

Optimaler Allgemeinentwurf von Strukturen

SCIA Group nv
Industrieweg 1007
3540 Herk-de-Stad (Belgium)
Tel.: (+32) 013 55.17.75
Fax: (+32) 013 55.41.75
Email: info@scia-online.com
Website: www.scia-online.com

By Lubomir Sabatka, Martin Novak,
Emiel Peltenburg, J.P. Rammant

Innovierende Technologie mit diskreter parametrierter Batchbearbeitung in SCIA • ESA PT 2007

Lubomir Sabatka, Martin Novak, Emiel Peltenburg, J.P. Rammant
SCIA International – www.scia-online.com

Inhalt

Einleitung
Optimierung von Systemen
Optimaler Entwurf von Strukturen
Optimierung in SCIA • ESA PT
Praxisbeispiele von Optimierung
Eingehende Forschung
Vorteile für Bauingenieure
Referenz

Einleitung

Die meisten CAE Softwareprogramme versprechen Ihnen, dass sie Ihnen beim Erstellen eines optimalen Entwurfs Ihrer Strukturen unterstützen. Halten Sie in Wirklichkeit auch diese Versprechen ein?

Unter "Optimierung von Strukturen" versteht man gemeinsam die Optimierung einiger ausgewählten Unterteile der Struktur. Ein Entwurfingenieur sucht beispielsweise die richtigen Mindestabmessungen für einen Querschnitt, der den Anforderungen des Entwurfscode entsprechen muss, er versucht die erforderliche Mindestanzahl Bolzen für eine spezifische Stahlverbindung zu finden, er sucht die erforderliche Mindestbewehrungszone in einem Betonbalken, usw. Obwohl alle Strukturunterteile möglichst optimal entworfen werden, bedeutet dies nicht, dass die Gesamtstruktur automatisch optimal ist, z.B. wenn sie aus dem Standpunkt der Materialkosten, der erforderlichen Bauzeit, der Lohnkosten, usw. betrachtet wird.

Den optimalen Entwurf einer Struktur findet man nur nach eingehender Überprüfung und sorgfältigem Vergleich vieler Varianten. Alle sind damit einverstanden, aber wie oft erfolgt dies auch tatsächlich in der Bauindustrie? Ein Designer arbeitet immer unter Druck des Kunden und gewöhnlich gibt es nicht viel Zeit, um Varianten auszuarbeiten.

Ein typisches Beispiel ist ein Stahlbetonbalken. Die Abmessungen des Querschnitts werden ausgewählt, die inneren Kräfte werden berechnet und anschließend wird die Bewehrung entworfen – optimal, selbstverständlich. Aber wer beschäftigt sich damit, die Höhe und die Breite des Balkens etwas zu variieren und auf diese Art und Weise aufgrund des Beton- und Stahlpreises einen optimalen Preis für den Gesamtbalken zu finden?

Die vorhandenen Softwareprogramme bieten jedem die Möglichkeit, eine Anzahl Varianten auszuprobieren, miteinander zu vergleichen und so die meist geeignete zu finden. Dies wäre bestimmt realistisch für kleinere Projekte, jedoch nicht für große und komplexe.

Optimierung von Systemen

Die Suche nach Optimierung wird hauptsächlich im Automotive Bereich und der Raumfahrtindustrie geführt. Der Schwerpunkt liegt im Bereich der Flüssigkeitsdynamikberechnung und der strukturellen Optimierung, insbesondere der Optimierung der Form.

Es gibt zahlreiche mathematische Verfahren, die den Bedürfnissen der Bauindustrie genau entsprechen. Das System wird gemeinsam über einer Anzahl Parametern beschrieben. Anschließend muss man das Ziel der Optimierung bestimmen – was ist die Absicht, was muss minimiert oder maximiert werden. Und es muss die Möglichkeit geben, dieses Ziel mit jeglichem Satz Parameter zu berechnen. Auf diese Art und Weise wird die "Zielfunktion" oder die "Preisfunktion" bestimmt.

Nach der Definition eines Parametersatzes und der Zielfunktion kann man über üblichen mathematischen Optimierungsverfahren z.B. das Gewicht eines Raumtransporters oder die Straßenverkehr optimieren.

