

Lastumlagerung im Hochhaus Prime Tower

Load redistribution in the Prime Tower high-rise building

Tomaž Ulaga

Einleitung

Die Beanspruchung von Stützen und Wänden wird im Allgemeinen ermittelt, indem die Geschosse gesondert betrachtet und deren Reaktionen dann über die Höhe summiert werden. Diese Betrachtung am unverformten System entsprechend Fig. 1b ist sicherlich zweckmässig für alle Projekte mit moderater Geschosshöhe.

In Hochhäusern stapeln sich Stützen und Wände zu langen Gebilden. Auch geringe Dehnungen können deshalb beträchtliche Verschiebungen bzw. Verschiebungsdifferenzen verursachen (Fig. 1c, 1d und 1e). Da die Strukturen im Allgemeinen statisch unbestimmte Systeme sind, resultiert eine Umverteilung der Kräfte. Dies ist bei der Bauteilbemessung zu berücksichtigen [1].

Für die Auseinandersetzung mit dem Thema wurde ein Verfahren

Introduction

Generally, the loading of columns and walls can be determined by a separate consideration of the individual floors and the subsequent summation of the reactions. This approach, according to Fig. 1b, is surely appropriate for most projects with a moderate number of floors.

In high-rise buildings columns and walls are vertically joined to long members; relatively small strains add up to significant displacements or relative displacements over the entire building height, (Fig. 1c, 1d and 1e). In statically indeterminate systems this leads to load redistributions that need to be considered for member design [1].

Simple mechanical principles were used to develop an approach to treat the issue. A spreadsheet program can be used to carry out efficient and transparent parame-

entwickelt, das auf einfachen mechanischen Grundsätzen basiert. Die Auswertung mit Tabellenkalkulation ermöglicht ein effizientes und transparentes Parameterstudium. Das Wissen um die Unschärfe vieler Parameter bestätigt die Vorzüge der simplen Modellierung gegenüber bedeutend aufwändigeren FE-Analysen, die das gleiche Ziel verfolgen und analoge Erkenntnisse liefern [2, 3]. Das Verfahren wird allgemein erläutert und anhand des Hochhauses Prime Tower in Zürich illustriert (Fig. 1a). In diesem Projekt wurden die gewonnenen Erkenntnisse für die Optimierung der Struktur sowie für die Bemessung der Bauteile genutzt.

Modellbildung

Nach der Erstellung einer Stütze oder einer Wand beginnt ein Verformungsprozess, der Zwängungen verursacht und damit die Statik der umliegenden Bauteile beeinflusst. Für die Modellierung wird ein einfaches Vorgehen gewählt, das die Einflussgrößen separiert, sodass deren Auswirkungen getrennt beurteilt werden können.

Der Endwert einer Verformung kann im Allgemeinen auf einfache Weise berechnet werden, die Ermittlung des zeitabhängigen Verlaufs («Geschwindigkeit») dagegen ist mit vielen Unsicherheiten verbunden. Für die folgenden Überlegungen eignet sich daher die Annahme, dass jeder Verformungsprozess einer Sättigungsfunktion folgt, die mit einem End- und einem Zwischenwert beschrieben werden kann (Fig. 2a). Lastbedingte Deformationen resultieren aus der elastischen Längenänderung beanspruchter Bauteile sowie aus den zugehörigen Kriechvorgängen (Fig. 1c). Schwindbedingte Deformationen entstehen wegen der Verkürzung

