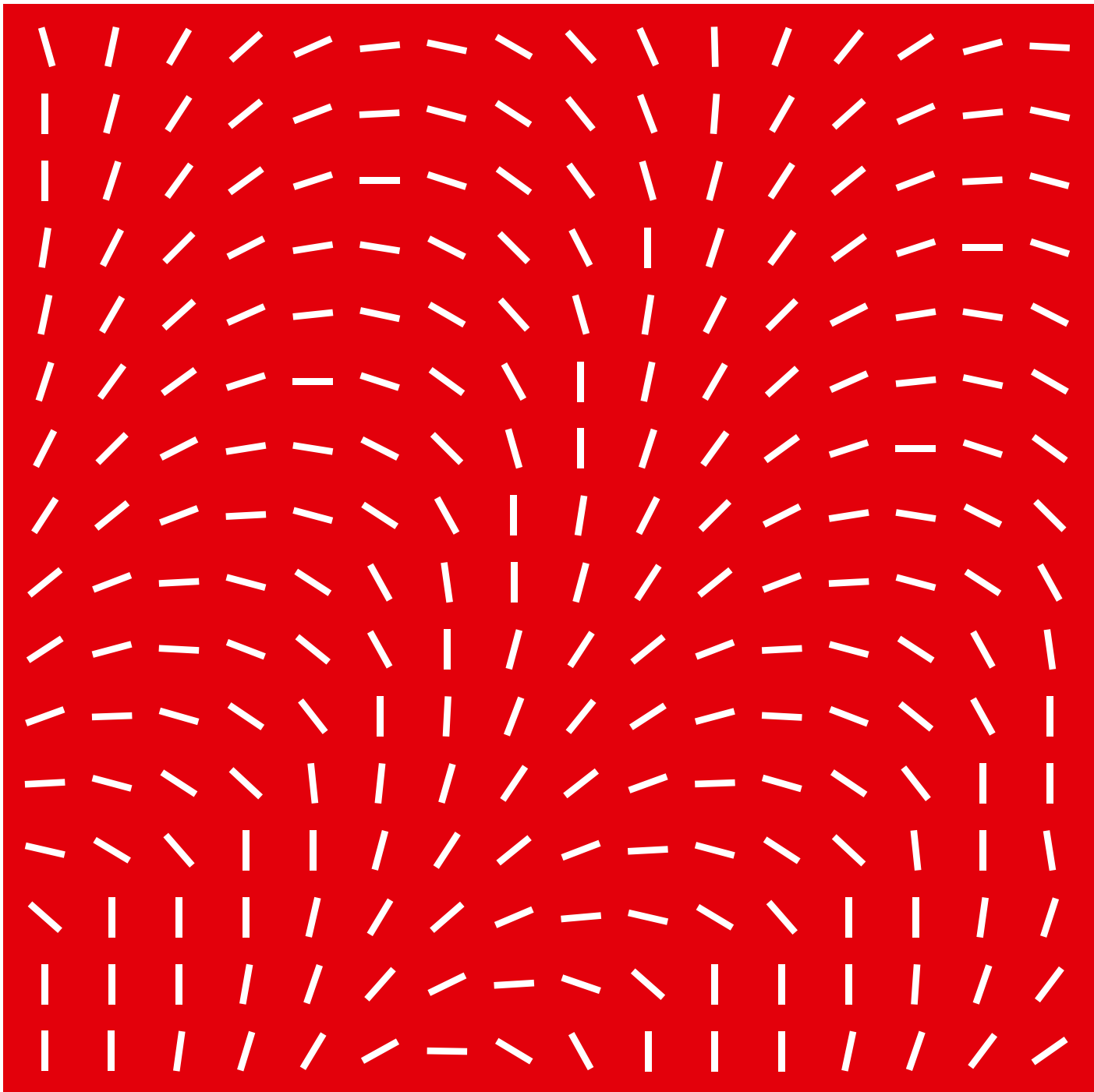


Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen bei Hochhäusern neben Eisenbahngleisen



Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen bei Hochhäusern neben Eisenbahngleisen

(ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich; Dr. A. Ziegler)

Problemstellung

Knapper werdende Landressourcen aber auch das grosse Interesse an Wohn- und Büroräumen in der Nähe von Verkehrsträgern führen dazu, dass vermehrt in unmittelbarer Nähe von Eisenbahngleisen Hochhäuser projiziert werden. Damit stellt sich aber sogleich die Frage, ob die vom Schienenverkehr erzeugten Erschütterungen zu störenden Erschütterungen oder hörbarem Körperschall führen könnten und dadurch den Wert der hohen Investitionen zunichtemachen. Für "normale" Gebäude, d.h. für 1- bis 6-geschossige Gebäude verfügen wir über recht gute Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen. Diese verwenden in der Regel empirische Methoden, d.h. sie basieren im Wesentlichen auf einer grossen Anzahl von Messungen an bestehenden Gebäuden. Bei Hochhäusern fehlt uns diese Datenbasis. Wir wissen zwar, dass die Vibrationen durch den Ankopplungseffekt wegen der grossen Gebäudemasse ganz erheblich reduziert werden, wir wissen aber auch, dass die Erschütterungen in den obersten Geschossen eines Hochhauses wegen der vertikalen Gebäudeschwingungen ebenso stark vergrössert werden können. Doch zu wenig ist bekannt über die Grösse dieser Einflussfaktoren und deren Frequenzabhängigkeit.