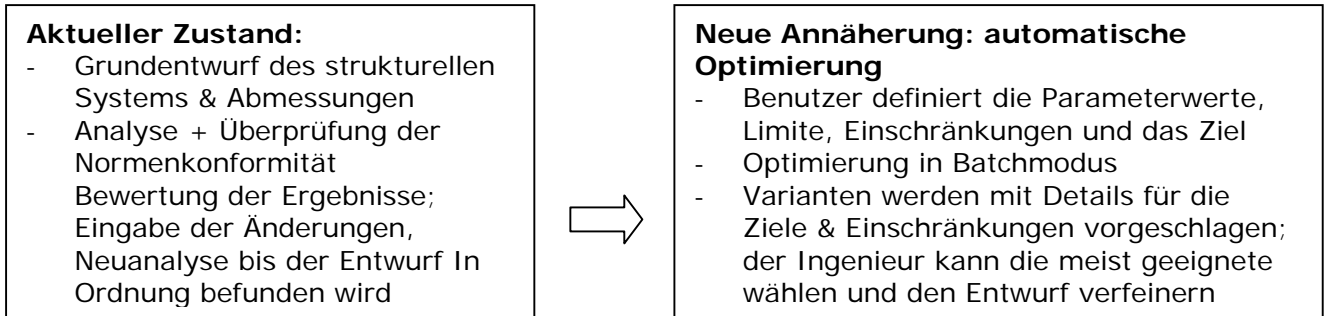
Optimaler Entwurf von Strukturen

Wenn es kräftige Softwareprogramme und deutliche mathematische Verfahren für den Entwurf struktureller Unterteile und die Optimierung von Systemen gibt, warum ist die Optimierung von Strukturen dann ja kein weit verbreitetes Phänomen?

Die aktuellen CAE Softwareprogramme verfügen nicht über die geeigneten Tools für die strukturelle Optimierung. Ein Überblick der erforderlichen Funktionen:

1. Funktionen für einen optimalen Entwurf spezifischer Strukturunterteile sowie Stahlbalken, Betonbalken, Stahlverbindungen, Fundamentsblöcke, usw. Normalerweise sucht man die Mindestabmessungen, -Maße oder -Anzahl. Der Unterteil muss zudem den Kriterien des entsprechenden Codes entsprechen.
2. Das Programm muss die Möglichkeit bieten, die Struktur zu parametrieren. Der Designer muss die festen und variablen Unterteile der Struktur bestimmen – Spannweiten, Höhen, Querschnittabmessungen, Platten- und Wanddicken, Lasten, usw. Jedes Element, das ggf. variieren kann, muss über einem unabhängigen Parameter beschrieben werden können.
3. Es muss die Möglichkeit geben, die Zielfunktion zu definieren, z.B. das Gewicht des erforderlichen Stahls, das Betonvolumen, das Gewicht der Bewehrung, aber auch die Höchstverschiebung oder ähnliches.
4. Das Softwaresystem muss die Zielfunktion für einen spezifischen Parametersatz bewerten können. Dies bedeutet, dass es eine Funktion geben muss, welche die Parametersätze lesen und einen Zielwert generieren kann.
5. Es muss einen Optimierungs-Solver vorhanden sein, d.h. ein Tool, das die unterschiedlichen Parametersätze generiert, die Zielfunktion berechnet und letztendlich den optimalen Parametersatz vorschlägt.

Wenn ein CAE System über diese Funktionen verfügt, sind die Wege zur Optimierung offen. Wir stellen eine innovierende Technologie vor, die eine verbesserte Entwurfsmethodologie zuzüglich eines allgemeinen CAE Programms bietet, was eine schrittweise Änderung ermöglicht.



