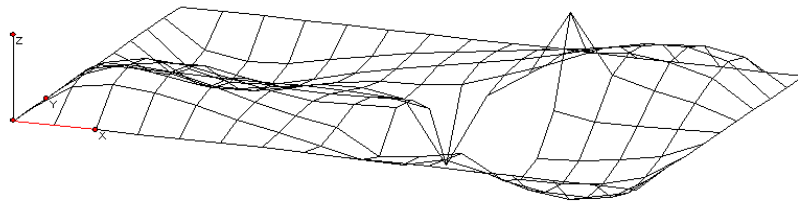


Abb. 2.18: Darstellung des Momentes m_{xy} .

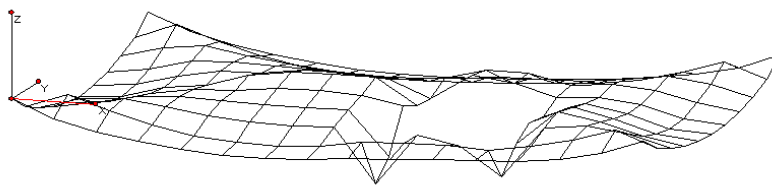


Abb. 2.19: Darstellung der Qerkraft q .

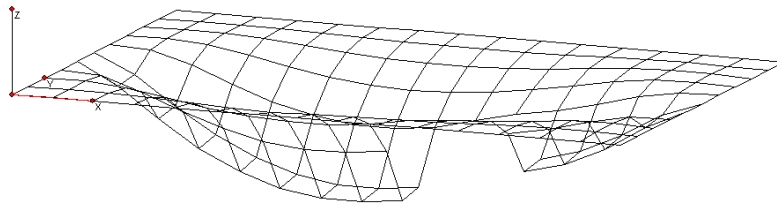


Abb. 2.20: Darstellung der Einflussfunktion für das integrale Moment m_{yy} .

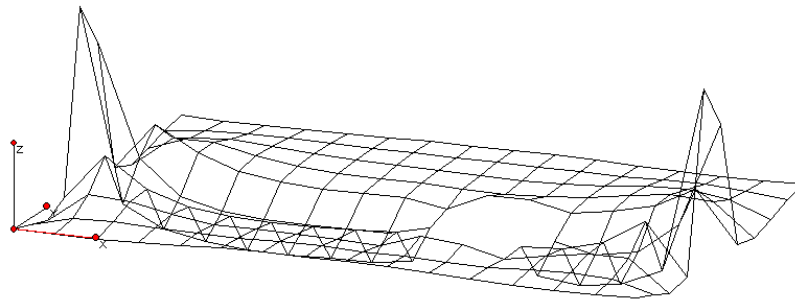


Abb. 2.21: Darstellung des Momentes m_{xx} der Einflussfunktion für das integrale Moment m_{yy} .

2.6.2 Schnittgrößen

Die Schnittgrößen können durch das Mausekran oder durch + und – auf dem Nummernblock je nach Wunsch, vergrößert und verkleinert werden.

Im Menü unter **Ansicht** kann zwischen den positiven und negativen Hauptmomenten oder deren gleichzeitiger Darstellung ausgewählt werden. Abb. 2.22 zeigt sowohl positive als auch negative Hauptmomente.