Im ersten Teil des vorliegenden Beitrages sollen die durch ZIEGLER CONSULTANTS durchgeführten Messungen an Hochhäusern in der Nähe von Eisenbahnlinien präsentiert werden. Es handelt sich dabei um Gebäude mit 10 bis 30 Stockwerken in einem Abstand von 10 bis 50 m vom Gleis. Dabei wird auch auf den Einfluss der Gründungstiefe eingegangen, denn eine grössere Gründungstiefe bedeutet auch eine grössere Distanz vom Gleis. Im zweiten Teil soll gezeigt werden, wie weit wir mit einer rein theorie-basierten Berechnungsmethode, d.h. mit dynamischen FE-Berechnungen, kommen würden. Der Vergleich mit den ausgeführten Hochhausprojekten wird schliesslich zeigen, ob wir uns bei der Immissionsprognose für Hochhäuser auf FE-Berechnungen verlassen können oder ob auch hier das empirische Verfahren mehr Sicherheit in der Prognose bietet.

Die Lösung für „normale“ Häuser

Bild 1 veranschaulicht den Rechenvorgang beim Terzspektren-Modell, dem am häufigsten verwendeten Modell zur Berechnung von Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen beim Schienenverkehr. Aus den im Frei-Feld neben dem Gleis gemessenen Erschütterungssignalen wird ein gemitteltetes Terzbandspektrum gebildet, das für unsere Berechnung als Quellspektrum dienen soll. Die Abminderung im Frei-Feld zwischen dem Gleis und dem Gebäude wird durch eine empirisch bestimmte Abminderungsfunktion definiert. Der Ankopplungseffekt bewirkt, dass die mittleren Frequenzen abgeschwächt werden, was durch das Ankopplungsspektrum berücksichtigt wird. Die Eigenschwingung der Geschossdecke wiederum bewirkt eine Verstärkung im mittleren Frequenzbereich.