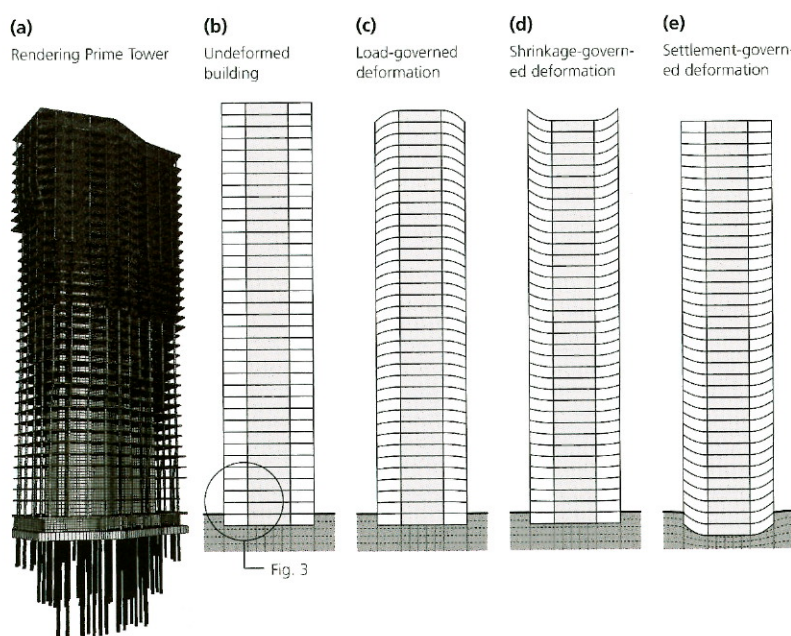


Fig. 1 Hochhaus Prime Tower mit schematischer Deformationsdarstellung. High-rise building Prime Tower with schematic diagrams of the deformation types.

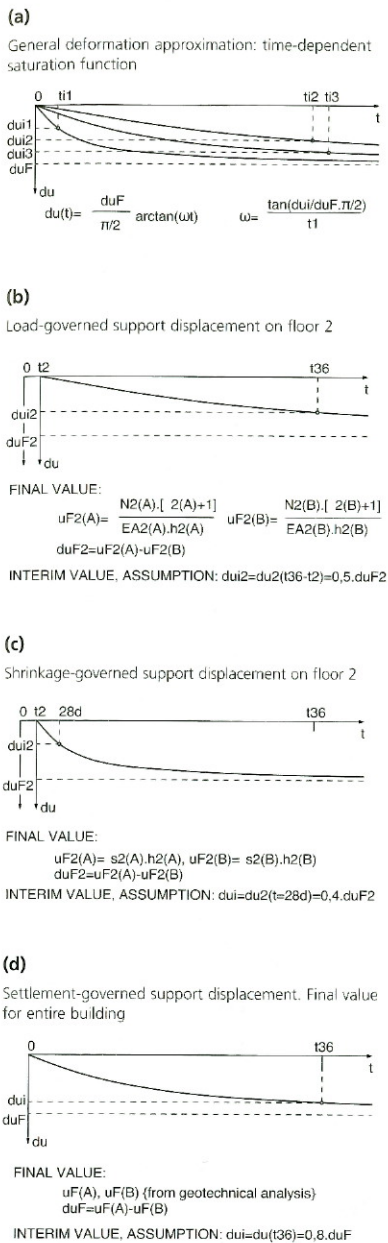


Fig. 2 Grundlagen der Verformungsmodellierung. Basics of deformation modelling.

ter studies. The awareness of the fuzzyness of several parameters confirms the advantages of such a simplified model in comparison to much more complex FE-calculations which provide analogous findings [2, 3]. A general discussion of the method will be followed by the demonstration of load redistribution effects in the high-rise building Prime Tower in Zurich (Fig. 1a). The findings were used to optimize the structure and to design the members.

des Betons infolge chemischer Vorgänge im Zementgefüge (Fig. 1d). Die Gebäudesetzung verursacht eine Mulde im Baugrund, die eine Vertikalverschiebung zwischen den Wänden im Gebäudeinneren und den Stützen in der Gebäudefassade bewirkt (im Rahmen der Betrachtung am Prime Tower wird dieser Verschiebungswert nicht berechnet, sondern von einer gesonderten geotechnischen Analyse übernommen, Fig. 1e).

Fig. 2b, 2c und 2d zeigen die Ermittlung der Anteile von last-, schwind- und setzungsbedingter Deformation exemplarisch für OG2.