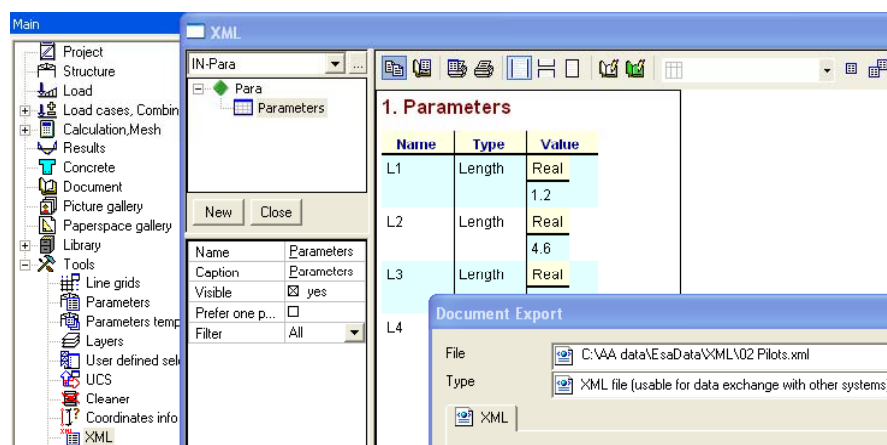
Optimierung in SCIA • ESA PT

SCIA • ESA PT 2007 integriert alle erforderlichen vorgenannten Funktionen.

Stahl- und Betonbalken können optimal entworfen werden. Die Optimierung von Stahlquerschnitten ist schon langjährig eingebürgert; der optimale Entwurf der Bewehrung wurde nur vor kurzem zur Verfügung gestellt. Auch unterschiedliche Stahlverbindungen können optimiert werden und es gibt ebenfalls die Möglichkeit, die erforderliche Mindestbewehrung in Platten und Wänden zu entwerfen. SCIA • ESA PT ermöglicht die Definition aller erforderlichen Elementoptimierungen und speichert und wiederholt diese nach jeder Änderung der Eingabedaten einer Struktur.

Das Parametrieren der Struktur ist eine Basismodelliermöglichkeit in SCIA • ESA PT. Fast jede Entität, jedes Element des Entwurfsprojekts kann über einem benutzerdefinierten Parameter bestimmt werden. Parameter werden Variablen zugewiesen, von den Abmessungen der strukturellen Elemente und Querschnitte, Belastungen und Massen über der erforderlichen Zeit für das Betongießen bis zu dem Durchmesser oder der Deckung der Stahlbewehrung.

SCIA • ESA PT verfügt ebenfalls über eine allgemeine XML Textschnittstelle, welche die Änderung der strukturellen Daten von "außen" und das Einlesen jedes erforderlichen Werts für ein Projekt erlaubt. Der Benutzer definiert im XML Dokument die zu integrierenden Entwurfswerte. Alle ESA Ausgabedokumente sind "lebende" Dokumente, die nach der Änderung und Neurechnung des Projekts aktualisiert werden können. Das XML Dokument spielt die Rolle der Zielfunktionen ohne irgendwelche Einschränkung. Das untenstehende



Praxisbeispiel zeigt das Definitionsverfahren für die XML Datei.

SCIA • ESA PT arbeitet auch im "versteckten" Modus. Das Projekt kann geändert werden, das Berechnungsverfahren kann gestartet werden, alle definierten Dokumente können aktualisiert werden und alle Werte können im Dokument eingelesen werden und dies alles von einem

weiteren Programm als SCIA • ESA PT aus. Zu diesem Zweck gibt es eine zusätzliche Anwendung, ESA_XML.exe, die eine leichte Anbindung an einer externen Softwareanwendung erlaubt.

Der einfachste Optimierungs-Solver ist derjenige, der alle möglichen Sätze Eingabeparameter generiert und eine Zielfunktion für jeden Satz berechnet. Auf diese Art wird der Mindest- (oder Höchst-)Zielwert mit dem optimalen Satz Eingabeparametern gefunden. Dieses Verfahren ist einfach und zuverlässig. Wenn man alle möglichen Varianten berechnet, findet man schließlich die meist geeignete. Das einzige Problem bei Systemen mit vielen Parametern ist eine erhebliche Steigerung der Anzahl Varianten.

Diese Art von "Batch Optimiser" ist jetzt auch in SCIA • ESA PT vorhanden. Der Benutzer muss nur noch die Limite und den Variationsschritt für die Parameter definieren. Alle Varianten werden berechnet und die Diagramme mit den Ergebnissen werden in Excel generiert.

Die letzte Funktionalität für das Optimieren ist der tatsächliche Optimierungs-Solver. Dieses Tool verwendet die gleichen Eingabedaten als der "Batch Optimiser" – einschließlich der Limite und Schritte für die Parameter. Hier werden jedoch nicht alle Varianten berechnet, es werden nur einige "vorgeschlagen". Der optimale Satz Parameter werden aus den Ergebnissen der Zielfunktion abgeleitet. Die Magie der Qualität dieses Solvers befindet sich in seiner hervorragenden "Vorschlagungsfähigkeit". Desto besser der Solver, desto weniger Variantenberechnungen erfordert sind.