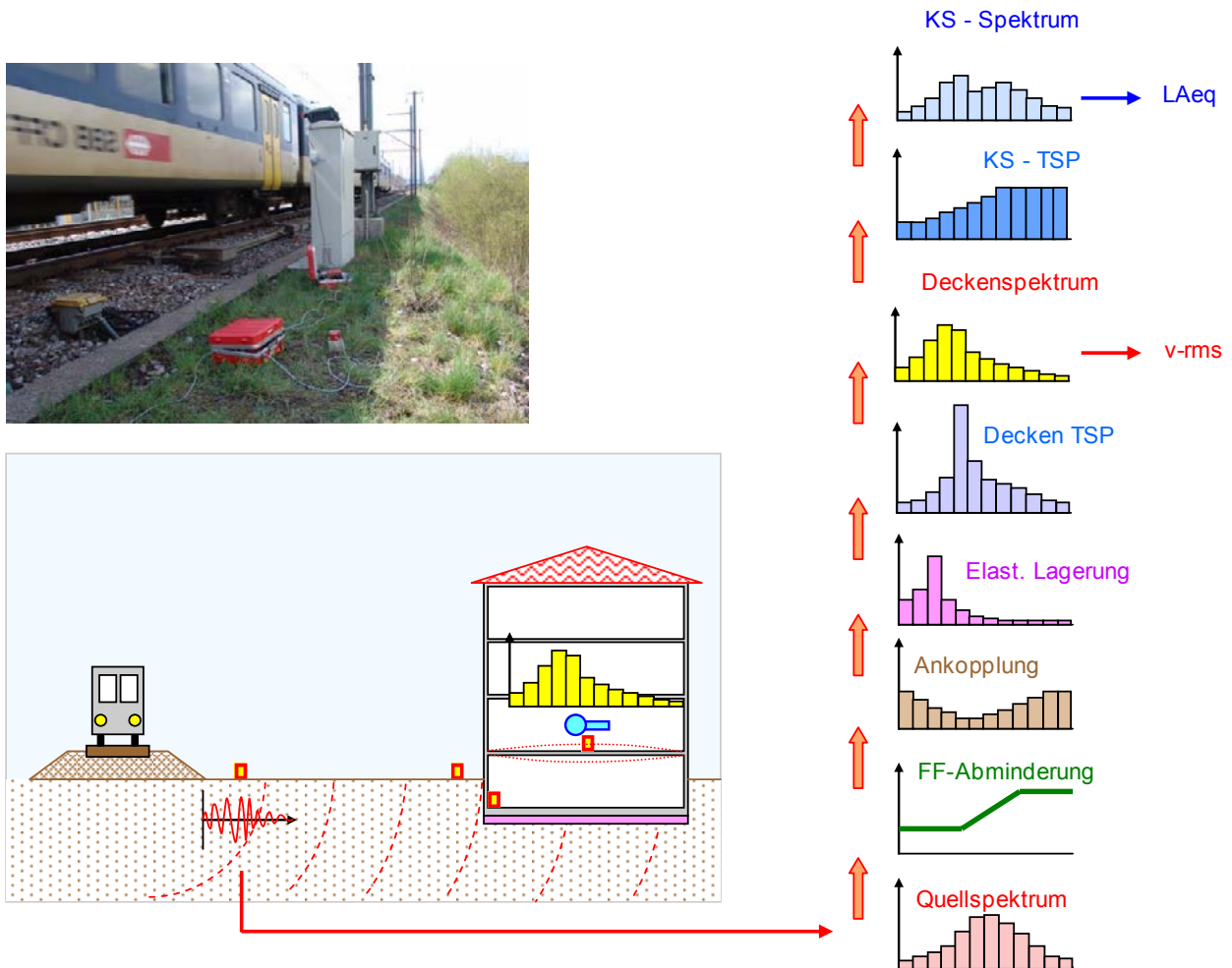


Bild 1 Berechnungsablauf beim Terzspektrmodell

So erhalten wir durch Multiplikation des Quellspektrums mit allen erforderlichen Transferpektrums das gesuchte Deckenspektrum. Damit haben wir zwar noch nicht das Erschütterungssignal auf der Geschossdecke, aber wir können den RSS-Wert (RSS = root of the sum of squares) des Deckenspektrums bilden, der wiederum dem RMS-Wert des Erschütterungssignals entspricht. Aufgrund des RMS-Wertes (RMS = root mean square) können wir die gesuchten charakteristischen Größen wie v_{max} , KB_{Ftr} oder K-Wert berechnen.

Das gewählte Vorgehen ist bis zur Berechnung des RMS-Wertes mathematisch exakt. Die Berechnung der übrigen charakteristischen Größen wie v_{max} , KB_{Ftr} oder K-Wert ist allerdings eine Approximation. Sie basiert auf der Annahme, dass die Korrelationen zwischen den charakteristischen Größen, wie wir sie neben dem Gleis bestimmen, auch im Gebäude gelten. Umfangreiche statistische Untersuchungen zeigen, dass der hier eingeführte Fehler im Bereich von 5 bis 10 % liegt und somit neben den übrigen Unsicherheiten nicht ins Gewicht fällt.

Um nun auch noch den Körperschall zu berechnen, wird das Verfahren weitergeführt mit einem Transferspektrum zwischen der Erschütterung auf der Geschossdecke und dem Schalldruck im Raum. Dieses Transferspektrum stellt die Beziehung zwischen der Schwinggeschwindigkeit und dem Schalldruck her und hat die Einheiten Pa / (mm/s). Wir erhalten auf diese Weise das unbewertete Schalldruck-Spektrum und können – mit Hilfe der A-Bewertung und der Summation der einzelnen Terzbänder – den bewerteten Schallpegel bestimmen.

Es ist zu beachten, dass dieser letzte Schritt des Transferspektren-Modells „nur“ eine Approximation darstellt, da der Körperschall nicht durch die Schwingung des Fussbodens allein

erzeugt wird, sondern auch durch die Schwingungen der Zimmerdecke und der Wände. Deren Schwingverhalten wird bei diesem Vorgehen nicht explizit berücksichtigt.

Besonderheiten bei Hochhäusern

Hochhäuser weisen gegenüber „normalen“ Häusern folgende Besonderheiten auf:

- Sie haben eine wesentlich höhere Masse pro Grundfläche
- Sie weisen eine wesentlich höhere Gebäudehöhe auf
- Sie sind zumeist wesentlich tiefer fundiert

Die grössere Masse pro Grundfläche führt dazu, dass die Schwingungsübertragung vom Baugrund auf das Gebäude, der sog. Ankopplungsfaktor, geringer ausfällt. Bei Einfamilienhäusern (EFH) liegt der Ankopplungsfaktor zwischen 0.4 und 0.6, bei Mehrfamilienhäusern (MFH) zwischen 0.3 und 0.5 und bei Hochhäusern (HH) zwischen 0.2 und 0.4. Die Form des Ankopplungsspektrums für Hochhäuser ist, wie man in Bild 2 sieht, ähnlich wie bei den übrigen Gebäudetypen, doch ist der Frequenzbereich mit starker Reduktion wesentlich breiter.