Die Decken sind als statisch unbestimmte Systeme auf den vertikalen Bauteilen gelagert. Für die Ermittlung derer Zwängung stellt sich die Frage, um welches Mass sich die Stützen und Wände der darunterliegenden Geschosse verformen werden, wenn die Decke erstellt ist. Fig. 3 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung der Lastumverteilung in Decke über OG2 infolge Relativverschiebung der Lager A und B. Die Anordnung der geschossweise zugehörigen Deformationsfunktionen in Fig. 3c, 3d und 3e visualisiert die Berechnungssystematik: Die Diagramme liegen entsprechend dem Bauablauf auf einer Diagonalen, die zusammengehörenden Verschiebungswerte «du» auf einer Senkrechten. Mit einer einfachen Tabellenkalkulation gelingt eine formale und numerische Zusammenstellung des Sachverhalts, der insgesamt ein statisches Modell für die Lastumlagerung darstellt.

Das System enthält eine Vielzahl von Parametern. Einige davon sind direkt vom tatsächlichen Projekt abgeleitet und können hinsichtlich Reduktion der Lastumlagerung untersucht und optimiert werden (z. B. Stützenquerschnitt, -baustoff und -bewehrungsgehalt, Wandquerschnitt, Wandbewehrungsgehalt, Schwindwert des Wandbetons). Andere Parameter sind physikalisch schwierig fassbare Größen (z. B. Steifigkeitsreduktion der Decken infolge Reissen und Kriechen, Geschwindigkeiten der

Modelling

After the erection of a column or wall a deformation process starts that will cause restraint forces in the adjacent members. For their analysis a simple method can be used. The approach is based on a strict separation of the governing effects in order to enable a clear interpretation of the results.

The final value of a deformation can normally be calculated in a simple way; the determination of the time dependency ("rate") however often faces multiple uncertainties. The following considerations are based on the assumption that every single deformation process can be described with a saturation function that is defined by the final and one intermediate value (Fig. 2a). Load-governed deformations result from the elastic change of the length of a loaded member and from the corresponding creep component (Fig. 1c). Shrinkage-governed deformations result from concrete contraction due to chemical processes in the cement matrix system (Fig. 1d). Settlement causes ground deformations that lead to a vertical differential displacement between the core walls and the façade columns (for the following investigation of the Prime Tower the settlement values are taken from a separate geotechnical analysis, Fig. 1e).

Fig. 2b, 2c and 2d show the determination of the effects load-governed, shrinkage-governed and settlement-governed deformation with focus on floor No. 2.

The floor slabs are statically indeterminate systems that are supported by vertical members. To calculate the restraint forces of an individual slab it is necessary to derive the deformation of all underlying vertical members after its completion. The procedure for the determination of the load redistribution in the slab above floor No. 2 due to differential displacement of the supports A and B is given in Fig. 3. The arrangement of the corresponding deformation functions "du" in Fig. 3c, 3d and 3e shows the calculation

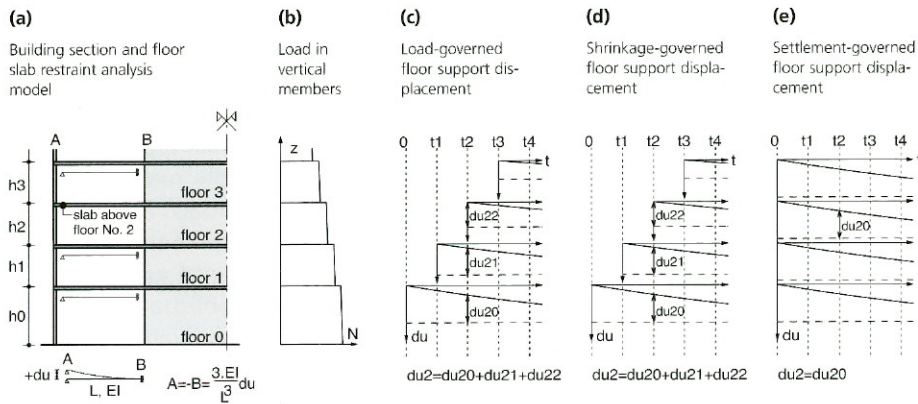


Fig. 3
Grundlagen der Lagerverschiebungsmodellierung.
Basics of the support displacement modelling.

last- und schwindbedingten Deformation, Geschwindigkeit der setzungsbedingten Bauteilver-schiebung) [4, 5]. Statt der direkten Festlegung erfolgt deren Quantifizierung über eine Sensitivitätsanalyse, die die Auswirkung auf das Ergebnis aufzeigt.

