

Optimaal algemeen ontwerp van structuren

Innoverende technologie met discrete parametrische batchverwerking in SCIA • ESA PT 2007

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

Inhoud

Inleiding
Optimalisatie van systemen
Optimaal ontwerp van structuren
Optimalisatie in SCIA • ESA PT
Praktijkvoorbeelden van optimalisatie
Doorgedreven onderzoek
Voordelen voor bouwkundige ingenieurs
Referenties

Inleiding

De meeste CAE softwareprogramma's spiegelen u voor dat zij u helpen bij het creëren van een optimaal ontwerp van uw structuren. Maken zij in werkelijkheid deze beloften ook waar?

Als men gewoonlijk over de optimalisatie van structuren spreekt, bedoelt men in feite het optimaliseren van enkele geselecteerde onderdelen van de structuur. Een ontwerpingenieur is bijvoorbeeld op zoek naar de juiste minimale afmetingen voor een doorsnede die de vereisten van de ontwerpcode moet vervullen, hij of zij tracht het minimumaantal benodigde bouten voor een specifieke staalverbinding te vinden, zoekt de minimaal vereiste wapeningszone in een betonnen balk enz. Hoewel alle structuuronderdelen zo optimaal mogelijk ontworpen worden, betekent dit niet automatisch dat de volledige structuur optimaal is, bijvoorbeeld als men haar vanuit het standpunt van de materiaalkosten, de benodigde bouwtijd, de loonkosten, enz. beschouwt.

Het optimale ontwerp van een structuur vindt men na het zorgvuldig testen en vergelijken van vele varianten. Iedereen is het daarmee eens, maar hoe vaak gebeurt dit ook daadwerkelijk in de bouwnijverheid? De ontwerper werkt altijd onder grote druk van de klant en meestal is er niet veel tijd om varianten uit te werken.

Een typisch voorbeeld is een balk in gewapend beton. De afmetingen van de doorsnede worden gekozen, de interne krachten worden berekend en vervolgens wordt de wapening – optimaal, uiteraard – ontworpen. Maar wie denkt er aan om een beetje met de hoogte en de breedte van de balk te spelen en zo een optimale prijs voor de volledige balk te zoeken op basis van de prijs van het beton en het staal?

De bestaande softwaremiddelen bieden nochtans iedereen de mogelijkheid om dit te doen; het is alleen maar een kwestie van een aantal varianten uit te proberen en te vergelijken om de meest geschikte te vinden. Dit zou realistisch zijn voor kleinere projecten, maar zeker niet voor uitgebreide en complexe.

Optimalisatie van systemen

Het onderzoek naar optimalisatie wordt voornamelijk gevoerd in de automotive sector en de ruimtevaartindustrie, met de nadruk op het berekenen van de vloeistofdynamica en de structurele optimalisatie, hoofdzakelijk van de vorm.

Er bestaan talloze mathematische methoden die perfect aan de behoeften van de bouwindustrie beantwoorden. Het systeem wordt doorgaans beschreven aan de hand van een aantal parameters. Vervolgens moet men het doel van de optimalisatie bepalen – wat is de bedoeling, wat moet er geminimaliseerd of gemaximaliseerd worden. En dit doel moet met eender welke set parameters berekend kunnen worden. Op die manier wordt de “doelfunctie” of de “prijsfunctie” bepaald.

Na het definiëren van een parameterset en de doelfunctie kan men de gebruikelijke mathematische optimalisatiemethodes gebruiken, ongeacht of men het gewicht van een spaceshuttle of het verkeer op straat optimaliseert.

Optimaal ontwerp van structuren

Als er krachtige softwaremiddelen en duidelijke mathematische methoden beschikbaar zijn voor het ontwerpen van structurele onderdelen en de optimalisatie van systemen, waarom is de optimalisatie van structuren dan geen ingeburgerde gewoonte?