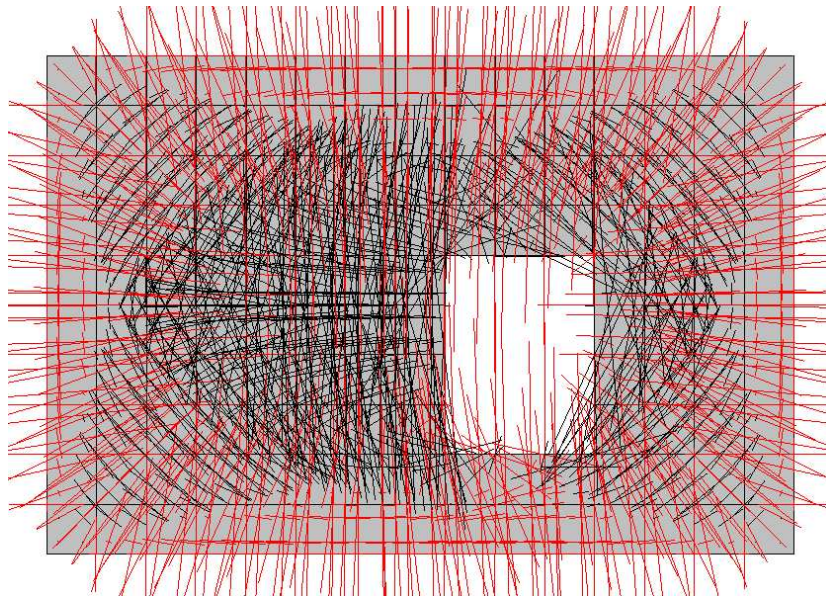


Abb. 2.22: Die Hauptmomente zeigen wie die Platte trägt.

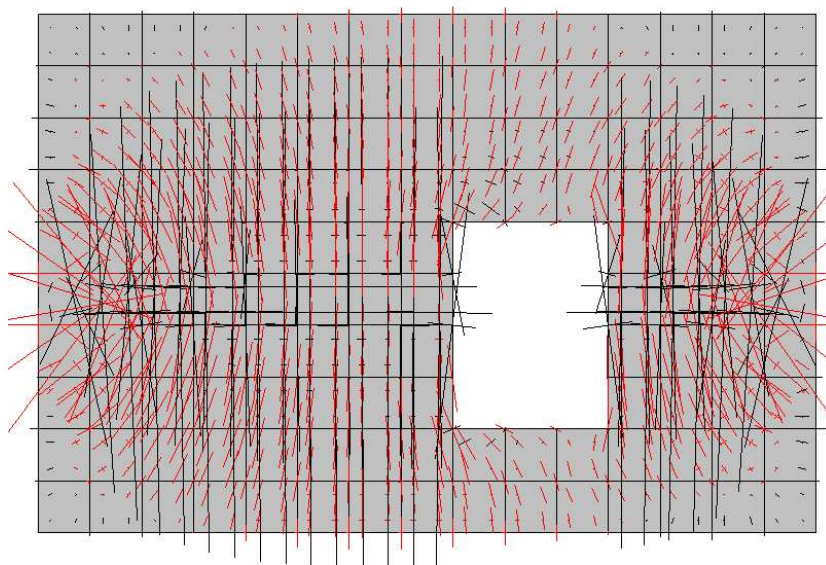


Abb. 2.23: Die Hauptmomente der Einflussfunktion.

2.6.3 Originallastfall p

Der Originallastfall p zeigt die Elementlasten an. Es können auch noch der Kirchhoffschub und die Kantenmomente im Menü aufgerufen werden. Da aber keine entsprechenden Lasten eingegeben wurden, haben sie keine Werte.

6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50					6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50					6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50					6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50					6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50

Abb. 2.24: Der Originallastfall p zeigt die Elementlasten an.

2.6.4 FE-Lastfall p_h

Der FE-Lastfall zeigt den Ersatzlastfall an. Da ein FE-Programm nicht mit der Originalbelastung rechnen kann, berechnet es einen gleichwertigen (äquivalenten) Ersatzlastfall, der somit rechenbar für das Programm wird. In Abb. 2.25 wird der Ersatzlastfall des im Programmteil **Belastung** eingegebenen Originallastfalls angezeigt. Es besteht keine direkte Ähnlichkeit mit dem Originallastfall. Es können auch noch der Kirchhoffschub und die Kantenmomente für den FE-Lastfall im Menü aufgerufen und dargestellt werden.