Resultate

Fig. 4a stellt die Deckenverformung infolge lastbedingter Verformungsprozesse im Prime Tower dar. Da nur die Deformationsanteile unter einem bestimmten Geschoss eine Zwängung verursachen, sind die unteren Decken wenig betroffen, die oberen stark. Weil die Stütze A einen viel geringeren Querschnitt aufweist als die Wand B, ist die Spannung entsprechend höher und es resultiert eine Verschiebung des Deckenrands nach unten (Extremwert $du \approx -10$ mm). Fig. 4b zeigt den Einfluss des Schwindens. Die vorgefertigten Stützen schwinden wenig, der Ortbetonkern dagegen «normal». Dementsprechend resultiert eine relative Verschiebung des Deckeninnenbereichs nach unten. Der Einfluss ist vor allem in den oberen Geschossen gross, wo sich die Schwindeffekte über die gesamte Gebäudehöhe kumulieren (Extremwert $du \approx 11$ mm). Die Form der Setzungsmulde verursacht hohe Zwängungskräfte in den unteren Geschossen, weil die gesamte Deformation erst nach der Geschosserstellung eintritt (Fig. 4c). Die relative Verschiebung des

procedure: According to the building process, the diagrams are positioned on a diagonal line; the corresponding deformation values can be found on vertical lines. With a simple spreadsheet a formal and numerical model can be obtained to calculate load redistribution effects.

The system contains a multitude of parameters. Some are directly taken from the actual project in order to find an optimum way to minimize load redistribution effects (e.g. the column section, material or reinforcement ratio and the core wall section, reinforcement ratio or concrete shrinkage properties). Other parameters are difficult to determine (e.g. the stiffness reduction of the floor slabs due to cracking and creep, rates of load-governed and shrinkage-governed deformations, rate of settlement-governed member displacements) [4, 5]. Instead of a direct estimate the quantification can be derived from a sensitivity analysis to investigate the impact on the final results.

Results

The load-governed deformation of the floor slabs in the Prime Tower is given in Fig. 4a. Lower floors are exposed to minor restraint forces simply because the underlying part of the structure is not greatly deformed. Therefore, maximum restraint values can be found in the region of the higher floors. The edge of the outer slab exhibits sagging, because high

Deckeninnenbereichs erfolgt nach unten (Extremwert $du \approx 47$ mm). Fig. 4d und 4e zeigen die summierte Auswirkung der Zwängung sowie die daraus folgende Lastumverteilung. Im Prime Tower ist es so, dass der Langzeitwert in der Stütze A ca. 6% höher liegt, als bei rein statischer Betrachtung ermittelt. Die Kernwände B dagegen werden um den entsprechenden Betrag entlastet.

Erkenntnisse

Die Modellierung der zeitbedingten Lastumlagerung ist mit vielen schwierig quantifizierbaren Para-

Spezifische Bezeichnungen/ Specific notations

du	relative Deckenlagerverschiebung relative floor support displacement
du21	du in Geschoss 2 infolge Deformation in Geschoss 1 du on floor 2 due to deformations on floor 1
i	Index Zwischenwert index for interim value
F	Index Endwert index for final value
t2, t36	Fertigstellung Decke Nr. 2, Nr. 36 completion of floor No 2, No 36
L	Deckenspannweite floor slab span
z	Gebäudehöhe building height
ϵ_s	Schwinddehnung shrinkage strain
ϕ	Kriechwert creep value
ω	Parameter parameter