De huidige CAE softwaresystemen zijn onvoldoende uitgerust voor de structurele optimalisatie. Zij zouden toch een aantal vereiste functies moeten integreren. Een overzicht:

1. Functies voor het optimale ontwerp van specifieke structuuronderdelen zoals staalbalken, betonbalken, staalverbindingen, funderingsblokken, enz. Gewoonlijk is men op zoek naar de minimumafmetingen, -maten of aantallen. Het onderdeel moet bovendien voldoen aan de criteria van de bijbehorende code.
2. Het programma moet de mogelijkheid bieden de structuur te parametriseren. De ontwerper moet de vaste en de variabele onderdelen in de structuur bepalen – overspanningen, hoogtes, afmetingen van doorsneden, dikte van platen en muren, belastingen... Ieder element dat kan variëren moet met behulp van een onafhankelijke parameter beschreven kunnen worden.
3. De doelfunctie moet gedefinieerd kunnen worden. Dit kan het gewicht van het benodigde staal, het volume beton, het gewicht van de wapening, maar ook de maximale verplaatsing of eender wat zijn.
4. Het softwaresysteem moet de doelfunctie voor een specifieke set parameters kunnen evalueren. Dit betekent dat er een functie aanwezig moet zijn, die de parametersets kan lezen en een doelwaarde kan genereren.
5. Er moet een optimalisatie solver beschikbaar zijn. Dit is een tool dat verschillende parametersets genereert, de doelfunctie berekent en uiteindelijk de optimale set parameters voorstelt.

Als een CAE systeem over deze functies beschikt, ligt de weg naar de optimalisatie open. We stellen een innoverende technologie voor, die een verbeterde ontwerpmethodologie biedt, bovenop een algemeen CAE programma, waardoor een graduele wijziging mogelijk wordt.

Huidige status:

- Basisontwerp van het structurele systeem & afmetingen
- Analyse + codecontroles
Beoordeling van de resultaten;
invoer van wijzigingen, nieuwe analyse totdat het ontwerp goed bevonden wordt



Nieuwe visie: automatische optimalisatie

- Gebruiker definieert de parameterwaarden, limieten, beperkingen en het doel
- Optimalisatie in batchmodus
- Varianten worden voorgesteld met details voor de doelen & beperkingen; de ingenieur kan de meest geschikte kiezen en het ontwerp verfijnen

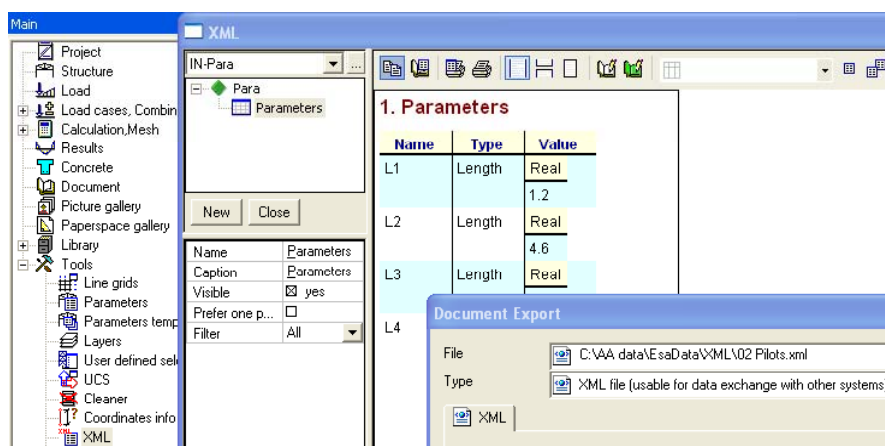
Optimalisatie in SCIA • ESA PT

SCIA • ESA PT 2007 integreert alle vereiste functies, die hierboven beschreven werden.

Staal- en betonbalken kunnen optimaal ontworpen worden. De optimalisatie van stalen doorsneden is al jarenlang ingeburgerd; het optimale ontwerp van wapening werd pas recentelijk beschikbaar gemaakt. Ook diverse staalverbindingen kunnen geoptimaliseerd worden en het ontwerp van de minimaal vereiste wapening in platen en muren is beschikbaar. Met SCIA • ESA PT kunnen alle benodigde elementoptimalisaties gedefinieerd worden; het programma onthoudt ze en herhaalt ze na iedere wijziging van de invoergegevens van een structuur.

Het parametriseren van de structuur is een basismogelijkheid voor het modelleren in SCIA • ESA PT. Nagenoeg iedere entiteit, ieder element van het ontwerpproject kan met een gebruikergedefinieerde parameter gedefinieerd worden. Parameters worden aan variabelen toegewezen, te beginnen met de afmetingen van de structurele elementen en doorsneden, belastingen en massa's, via de benodigde tijd voor het storten van het beton tot en met bijvoorbeeld de diameter of de dekking van de staalwapening.