3.25	0.85	-0.42	-0.92	-1.00	-0.89	-0.76	-0.66	-0.58	-0.64	-0.85	-0.87	-0.40	0.81	3.09
0.80	0.29	0.05	-0.18	-0.26	-0.20	-0.17	-0.30	-0.38	-0.39	-0.44	-0.20	0.19	0.39	0.79
-0.67	-0.05	0.16	0.11	0.15	0.39	0.70	0.47	-0.71	-0.57	-0.75	0.50	0.75	0.13	-0.61
-1.49	-0.39	0.26	0.20	0.27	0.62	1.04	7.71	-7.13	-1.50	-5.80	7.40	0.74	-0.41	-1.51
-1.90	-0.70	-0.07	0.76	0.80	0.07	-0.70	-6.37					-6.07	-1.31	-1.02
-1.90	-0.70	-0.06	0.77	0.81	0.08	-0.28	-1.08					-0.92	-0.70	-0.88
-1.47	-0.38	0.29	0.24	0.31	0.52	-0.00	0.08					0.15	0.18	-0.30
-0.65	-0.04	0.18	0.16	0.23	0.52	1.07	3.07					0.79	0.64	0.18
0.80	0.29	0.05	-0.16	-0.21	-0.05	0.20	-1.82	0.48	-0.15	-1.71	0.75	0.38	0.39	0.76
3.24	0.84	-0.44	-0.97	-1.10	-1.06	-1.10	-1.11	0.03	1.06	-0.98	-1.52	-0.48	0.71	2.89

Abb. 2.25: Der FE-Lastfall zeigt den Ersatzlastfall.

2.6.5 Niveaulinien

Die Niveaulinien zeigen einen Höhenplan von den zu erwartenden Verformungen, die durch die Last auf die Platte hervorgerufen werden.

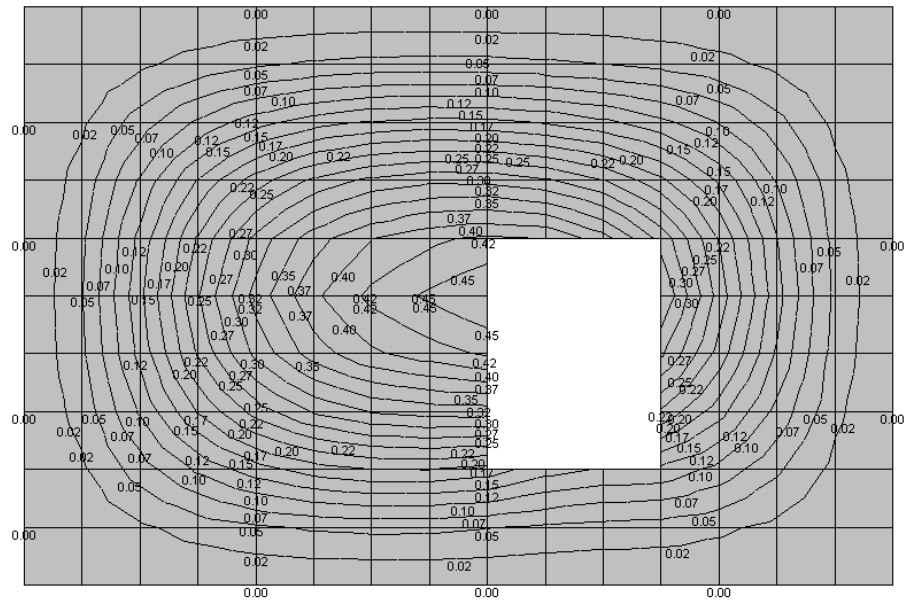


Abb. 2.26: Die Niveaulinien zeigen die Verformung in Millimeter an.