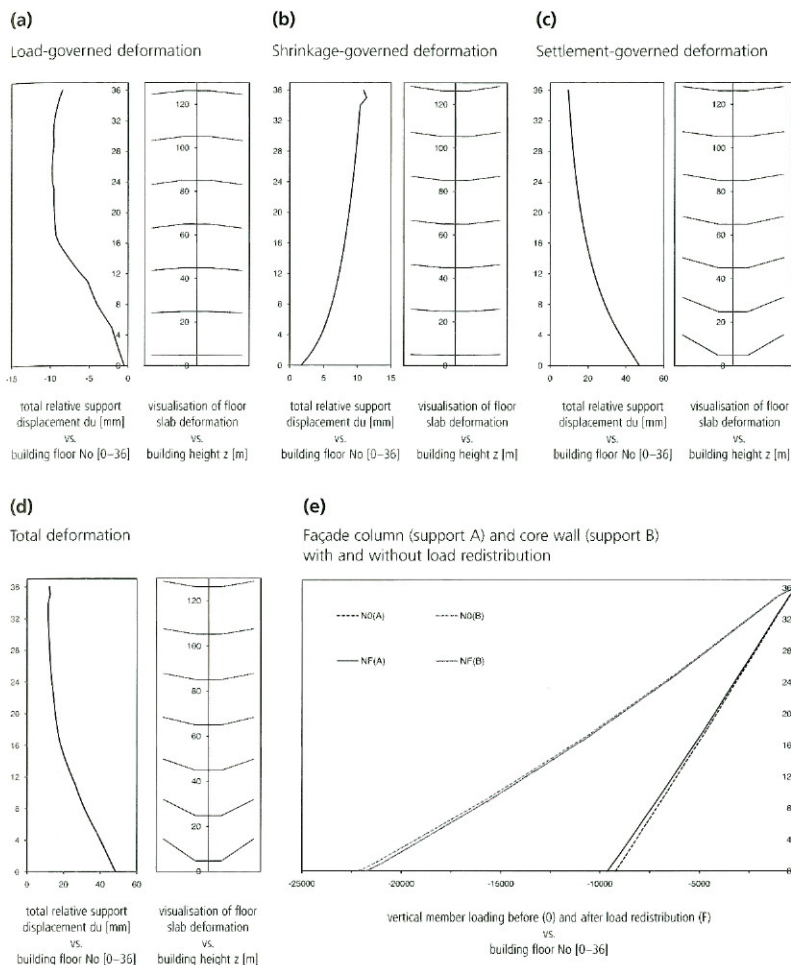


Fig. 4
 Resultate der Lastumverteilungsanalyse.
 Results of the load redistribution analysis.

normal stresses in the small façade column A cause more deformation than the moderate stresses in the massive core wall B (extreme value $du \approx -10$ mm). Shrinkage-governed deformations are displayed in Fig. 4b. The shrinkage of pre-fabricated concrete columns is very moderate in comparison to "normal" shrinkage of the core walls. As a result, the central region of the floor slab is deflected positively. Again, maximum values can be found in the region of the higher floors, where shrinkage effects of the entire building are accumulated (extreme value $du \approx 11$ mm). The shape of the ground settlement deformation mainly causes restraint forces in the lower slabs because virtually the whole deformation occurs after completion of these floors (Fig. 4c). The maximum displacement of the central slab re-

metern verbunden. Die Analyse mit FE-Modellierung ist möglich, tendiert aber zu einer gewissen Scheingenaugkeit. Das oben vorgestellte Verfahren ermöglicht die einfache Erfassung der bekannten Einflussgrößen sowie eine systematische Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung des Einflusses der schwierig quantifizierbaren Parameter.

Das Tragwerkskonzept und die Bauteilgestaltung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Lastumverteilung. Schlanke Wände und Stützen erfahren eine hohe lastbedingte Deformation. Ortbetonwände schwinden, wobei dieser Effekt mit gezielter Wahl der Betonsorte gesteuert werden kann. Die Schwindverformung vorfabrizierter Betonstützen ist wegen der früheren Herstellung gering, Stahlstützen schwinden überhaupt nicht. Die Form der

gion is positive, i. e. downwards directed (extreme value $du \approx 47$ mm). Fig. 4e gives the sum of all restraint effects and of the corresponding load redistribution. The long-term loading of the façade column A is approx. 6% higher than the result that derived by analysing the undeformed building. The loading of core wall B is reduced accordingly.