SCIA • ESA PT is eveneens uitgerust met een algemene XML tekstinterface, waarmee de structurele gegevens van "buitenaf" gewijzigd kunnen worden en iedere benodigde waarde voor een project ingelezen kan worden. De gebruiker definieert in het XML document de te integreren ontwerpwaarden. Alle ESA uitvoerdocumenten zijn "levende" documenten, die geüpdatet kunnen worden na het wijzigen en herberekenen van het project. Het XML document vervult de rol van de doelfuncties zonder enige beperking. Het praktijkvoorbeeld hieronder toont hoe het XML bestand gedefinieerd wordt.



SCIA • ESA PT werkt ook in "hidden" modus. Het project kan gewijzigd worden, het berekeningsproces kan gestart worden, alle gedefinieerde documenten kunnen hernieuwd en geüpdatet worden en alle waarden in het document kunnen ingelezen worden en dat allemaal vanuit een ander programma dan SCIA • ESA PT. Om dit te realiseren, is er een extra toepassing, ESA_XML.exe, die gemakkelijk op een externe softwaretoepassing aangesloten kan worden.

De eenvoudigste optimalisatie solver is diegene die alle mogelijke sets invoerparameters genereert en een doelfunctie voor iedere set berekent. Op die manier wordt de minimum (of maximum) doelwaarde gevonden met de optimale set invoerparameters. Deze werkwijze is eenvoudig en betrouwbaar. Als men alle mogelijke varianten berekent, vindt men uiteindelijk de meest geschikte. Het enige probleem bij systemen met vele parameters is een drastische stijging van het aantal varianten.

Dit soort "batch optimiser" is nu beschikbaar in SCIA • ESA PT. De gebruiker moet alleen maar de limieten en de variatiestap voor de parameters definiëren. Alle varianten worden berekend en de diagrammen met de resultaten worden in Excel gegenereerd.

De laatste functie voor het optimaliseren is de echte optimalisatie solver. Deze solver maakt gebruik van dezelfde invoer als de "batch optimiser" – met de limieten en stappen voor de parameters. Hier worden echter niet alle varianten berekend, er worden slechts enkele "voorgesteld"; de optimale set parameters wordt afgeleid uit de resultaten van de doelfunctie. De magische van de kwaliteit van deze solver is zijn uitstekende "voorstellingsvermogen". Hoe beter de solver, hoe minder variantenberekeningen er vereist zijn.

SCIA werkt voor dit onderwerp samen met de Universiteit voor Burgerlijke Bouwkunde van Praag. In de huidige stand van zaken wordt de optimalisatie solver van de universiteit aangesloten op SCIA • ESA PT. De solver gebruikt een stochastisch algoritme van "Gesimuleerde Annealing" op basis van algemene genetische algoritmes. Hierdoor wordt ook een multi-parameter optimalisatie mogelijk, waardoor meer resultaatwaarden gecontroleerd kunnen worden. Deze methode garandeert dat er meer "optimale" oplossingen gevonden worden, want zij zoekt lokale extremen die zinvol zijn vanuit het ontwerpstandpunt.

Praktijkvoorbeelden van optimalisatie

Er zijn 4 verschillende soorten structurele optimalisatie:

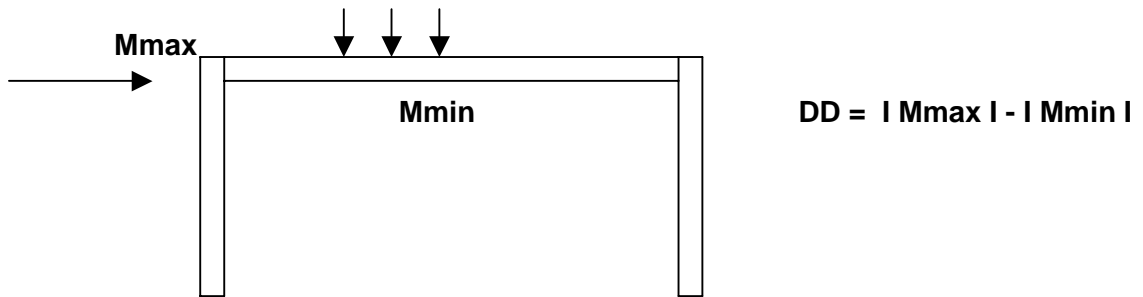
- **Topologie** optimalisatie, dit betekent een structuur vinden zonder haar uiteindelijke vorm te kennen; dit houdt in dat er tijdens de berekening van de variantenoplossingen elementen of FEM netonderdelen verwijderd/toegevoegd worden
- **Vorm** optimalisatie: de topologie van de structuur is vanaf het begin gekend, maar er zijn bepaalde onderdelen, waar bijvoorbeeld hoge spanningen problemen kunnen veroorzaken. De vormparameters worden dus geoptimaliseerd om de spanningen te minimaliseren.
- **Afmetingen** optimalisatie: een structuur wordt gedefinieerd door een set afmetingen, maten of doorsneden; deze worden gecombineerd om de gewenste optimale criteria te behalen.
- **Topografie** optimalisatie, dit betekent een geschikte vorm vinden voor een structuur (bijvoorbeeld tent, membraan, brug).

Vele voorbeelden van structurele optimalisatie zijn manifest aanwezig in de dagdagelijkse ontwerp praktijk, we noemen er enkele op

De optimale verhouding tussen de stijfheden van balken en kolommen zoeken
De optimale dikte voor betonplaten vinden
De optimale afmetingen voor betonbalken bepalen
De optimale vorm voor een nagespannen voorspanelement vinden
Optimalisatie van de positie van funderingspalen
Gevoeligheidsanalyse van de parameters van de ondergrond
De meest prijsgunstige staalverbinding ontwerpen
Het gewicht van een staalstructuur voor een vooraf bepaald type frame minimaliseren
De optimale definitie voor brugoverspanningen zoeken
De maximale draaglast voor een kraan in diverse geometrische posities vinden

Om de discrete parametrische batchverwerking in SCIA • ESA PT te illustreren, zetten we enkele kleine voorbeelden uiteen:

A. In een frame een balk en een kolom met zulke afmetingen vinden dat het buigmoment aan het uiteinde en in het midden van de balk gelijk is.

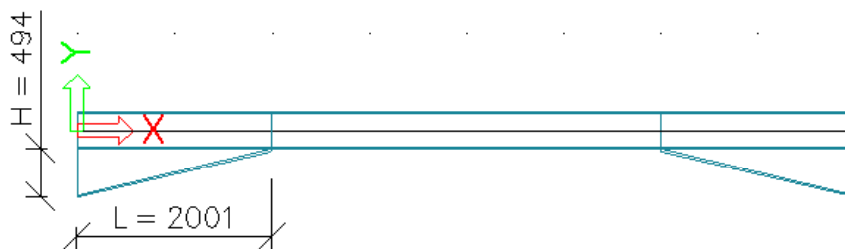


Het batchproces leidt tot de volgende uitvoertabel:

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. De lengte en diepte van een boog optimaliseren

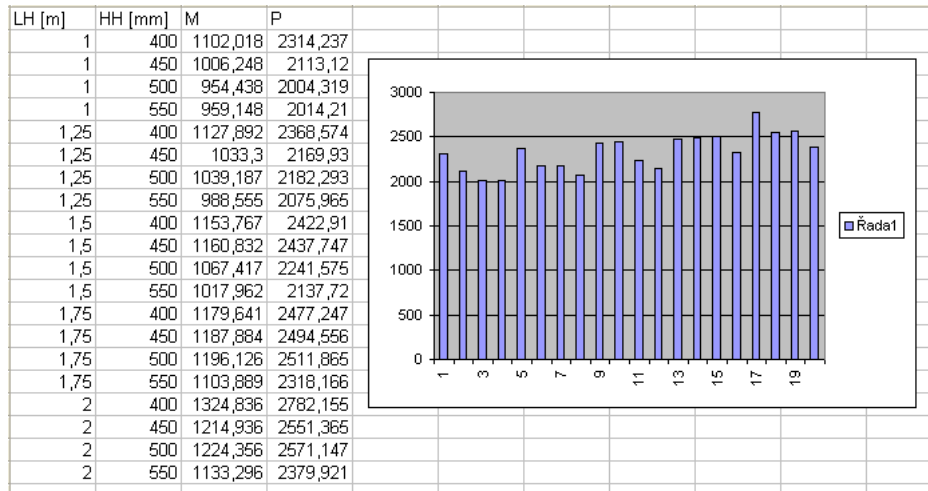
We nemen een balk met bogen; de balk is een HEA profiel, de boog een IPE profiel. De afmetingen van de boog zijn geparametreerd; het profiel van de hoofdbalk is geoptimaliseerd met een standaard SCIA • ESA PT elementoptimalisatie.