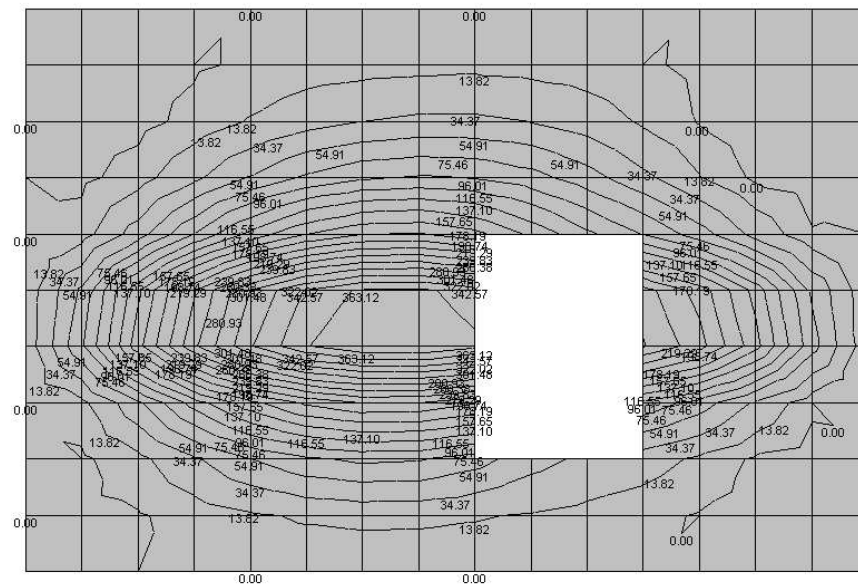


Abb. 2.27: Die Niveaulinien der Einflussfunktion.

2.6.6 Textausgabe

Wenn genaue Angaben für Verformungen, Schnittgrößen und Lagerreaktionen gebraucht werden, kann in der Textausgabe nachgesehen werden. Dort sind alle Ergebnisse tabellarisch aufgeführt und einsehbar.

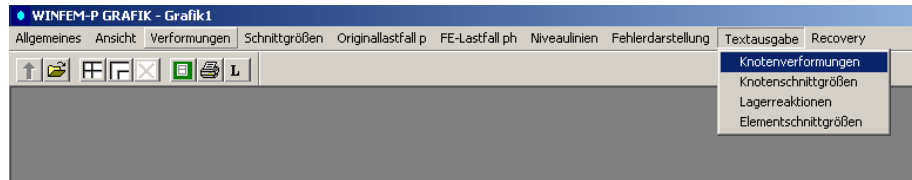


Abb. 2.28: In der Menüzeile kann eine Textausgabe der Knoten- und Elementwerte in Tabellenform aufrufen werden.

2.7 Recovery, eine weitere Berechnung

Unter **Ergebnisse** kann die Verbesserung von Punktwerten durchgeführt werden. In der Menüzeile wird einfach **Recovery** geöffnet. Es öffnet sich das in Abb. 2.29 dargestellte Fenster.

Hier kann unter **Koordinaten der Zielgröße** der Punkt definiert werden, welcher von Interesse ist. Es ist zu beachten, dass der Punkt in einem Element oder auf einem Knoten liegen muss, nicht aber auf einer Kante zwischen zwei Elementen. Da Unterschiede von Element zu Element bei FE-Berechnungen auftreten können, kann das Programm auf Kanten nicht entscheiden welchen Wert es nehmen soll. Der Punkt ist nicht eindeutig definiert. Das Problem tritt auch am Knoten für Schnittgrößen auf, hier wird jedoch der Mittelwert zwischen den verschiedenen Elementwerten gebildet und der Punkt ist eindeutig definiert. Deshalb weist das Programm vor der Berechnung darauf hin, ob der Punkt außerhalb, auf einer Kante oder einem Knoten liegt. Danach kann eine Berechnung durchgeführt werden. Soll ein Stützenanschnittsmoment oder eine Querkraft unter **Berechnung von Bemessungsgrößen** verbessert werden, ist zu beachten, dass sich die Berechnung in diesem Programm nur auf die Stütze bezieht, die mit der Knotennummer in das sich öffnende Eingabefenster eingetragen wurde. Grundsätzlich ist es möglich, eine Berechnung auch für mehrere Stützen durchzuführen. In diesem Programm ist diese Berechnungsmethode bis dato nur für eine Stütze implementiert.