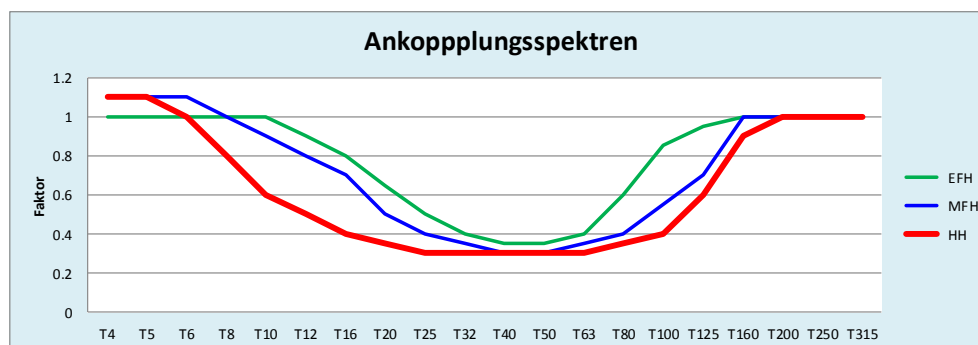


Bild 2 Transferspektren zwischen Frei-Feld und Fundament für verschiedene Gebäudetypen

Ein Hochhaus ist – in der Sprache des Baudynamikers – ein unten eingespannter Stab, der vertikal angeregt wird. Die stärksten Vertikalschwingungen treten dementsprechend am Stabende auf, d.h. im obersten Geschoss. Je nach vertikaler Eigenfrequenz kann diese Verstärkung zwischen 10 % und 100 % liegen. Zudem ist diese Verstärkung sehr frequenzabhängig. Eine Untersuchung an vier Hochhäusern hat das in Bild 3 dargestellte Transferspektrum ergeben. Offensichtlich treten die grossen Verstärkungen in den Frequenzen unterhalb 20 Hz auf, d.h. im Bereich der Eigenfrequenzen des Hochhauskerns. Über 30 Hz, d.h. im Frequenzbereich des Körperschalls, liegt sogar eine Abschwächung von bis zu 50 % vor. Dieser Befund muss allerdings noch durch weitere Messungen erhärtet werden.

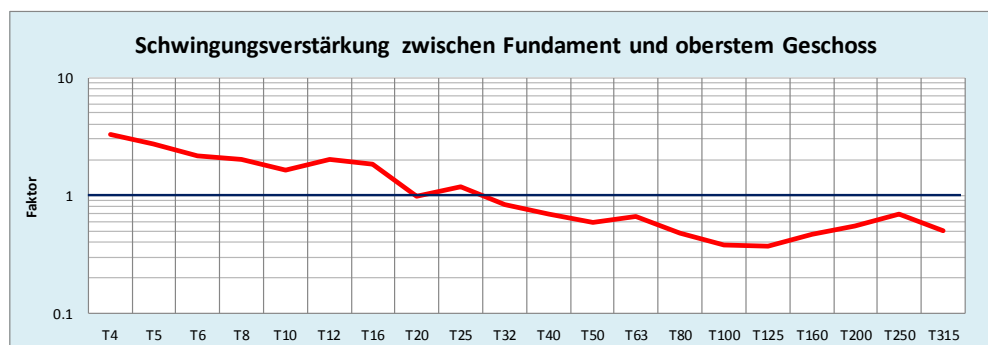


Bild 3 Transferspektren zwischen Fundament und oberstem Geschoss bei Hochhäusern

Die zumeist tiefe Fundationskote eines Hochhauses kann sich positiv auswirken. Sie vergrößert den Abstand zwischen dem Gebäudefundament und dem Gleis. Für ein Gebäude in 6 m

Distanz vom Gleis mit einer Fundationskote von minus 20 m ist nicht die Distanz von 6 m massgebend für die Erschütterungsübertragung, sondern die schräge Distanz von 20.8 m. Dies kann dazu führen, dass trotz des geringen Abstandes vom Gleis auf eine elastische Lagerung des Gebäudes verzichtet werden kann. Die dem Gleis zugewandte Seite wird man allerdings isolieren müssen.

Dynamische FE-Berechnung für den Boden

Das Angebot an kommerziell erhältlichen Computerprogrammen für die Simulation von dynamischen Vorgängen im oder auf dem Boden ist auch heute noch recht beschränkt. Ein recht weit verbreitetes Produkt ist das Programm PLAXIS, das eine 3-D-Simulation von Schwingungsvorgängen von Tragstruktur und Baugrund erlaubt. Vergleiche zwischen Messungen im Feld und FE-Berechnungen mit PLAXIS haben uns Folgendes gezeigt:

- Die Modellierung von dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktionsproblemen gelingt mit PLAXIS auf sehr elegante und benutzerfreundliche Weise.
- Die Grundaufgaben wie „Maschinenfundament auf elastischem Halbraum“, die „Erschütterungsabminderung im Frei-Feld“ oder die „Interaktion zwischen Boden und Bauwerk bei Erdbebenanregung“ werden überzeugend gelöst und ergeben eine gute Übereinstimmung mit klassischen Lösungen.
- Bei der Simulation von Eisenbahnerschütterungen gelingt die Erschütterungsausbreitung im Frei-Feld sehr gut. Hingegen bleiben beim Übergang der Frei-Feld-Erschütterungen auf das Gebäudefundament, wie das nachstehende Beispiel zeigt, doch einige Fragen offen.