Findings

The modelling of time-dependent load redistributions involves several parameters that cannot be determined precisely. The application of FE analysis is possible but tends to provide pseudo-accurate results. The presented approach allows a simple treatment of the known parameters and a comprehensive sensitivity analysis to investigate the effect of the parameters that are difficult to estimate.



Fig. 5
Stand der Bauarbeiten im März 2010.
Construction state in March 2010.

Setzungsmulde kann mit dem Fundationskonzept beeinflusst werden. Mit einer steifen Bodenplatte bzw. mit einem steifen Untergeschoss kann ein Ausgleich geschaffen werden. Lange Bohrpfähle im Kernbereich reduzieren die Verformungen in Gebäudemitte.

Das Tragwerk des Prime Tower wurde entsprechend den Ausführungen untersucht und optimiert (die in Fig. 4 dargestellten Resultate repräsentieren lediglich einen einzigen Parametersatz). Die Minimierung der Lastumverteilung erhöhte die Wirtschaftlichkeit, weil die Bauteile nicht für zwei stark unterschiedliche Zustände

The structure and the design of the members have a significant influence on load redistribution effects. Slender walls and columns tend to undergo enhanced load-governed deformation. In situ concrete members are more sensitive to shrinkage deformations than pre-fabricated concrete elements, while steel elements exhibit no shrinkage at all. The magnitude of the settlement can be influenced by the foundation concept. A stiff base plate and long in situ concrete piles can reduce deformation in the building core region.

The structure of the Prime Tower was investigated and optimized according to the procedure set out above (the results in Fig. 4 represent one set of parameters only). The minimization of load redistribution effects lead to enhanced cost effectiveness, because the dimensioning of the members did not need to consider two rather different loading states (for the short-term and long-term states).

The results were also used to define the pre-camber of individual members in order to achieve a specific end geometry state. However, load redistribution effects remain unaffected by this measure.

Project data

Owner

Swiss Prime Site AG, Olten

Structural engineering execution phase

Walt+Galmarini AG, Zurich

Architects

Annette Gigon/Mike Guyer Architekten AG, Zurich

Total service contractors

Consortium Prime Tower:
Losinger Construction AG, Zurich,
Karl Steiner AG, Zurich

Main data

Footprint: 3 0x 50 m²

Number of floors: 36

Height: 126 m

Structure: stiffening concrete cores and façade columns, concrete flat slab floors

Construction period: 2008–2011

bemessen werden mussten (Anfangs- und Endzustand).

Die Resultate wurden auch für die Festlegung der Bauteilüberhöhung verwendet. Mit dieser Massnahme wird das Erreichen des gewünschten geometrischen Endzustands angestrebt, während die Lastumverteilung unbeeinflusst bleibt.

Referenzen/References

[1] J. Eisele, C. Kloft; Hochhausatlas. Callwey Georg D.W. GmbH, ISBN 3766715240, September 2002.

[2] W. Sobek, S. Hagenmayer, M. Duder, T. Winterstetter; Die «High-light Munich Business Towers» in München. Bautechnik 83 (2006), Heft 4, S. 247–253, Ernst & Sohn Verlag GmbH, 2006.

[3] J. Zirnbauer, R. Müller; Tragwerksanalyse des Hochhauses Uptown München; Erfahrungen mit grossen FE-Strukturen. Beitrag SOFISTIK-Seminar 2003.

[4] Norm SIA 261; Einwirkungen auf Tragwerke, SIA Zürich, 2003

[5] Norm SIA 262; Betonbau, SIA Zürich, 2003

Autor/Author

Tomaž Ulaga

Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA
Ulaga Partner AG
CH-4051 Basel
(früher/former affiliation:
Walt+Galmarini AG, Zürich)
tomaz.ulaga@ulagapartner.ch