Die Berechnung wird durch **Start** gestartet und wie beim Programm **Rechnen** durchgeführt. Danach kann jeweils mit **Ende** das Eingabefenster geschlossen werden. Nach dem Ende der Berechnung werden die Ergebnisse im unteren Teil gegenübergestellt.

Lokale Verbesserung von Zielgrößen

Koordinaten der Zielgröße
 x-Koordinate: y-Koordinate:

Zielgröße
☒ Verschiebung w ☐ Moment mxx ☐ Kirchhoffschub vx
☐ Verdrehung w,x ☐ Moment myy ☐ Kirchhoffschub vy
☐ Verdrehung w,y ☐ Querkraft qx ☐ Querkraft qy

Berechnung von Bemessungsschnittgrößen:
☐ Stützenanschnittsmoment mxx ☐ Querkraft qx in 1,5d
☐ Stützenanschnittsmoment myy ☐ Querkraft qy in 1,5d

Ergebnis
 FE-Lösung: Verbesserte Lösung:

Start Ende Einstellungen...

Abb. 2.29: Mit der Recovery-Option kann man einzelne Punktwerte genauer berechnen. In dem Eingabefenster kann bestimmt werden, wo und welche Zielwerte verbessert werden sollen.

Einstellungen

Berücksichtigung Randintegral
☒ ohne Randintegral
☐ mit Randintegral

Verformungsplot für
☒ 1. Originalproblem
☐ 2. verbesserte Einflussfunktion
☐ 3. reguläres Problem
☐ 4. Grundlösung

ACHTUNG
 Bei 1. beziehen sich die Ausgabedaten (Lastfall p, Lastfall ph, Spannungen, Fehlerbild) auf das Originalproblem.
 Bei 2. - 4. beziehen sich die Ausgabedaten IMMER auf das reguläre Problem.
 Bei 2. - 4. wird außerdem die Zielgröße nicht angezeigt.
 Zur Berechnung der Zielgröße muss der Originallastfall NEU eingegeben werden, eine neue FE-Berechnung UND eine neue Recovery-Berechnung gestartet werden.
 Bei 2. - 4. beziehen sich die Ausgabedaten stets auf das reguläre Problem. Die Zielgröße wird nicht angezeigt.

OK Abbrechen Default

Abb. 2.30: Es können vier Einstellungen bei der Recovery Berechnung vorgenommen werden.

2.7.1 Einstellungen bei der Recovery-Option

Es können vier Einstellungen vorgenommen werden, diese sind zur Berechnung und Darstellung der Ergebnisse und Teilergebnisse implementiert worden. Das **Originalproblem** verbessert den gewünschten Punktwert durch Anwendung der Randkorrektur in der FE-Berechnung. Das Ergebnis wird im Programm gespeichert und im Eingabefenster der Recovery-Option unten gegenübergestellt. Die **verbesserte Einflussfunktion** verbessert die Einflussfunktion und damit die Biegefläche, unter diesem Punkt werden keine Ergebnisse im Eingabefenster der Recovery-Option gegenübergestellt, das Ergebnis, das interessant ist und sich verändert hat ist die Durchbiegung w . Diese kann entweder unter **Verformung** oder in der **Textausgabe** betrachtet werden. Die Einstellung arbeitet mit $G_h^+ = g_0 + w_R$ die Punkte drei und vier können dieses Ergebnis noch aufschlüsseln. Das **reguläre Problem** zeigt nur w_R von $G_h^+ = g_0 + w_R$ und bezieht sich damit auch auf die Biegefläche, die Ergebnisse sind unter **Verformung** oder in der **Textausgabe** bei den Ergebnissen einzusehen. Die **Grundlösung** stellt nur g_0 von $G_h^+ = g_0 + w_R$ dar. Die Durchbiegung w ist wie Punkt zwei und drei unter **Ergebnisse**, **Verformung** oder in der **Textausgabe** einzusehen.