Für die Simulation des Ankopplungseffekts haben wir in der Berechnung mit PLAXIS einen Bodenbereich von 20 m x 20 m x 10 m modelliert. Die Eisenbahn wurde als Streifenlast mit harmonischer Anregung eingeführt. Das Gebäude wurde durch eine starre Platte mit den Abmessungen 6 m x 8 m dargestellt. Bild 4 zeigt das Wellenbild für eine Anregung mit 16 Hz

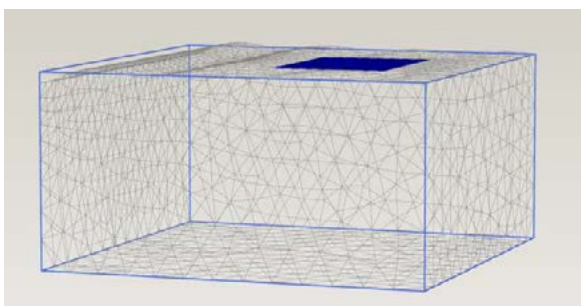


Bild 4 Wellenbild bei harmonischer Anregung mit 16 Hz

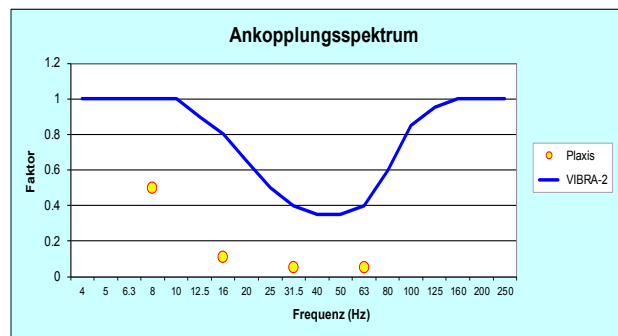


Bild 5 Vergleich des empirisch bestimmten Ankopplungsspektrum mit den Ergebnissen aus der FE-Berechnung

Das Ergebnis der PLAXIS-Berechnungen ist in Bild 5 mit dem empirisch bestimmten Ankopplungsspektrum verglichen. Es überrascht, dass die mit PLAXIS ermittelten Ankopplungsfaktoren so viel tiefer liegen als die empirisch bestimmten. Offensichtlich wird mit dem in PLAXIS verwendeten Modell nicht alles berücksichtigt. Gerade im höheren Frequenzbereich, der für den sekundär abgestrahlten Schall (sog. Körperschall) jedoch von ausschlaggebender Bedeutung ist, scheint die Modellierung mit PLAXIS problematisch zu sein.

Dynamische FE-Berechnung für das Bauwerk

Während es für die Modellierung des Baugrunds nur wenige leistungsfähige FE-Programme gibt, stehen uns für die Modellierung des Bauwerkes eine unvergleichlich grössere Anzahl von FE-Programmen zur Verfügung. Wir haben das FE-Programm SAP 2000 von CSI (Berkeley, California) eingesetzt, um zu prüfen, ob ein FE-Programm in der Lage ist, die wesentlichen Aspekte bei Eisenbahn-induzierten Erschütterungen zu simulieren. Bild 6 zeigt das für ein 10-geschossiges Hochhaus verwendete FE-Modell. Für den E-Modul des Betons haben wir $4.2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ eingesetzt, für die Dämpfung 5 %. Die Anregung erfolgte als Beschleunigungs-Zeitverlauf an den Fundamentpunkten (Bild 6, unterstes Diagramm). Unter Verwendung der „direkten Integration“ und mit Berücksichtigung der Frequenzen bis 70 Hz wurde der Schwingungsverlauf an verschiedenen charakteristischen Punkten berechnet.