SCIA arbeitet zu diesem Thema mit der Prager Universität für Bauwirtschaften zusammen. Im aktuellen Stand wird der Optimierungs-Solver der Universität an SCIA • ESA PT angebunden. Der Solver benutzt einen stochastischen Algorithmus von "Simuliertem Annealing" aufgrund allgemeiner genetischer Algorithmen. Dies erlaubt ebenfalls eine Multi-Parameter-Optimierung, so dass mehr Ergebniswerte überprüft werden können. Dieses Verfahren gewährleistet, dass mehr "optimale" Lösungen gefunden werden, weil es Lokalextremen, die vom Entwurfsstandpunkt aus sinnvoll sind, sucht.

Praxisbeispiele von Optimierung

Es gibt 4 unterschiedliche Typen struktureller Optimierung:

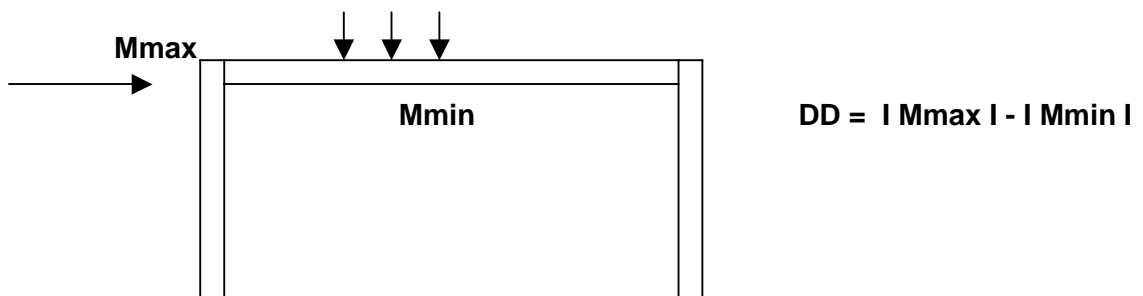
- **Topologie**optimierung, dies bedeutet eine Struktur finden, ohne ihre Schlussform zu kennen; dies beinhaltet, dass Elemente oder FEM Netzunterteile während der Berechnung der Variantenlösungen geändert/hinzugefügt werden.
- **Form**optimierung: die Topologie der Struktur ist vom Anfang an gekannt, aber es gibt bestimmte Unterteile, in den z.B. hohe Beanspruchungen zu Problemen führen können. Die Formparameter werden deshalb optimiert, um die Beanspruchungen zu minimieren.
- **Abmessung**soptimierung: eine Struktur wird von einem Satz Abmessungen, Maßen oder Querschnitten bestimmt; diese werden kombiniert um die gewünschten optimalen Kriterien zu erreichen.
- **Topographie**optimierung, dies bedeutet eine geeignete Form für eine Struktur finden (zum Beispiel Zelt, Membran, Brücke).

Viele Beispiele von struktureller Optimierung sind manifest in der täglichen Entwurfspraxis vorhanden:

- Das Optimalverhältnis zwischen den Steifigkeiten von Balken und Stützen suchen
- Die optimale Dicke für Betonplatten finden
- Die optimalen Abmessungen für Betonbalken bestimmen
- Die optimale Form für ein nachgespanntes Vorspannelement finden
- Optimierung der Position von Fundamentspfählen
- Empfindlichkeitsanalyse der Parameter des Untergrunds
- Die kostengünstigste Stahlverbindung entwerfen
- Das Gewicht einer Stahlstruktur für einen vorausbestimmten Rahmentyp minimieren
- Die optimale Definition für Brückenspannweiten suchen
- Die Höchsttragfähigkeit für einen Kran in unterschiedlichen geometrischen Positionen finden

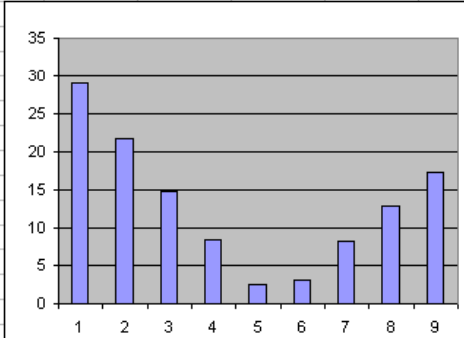
Um die diskrete parametrisierte Batchbearbeitung in SCIA • ESA PT erläutern, beschreiben wir einige Beispiele:

A. In einem Rahmen einen Balken und eine Stütze mit solchen Abmessungen finden, dass das Biegemoment am Ende und in der Mitte des Balkens gleich ist.