2.7.2 Die Randkorrektur

Der Recovery Befehl ist eine weitere Berechnung zur Verbesserung von Punktwerten. Dabei setzt WINFEM-P einen neuen Gedanken bei der Berechnung von FE-Lösungen ein. Es teilt die Greensche Funktion in eine Grundlösung und in einen regulären Anteil auf, bzw. in einen Randkorrekturterm.

$$G_0^+(y, x) = g_0(y, x) + u_R \quad (2.3)$$

Hierbei ist $g_0(y, x)$ die Grundlösung und u_R der Randkorrekturterm. Dabei ist die Grundlösung $g_0(y, x)$ bekannt, nur der reguläre Anteil u_R muss von WINFEM-P approximiert werden.

Der Randkorrekturterm u_R berechnet sich wie folgt. Die Randbedingungen werden am Rand von der Grundlösungen nicht erfüllt. Um diesen Fehler zu korrigieren, muss der Randwert als negative Belastung auf das System aufgebracht und damit korrigieren werden. Bei einem eingespannten Rand sind die Absenkung w und Verdrehung w_n gleich Null und damit gilt:

$$w = w_n = 0. \quad (2.4)$$

Hieraus folgt, dass die Greensche Funktion am Rand den Wert Null annehmen muss und dies gilt sowohl für die Absenkung als auch für die Verdrehung.

$$G_0^+(y, x) = g_0(y, x) + u_R = 0 \quad (2.5)$$

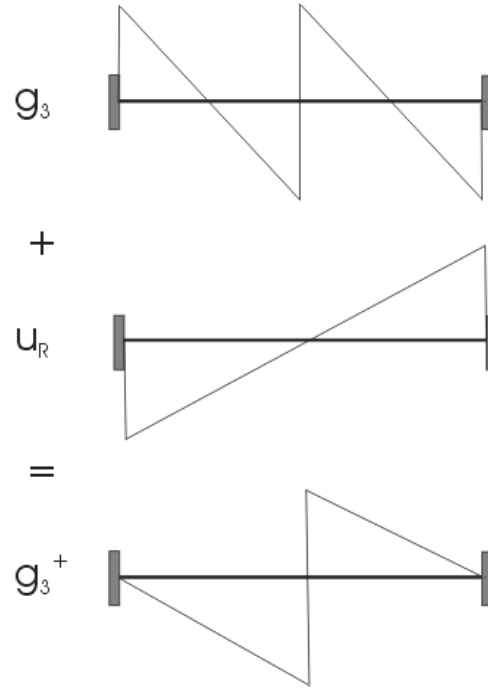


Abb. 2.31: Die Addition der Grundlösung g_3 mit der regulären Lösung u_R , der Randkorrektur, ergibt die verbesserte Greensche Funktion G_3^+ .

Und hieraus folgt, dass zur Korrektur der Randwert als negative Belastung aufgebracht werden muss.

$$\Rightarrow u_R = -g_0(y, x) \quad (2.6)$$

Damit wird die Greensche Funktion sozusagen wieder richtig gerückt, siehe Abb. 2.31.

2.7.3 Verbesserung der Biegefläche, das Stützenanschnittsmoment

Das Stützenanschnittsmoment verbessert im Gegensatz zur Randkorrektur nicht Punktwerte, sondern die Biegefläche. Die Theorie, die zur Verbesserung der Werte führt, ist aber ähnlich wie bei der Randkorrektur.