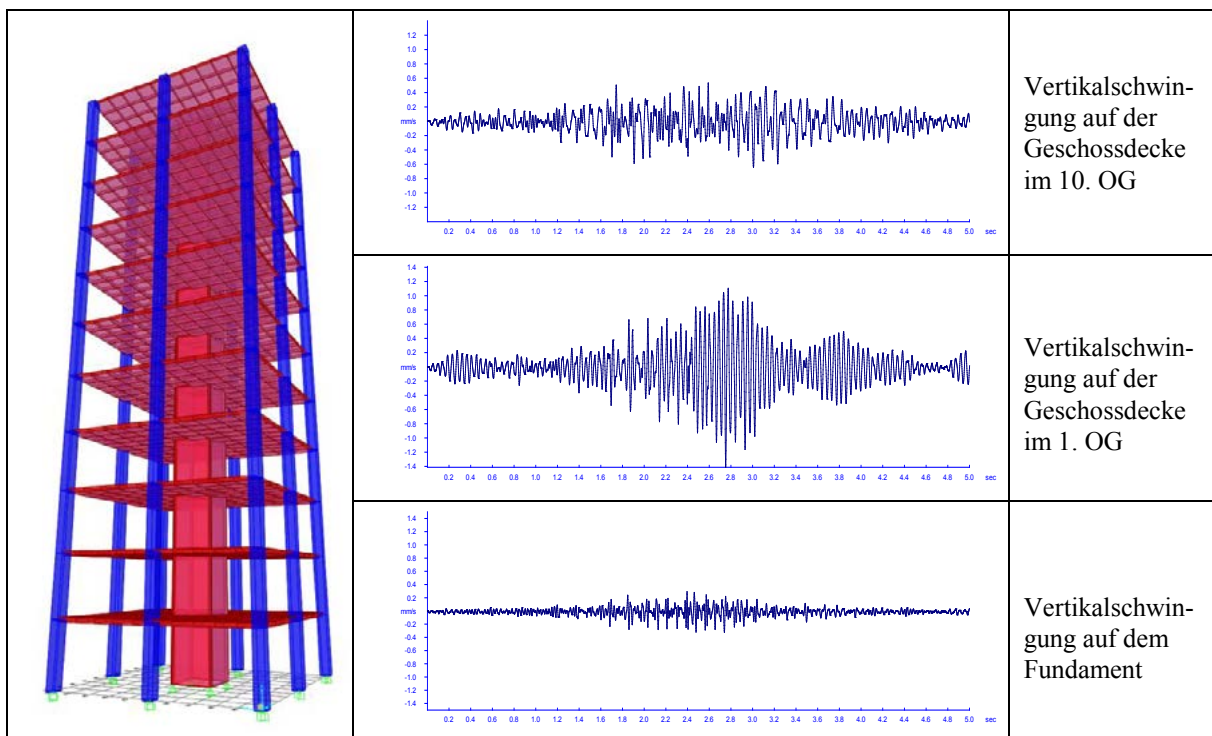


Bild 6 FE-Modell eines Hochhauses mit Schwingungsverlauf am Fundament, im 1. und 10. OG

Als erstes interessierte die Verstärkung durch die Geschossdecken. Wie man in Bild 7 sieht, ist das FE-Modell in der Lage, die Verstärkung im Bereich der Deckeneigenfrequenz von 20 bis 25 Hz gut abzubilden. Die Verstärkung liegt bei einem Faktor 8, so wie wir es aus unzähligen Messungen auf Betondecken kennen. Hingegen liegt eine grosse Diskrepanz bei den höheren Frequenzen vor. Das FE-Modell ergibt nur eine geringe Verstärkung für Frequenzen über 30 Hz an, während unsere Messungen eine Verstärkung von 2 bis 4 auch für höhere Frequenzen ergeben. Dies ist besonders für die Prognose des Körperschalls von entscheidender Bedeutung.

Der zweite uns interessierende Aspekt war die Verstärkung der Vertikalschwingung durch den Kern eines Hochhauses. Bild 8 zeigt den Vergleich zwischen dem FE-Modell und einem realen 13 stöckigen Hochhaus in 30 m Distanz vom Gleis. Die Verstärkung bei 12 Hz um einen Faktor 3 bis 5 wird durch das FE-Modell offensichtlich richtig modelliert. Aber auch die Abschwächung bei Frequenzen über 30 Hz wird durch das FE-Modell einigermaßen richtig wiedergegeben. Dies ist, wie bereits erwähnt, für die Prognose des Körperschalls von entscheidender Bedeutung.