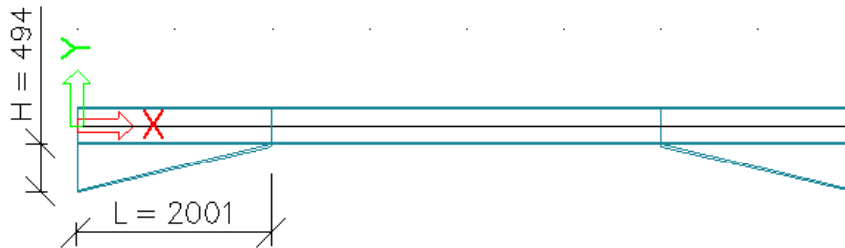
Das Batchverfahren führt zu der nachstehenden Ausgabetablelle:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Hbeam [m]	Hcol [mm]	Max [kNm]	Min [kNm]	DD [kNm]						
380	280	136,03	-107,013	29,017						
380	290	132,287	-110,584	21,702						
380	300	128,773	-113,919	14,855						
380	310	125,483	-117,023	8,461						
380	320	122,407	-119,906	2,502						
380	330	119,54	-122,575	3,035						
380	340	116,868	-125,043	8,175						
380	350	114,378	-127,323	12,945						
380	360	112,064	-129,423	17,358						



B. Die Länge und Tiefe eines Bogens optimieren

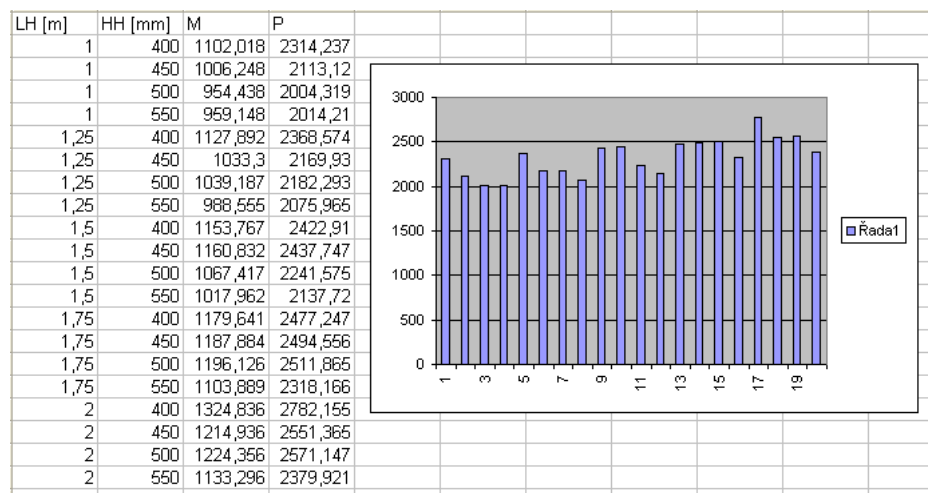
Nehmen wir einen Balken mit Bogen; der Balken ist ein HEA Profil, der Bogen ein IPE Profil. Die Abmessungen des Bogens sind parametrisiert; das Profil des Hauptbalkens ist über einer üblichen SCIA • ESA PT Elementoptimierung optimiert.



In jedem Schritt wird der Bogen geändert, die Struktur berechnet und der Balken optimiert. Das Gesamtgewicht wird gemeldet; der Preis des Materials für Balken und Bogen wird aufgrund eines vorausgesetzten Preises für 1 kg Stahl (z.B. 2,1 Euro) berechnet.

Die untenstehende Tabelle zeigt für die berechnete L (L Bogen), H (Höhe Bogen) die Werte des Balkengewichts (M) und des Preises (P).