In iedere stap wordt de boog gewijzigd, de structuur berekend en de balk geoptimaliseerd. Het totaalgewicht wordt gemeld; de prijs van het materiaal voor balk & bogen wordt berekend op basis van de vooropgestelde prijs voor 1 kg staal (bijvoorbeeld 2,1 euro).

De tabel hieronder geeft voor de berekende L (L boog), H (hoogte boog) de waarden van het balkgewicht (M) en de prijs (P).

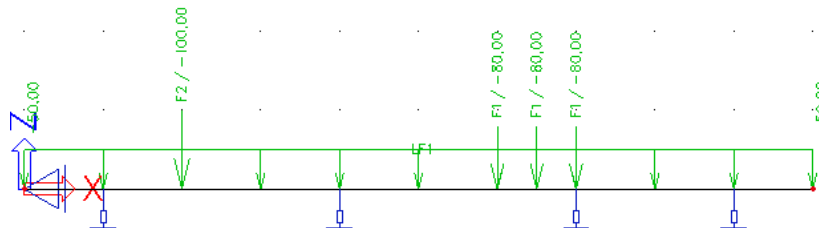
Voor iedere booglengte wordt de optimale hoogte berekend. Dit betekent dat meerdere lokale minimumwaarden gevonden worden.



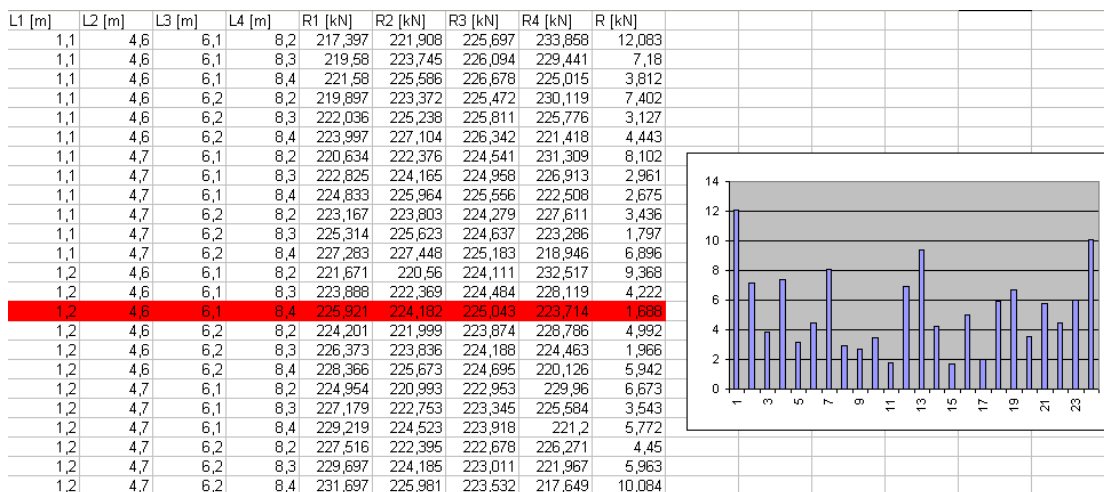
U zult merken dat alle varianten aan de vereisten van de norm voldoen, maar dat de prijs binnen een ruime schaal varieert.