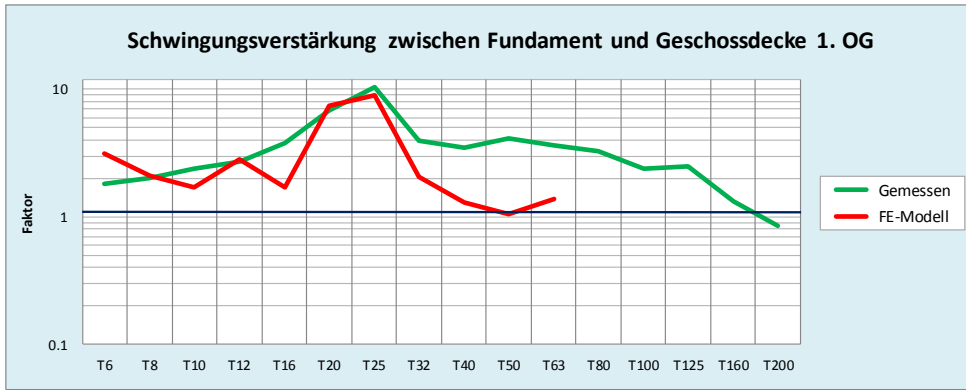


Bild 7 Transfer-spektrn zwischen Fundament und Geschossdecke

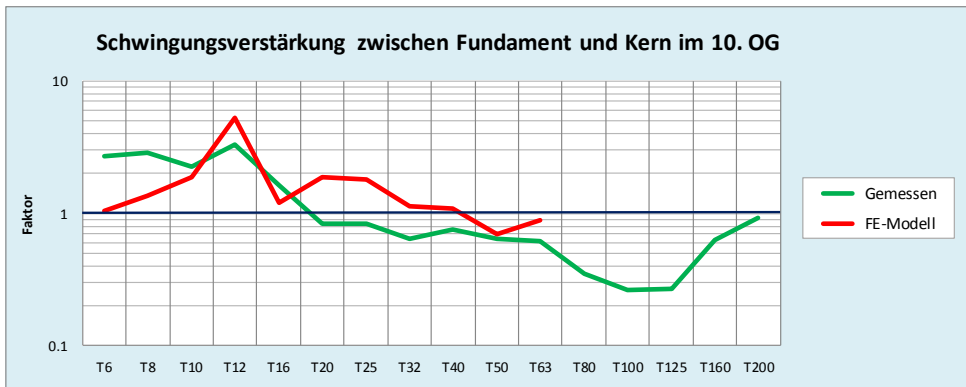


Bild 8 Transfer-spektrn zwischen Fundament und Kern im 10. OG

Beispiele



Bild 9 Hochhaus Andreas-Park in Zürich

Das 13-geschossige Hochhaus in Bild 9 befindet sich in 30 m Distanz vom Gleis. Eine Prognoserechnung ergab eine maximale Erschütterung von 0.15 mm/s und einen Körperschall-Vorbeifahrtspegel unter 35 dBA. Eine elastische Lagerung war somit nicht angezeigt. Messungen nach Fertigstellung des Gebäudes ergaben allerdings maximale Erschütterungen von 0.3 mm/s. Solche Immissionen wirken zwar nicht störend, doch muss man sich doch fragen, was bei der Prognose schief gelaufen ist.

Die Messungen zeigten, dass die maximalen Erschütterungen auf dem Fundament bei 0.013 mm/s liegen; im 12. OG neben dem Kern erreichten sie 0.026 mm/s. Damit weisen sie eine Verstärkung von einem Faktor 2 auf. In Deckenmitte im 12. OG wurde eine Schwingstärke von 0.3 mm/s gemessen, was einem Verstärkungsfaktor von 11.5 entspricht. Die enorme Verstärkung von 0.013 mm/s auf dem Fundament auf 0.30 mm/s in Deckenmitte im 12. OG wurde begünstigt durch das Zusammenfallen der Eigenfrequenz des Kerns (10 Hz) und der Geschossdecken im 12. OG (12 Hz). Ungünstig wirkte auch die geringe Dämpfung der Geschossdecken von 1 bis 2 %.

Das 15-geschossige Hochhaus „West-Link“ in Zürich-Altstetten (Bilder 9 und 10) befindet sich in einer Distanz von 12 m von nächstgelegenen Gleis. Prognoserechnungen zeigten, dass - wegen der Wohnungen im 7. bis 15. Geschoss - eine elastische Lagerung unumgänglich war. Der Bauherr hatte sich für eine elastische Lagerung ab dem 7. Geschoss entschieden. Dies erlaubte ein Zuwarten mit dem endgültigen Entscheid für oder gegen eine elastische Lagerung. Zusätzliche Messungen nach Fertigstellung des 1. und 2. Geschosses zeigten dann, dass auf eine elastische Lagerung verzichtet werden konnte. Im Nachhinein stellte sich natürlich die Frage, ob die erste Prognose, die eine elastische Lagerung verlangte, unnötig konservativ war.