Die Grundlösung der Biegefläche ist bekannt.

$$g_0(y, x) = \frac{1}{8\pi k} r^2 \ln r \quad (2.7)$$

Der Unterschied ist jetzt, dass die Stelle an der Stütze nicht korrigiert werden muss, denn die Verschiebung w ist an der Stelle der Stütze gleich Null und dieses ist in der Gleichung der Grundlösung bekannt. Durch diese Voraussetzung kann die Biegefläche verbessert und damit ein besseres Stützenanschnittsmoment oder Querkraft ermittelt werden. Die verbesserte Biegefläche ergibt sich aus folgender Formel.

$$w^+ = (P g_0) + w_R \quad (2.8)$$

Dabei ist P die Last, die durch die Stütze in die Platte eingeleitet wird, g_0 die bekannte Grundlösung der Greenschen Funktion und w_R der Korrekturterm. w_R wird durch eine FE-Berechnung bestimmt.

$$\mathbf{K}\mathbf{w}_R = \mathbf{f} \quad (2.9)$$

Um verbesserte Werte für die Momente m_{xx} und m_{yy} oder die Querkräfte q_x, q_y zu erhalten, kann einfach w^+ in die folgenden Gleichungen zur Bestimmung der Schnittgrößen eingesetzt werden.

$$m_{xx}^+ = -K(w_{xx}^+ + \nu w_{yy}^+) \quad (2.10)$$

$$m_{yy}^+ = -K(w_{yy}^+ + \nu w_{xx}^+) \quad (2.11)$$

$$q_x^+ = -K(w_{xxx}^+ + w_{yyx}^+) \quad (2.12)$$

$$q_y^+ = -K(w_{yyy}^+ + w_{xyy}^+) \quad (2.13)$$

Obwohl die Ergebnisse über die Ableitungen der Biegefläche bestimmt werden ("Aufrauen" der Funktion), sind die Ergebnisse sehr gut und wesentlich besser als eine normale FE-Berechnung. Mit der Gl. (2.8) ist das Programm bisher nur in der Lage sich auf eine Stütze zu beziehen, jedoch könnten durch die Implementierung von

$$w^+ = \sum_i (P g_0) + w_R \quad (2.14)$$

alle Stützen in einem System berücksichtigt werden.

3 Schlusswort

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Beispiel mit verschiedenen Lasten und einer Integralgröße durchgerechnet. Zu den jeweiligen Programmpunkten wurden dann die Grundzüge der Bedienung, der Einstellung und der grundlegenden Theorie erläutert und dokumentiert. Ziel war es dabei, dem Anwender einen Überblick über das Programm zu verschaffen und ihm zu zeigen, was das Programm an dieser Stelle im Hintergrund macht. Dabei wurde vorausgesetzt, dass der Benutzer schon grundlegende Kenntnisse der Finitenelemente hat. Es wurde versucht die Berechnungen einfach und kurz zu erklären, damit möglichst schnell klar wird, was das Programm leistet. Um tiefer in die Materie einzutauchen, muss daher die Literatur aus dem Literaturverzeichnis zu Rate gezogen werden. Diese Anleitung soll den Erstanwendern den Einstieg in das Programm WINFEM-P erleichtern, ihm zeigen auf welchen Grundlagen es basiert, um die Ergebnisse besser bewerten zu können, die das Programm liefert.

Literatur

- [1] GRÄTSCH, T.: *L₂-Statik*. Dissertation Universität Kassel, 2002.
- [2] HARTMANN, F., KATZ, C.: *Statik mit finiten Elementen*. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [3] HARTMANN, F., KATZ, C.: *Structural Mechanics with Finite Elements*. Springer-Verlag, Berlin, 2003, im Druck.
- [4] HARTMANN, F.: *Methode der Randelemente*. Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [5] HARTMANN, F.: *The Mathematical Foundation of Structural Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [6] KUNOW, T.: *Verbesserte Berechnung von lokalen Zielgrößen mit der Methode der finiten Elemente unter Verwendung von Grundlösungen*. Projekt III, Fachgebiet Baustatik, Universität Kassel, 2003.
- [7] PANKE, T.: *Berechnung von Einflussfunktionen mit der Methode der finiten Elemente*. Diplomarbeit, Fachgebiet Baustatik, Universität Kassel, 2002.