C. Optimalisatie van de positie van palen.

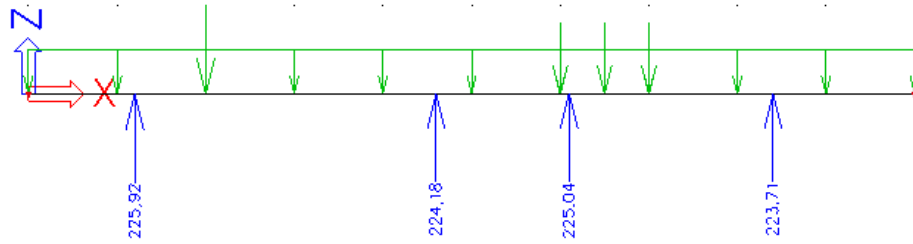
De gebruiker moet een door palen ondersteunde funderingsbalk ontwerpen. In het ideale geval is de reactiekracht in alle palen hetzelfde.



De gebruiker kan de limieten voor de verplaatsing van de steunen bepalen, iedere variatie wordt berekend en de reacties worden geëvalueerd. De doelfunctie kan een eenvoudige formule zijn, die de kwadraten van afwijkingen van een gemiddelde reactiewaarde berekent.



Als we deze functie minimaliseren worden alle palen met dezelfde kracht belast.



Doorgedreven onderzoek

De Universiteit voor Burgerlijke Bouwkunde van Praag heeft een uitgebreid onderzoeksprogramma over optimalisatie. Het onderzoek spitst zich toe op algoritmes die geschikt zijn voor praktische bouwkundige problemen met typische discrete invoerfuncties (bijvoorbeeld een set beschikbare materialen, gewalste profielen of stalen buizen), samen met een gecompliceerde afhankelijkheid van de uiteindelijke doelfunctie van deze invoervariabelen. Omdat een structuur bovendien aan de meest uiteenlopende criteria moet voldoen, moet het ook mogelijk zijn zowel problemen als beperkingen met meerdere criteria te behandelen, die zich meestal moeilijk in sluitende mathematische vorm laten beschrijven. Diverse optimalisatiealgoritmes werden al ontwikkeld, maar de optimalisatie van real-life structuren vraagt nog altijd een zeer lange berekeningstijd. Methoden die op dit vlak een doorbraak forceren zijn gebaseerd op numerieke benaderingen, die het aantal berekeningen minimaliseren – de zogeheten “response surface” methoden. De artificiële intelligentie maakt gewoonlijk gebruik van methoden zoals neurale netwerken, zoals het zogeheten “radiale basisfunctienetwerk”.

Een van de voordelen van de hier voorgestelde optimalisatiemethodes is dat zij niet de globale extreme van een doelfunctie zoeken, maar lokale extremen en dat er dus meer lokale extremen gevonden worden. Ieder van deze extremen heeft een bepaalde betekenis en de ontwerper moet deze varianten beoordelen vanuit praktisch standpunt, vanuit het standpunt van de bouwkundige aspecten, enz.

Een andere aanpak voor het beperken van de lange berekeningsduur is de methode van de parallelle of gespreide berekening. De meeste gebruikers van SCIA software beschikken over een computernetwerk met meerdere Pc's die minder dan 24 uur per dag gebruikt worden. Vaak worden ze overdag en in ieder geval 's nachts uitgeschakeld. Vooral 's nachts voeren ze meestal geen echte berekeningsopdrachten uit. Algoritmes die deze vrije capaciteit kunnen benutten zijn dus een nuttig hulpmiddel. Het scenario gaat als volgt: de ontwerper – die zich in een bepaald stadium van ontwerp van een structuur bevindt – definieert de bereiken, beperkingen, vereisten enz. Het optimalisatiealgoritme wordt 's nachts gestart en als de ontwerper 's anderendaags 's morgens terug op kantoor komt, kan hij een of meer varianten voor de ontworpen structuur kiezen, die als optimale oplossingen berekend werden.

Voordelen voor bouwkundige ingenieurs

Het optimaal ontwerpen van structuren zal het ontwerpproces ingrijpend veranderen; een “toekomstdroom” wordt werkelijkheid. Vermits de mathematische methoden zich constant verder ontwikkelen en de snelheid van de computers almaar toeneemt, verhoogt de optimalisatie de kwaliteit van het praktische ontwerpproces in hoge mate.

Referentie

Matej Leps, Optimalisatie van eenvoudige en meervoudige objecten in de Burgerlijke Bouwkunde met Toepassingen, PhD Thesis, Technische Universiteit Praag, 2004