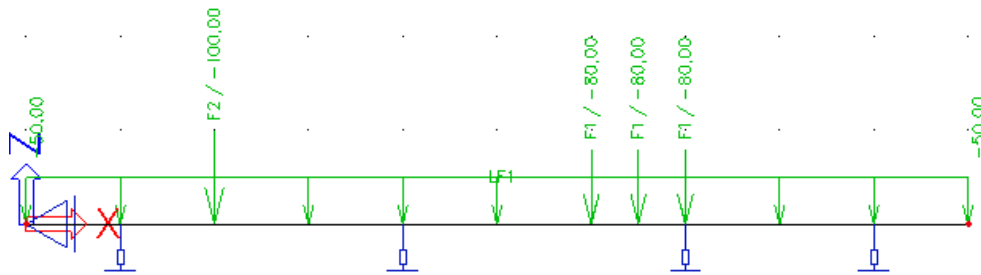
Für jede Bogenlänge wird die optimale Höhe berechnet. Dies bedeutet, dass mehrere lokale Mindestwerte gefunden werden.



Sie bemerken, dass alle Varianten den Anforderungen der Norm entsprechen, aber dass der Preis in einem ausgedehnten Bereich variiert.

C. Optimierung der Position von Pfählen.

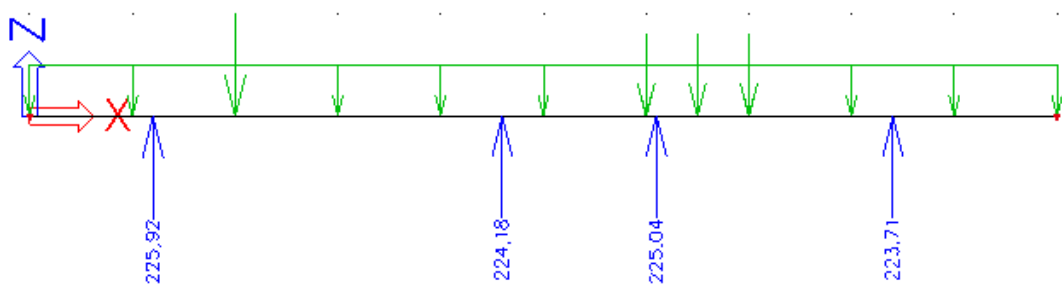
Der Benutzer muss einen von Pfählen unterstützten Fundamentsbalken entwerfen. Ein Idealzustand wäre, wenn die Reaktionskraft in allen Pfählen gleich ist.



Der Benutzer kann die Limite für die Verschiebung der Stützen bestimmen, jede Variante wird berechnet und die Reaktionen werden bewertet. Die Zielfunktion kann eine einfache Formel sein, welche die Quadratsumme der Abweichungen eines durchschnittlichen Reaktionswerts berechnet.

L1 [m]	L2 [m]	L3 [m]	L4 [m]	R1 [kN]	R2 [kN]	R3 [kN]	R4 [kN]	R [kN]
1,1	4,6	6,1	8,2	217,397	221,908	225,697	233,858	12,083
1,1	4,6	6,1	8,3	219,58	223,745	226,094	229,441	7,18
1,1	4,6	6,1	8,4	221,58	225,586	226,678	225,015	3,812
1,1	4,6	6,2	8,2	219,897	223,372	225,472	230,119	7,402
1,1	4,6	6,2	8,3	222,036	225,238	225,811	225,776	3,127
1,1	4,6	6,2	8,4	223,997	227,104	226,342	221,418	4,443
1,1	4,7	6,1	8,2	220,634	222,376	224,541	231,309	8,102
1,1	4,7	6,1	8,3	222,825	224,165	224,958	226,913	2,961
1,1	4,7	6,1	8,4	224,833	225,964	225,556	222,508	2,675
1,1	4,7	6,2	8,2	223,167	223,803	224,279	227,611	3,436
1,1	4,7	6,2	8,3	225,314	225,623	224,637	223,286	1,797
1,1	4,7	6,2	8,4	227,283	227,448	225,183	218,946	6,896
1,2	4,6	6,1	8,2	221,671	220,56	224,111	232,517	9,368
1,2	4,6	6,1	8,3	223,888	222,369	224,484	228,119	4,222
1,2	4,6	6,1	8,4	225,921	224,182	225,043	223,714	1,688
1,2	4,6	6,2	8,2	224,201	221,999	223,874	228,786	4,992
1,2	4,6	6,2	8,3	226,373	223,836	224,188	224,463	1,966
1,2	4,6	6,2	8,4	228,366	225,673	224,695	220,126	5,942
1,2	4,7	6,1	8,2	224,954	220,993	222,953	229,96	6,673
1,2	4,7	6,1	8,3	227,179	222,753	223,345	225,584	3,543
1,2	4,7	6,1	8,4	229,219	224,523	223,918	221,2	5,772
1,2	4,7	6,2	8,2	227,516	222,395	222,678	226,271	4,45
1,2	4,7	6,2	8,3	229,697	224,185	223,011	221,967	5,963
1,2	4,7	6,2	8,4	231,697	225,981	223,532	217,649	10,084

Wenn wir diese Funktion minimieren, werden alle Pfähle der gleichen Kraft unterzogen.



Eingehende Forschung

Die Prager Universität für Bauwirtschaften hat ein erweitertes Forschungsprogramm zum Thema Optimierung. Die Forschung konzentriert sich auf Algorithmen, die für konstruktive Praxisprobleme mit typischen diskreten Eingabefunktionen (z.B. einen Satz verfügbarer Materialien, Walzprofile oder Stahlröhre) in Verbindung mit einer komplizierten Abhängigkeit der letztendlichen Zielfunktion von diesen Eingabevervariablen geeignet sind. Weil die Struktur zudem unterschiedlichsten Kriterien entsprechen muss, muss es ebenfalls die Möglichkeit geben, sowohl Mehrkriterien-Probleme als auch Mehrkriterien-Einschränkungen zu bearbeiten, obwohl diese sich üblicherweise schwer in einer schließenden mathematischen Form beschreiben lassen. Diverse Optimierungsalgorithmen wurden schon entwickelt, aber die Optimierung von Real-Life Strukturen erfordert noch immer eine sehr lange Berechnungsdauer. Verfahren, die für dieses Problem eine Lösung bieten, basieren sich auf numerische Annäherungen, die zu der Minimierung der Anzahl Berechnungen führen, die sog. "Response Surface" Verfahren. Die artifizielle Intelligenz verwendet normalerweise Verfahren sowie Neuronnetzwerke sowie das sog. "radiale Basisfunktionsnetzwerk".

Die hier vorgestellten Optimierungsverfahren bieten den Vorteil, dass sie nicht die Globalextreme, sondern die Lokalextreme einer Zielfunktion suchen und dadurch auch mehr Lokalextreme gefunden werden. Jede dieser Extremen hat eine bestimmte Bezeichnung und der Designer muss die Varianten vom Standpunkt der Praxis, der Konstruktionsaspekte, usw. bewerten.

Eine weitere Möglichkeit zur Einschränkung der langen Berechnungszeit ist das Verfahren der Parallel- oder verteilten Berechnung. Die meisten Anwender von SCIA Softwareprogrammen verfügen über ein Computernetzwerk mit mehreren Computern, die weniger als 24 Stunden per Tag benutzt werden. Oft werden sie im Tag und in jedem Fall nachts ausgeschaltet. Insbesondere nachts führen sie gewöhnlich keine tatsächlichen Berechnungsaufgaben aus. Algorithmen, die diese freie Kapazität verwenden können, sind deshalb ein nützliches Tool. Das Szenario ist folgendermaßen: der Designer – der sich in einer bestimmten Entwurfsphase einer Struktur befindet – definiert die Bereiche, Einschränkungen, Anforderungen, usw. Das Optimierungsalgorithmus läuft nachts und wenn der Designer den nächsten Tag im Büro kommt, kann er eine bzw. mehrere Varianten, die als optimale Lösungen für die entworfenen Struktur berechnet wurden, wählen.

Vorteile für Bauingenieure

Der optimale Entwurf von Strukturen wird das Entwurfsverfahren eingehend ändern; ein "Zukunftstraum" wird zu Wirklichkeit. Weil die mathematischen Verfahren sich immer weiterentwickeln und die Geschwindigkeit der Computer immer ansteigt, verbessert die Optimierung erheblich die Qualität des praxisorientierten Entwurfsverfahrens.

Referenz

Matej Leps, Optimierung einfacher und mehrfacher Objekte im Bau mit Anwendungen, PhD Thesis, Prager Technische Universität, 2004