Bild 9 Hochhaus West-Link in Zürich

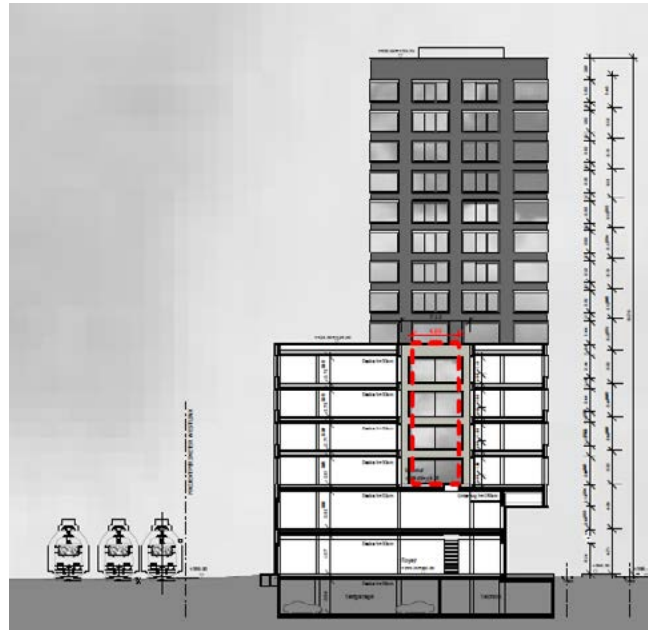


Bild 10 Schnitt durch Hochhaus West-Link

Die Messungen zeigten, dass auch in diesem Hochhaus ein Verstärkungsfaktor von einem Faktor 2 zwischen dem Fundament und dem Kern im obersten Geschoss vorliegt. Allerdings nicht bezogen auf einen Fundamentpunkt an der Gebäudefront gegen das Bahngleis, sondern bezogen auf einen Fundamentpunkt des Hochhauskerns. Und dieser befindet sich in einer Distanz von 30 m vom Gleis und nicht in einer Distanz von 12 m, wie die Fassade des 6-geschossigen Trakts (siehe Bild 10). Letzten Endes ergaben sich in den Büroräumen des 6-geschossigen Trakts maximale Erschütterungen von 0.44 mm/s. Prognostiziert waren 0.6 mm/s. In den Wohnungen im 13. OG wurden maximale Schwingungen von 0.21 mm/s gemessen, während die Prognosen Werte von 1.2 mm/s voraussagten.

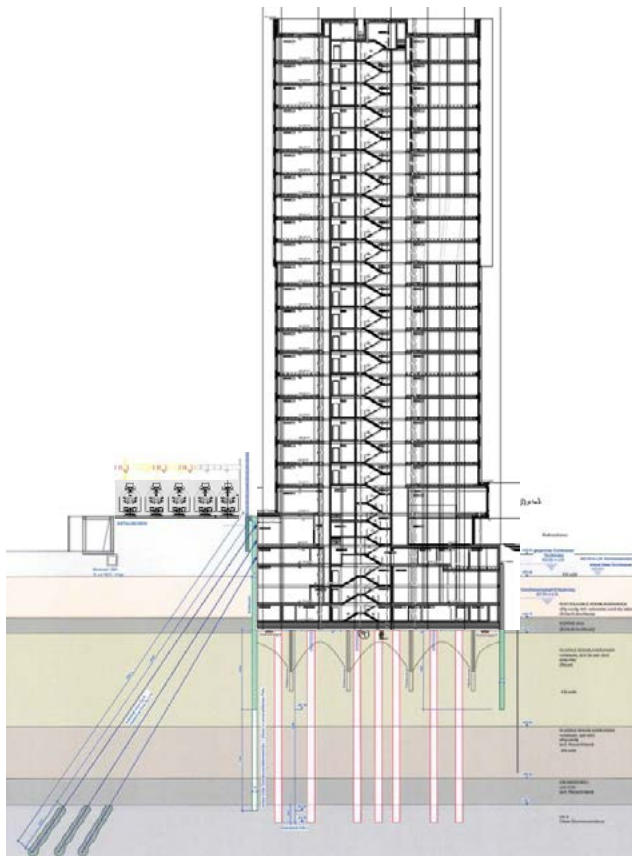


Bild 11 Hochhaus Andreas-Turm in Zürich

Das projektierte 25-geschossige Hochhaus „Andreas-Turm“ in Zürich-Oerlikon (Bild 11) befindet sich in einer Distanz von 4 m von nächstgelegenen Gleis. Bei dieser geringen Distanz müsste man bei einem „normalen“ Gebäude mit sehr starken Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen rechnen. Eine elastische Lagerung wäre unumgänglich.

Stellt sich die Frage, ob - unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse aus Messungen an vergleichbaren Hochhäusern – tatsächlich eine elastische Lagerung erforderlich ist. Ein wesentlicher Faktor ist die Gründungstiefe von 20 m unterhalb der Schienenkote. Dadurch vergrössert sich der massgebende Abstand von 4 m auf 20.5 m, was die Anregung des Gebäudes ganz erheblich verringert. Um dies zu verifizieren, wurden Messungen in Bohrlöchern vorgenommen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die in der Prognose getroffenen Annahmen korrekt waren und auf eine elastische Lagerung der Fundamentplatte verzichtet werden kann. Eine elastische Lagerung der Wand gegen die Gleise ist natürlich trotzdem erforderlich.

Schlussfolgerungen

Hochhaus-Projekte in der Nähe von Eisenbahngleisen nehmen in Bezug auf Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen eine Sonderstellung ein. Einerseits ist die Tragweite der zu fällenden Entscheide extrem gross. Andererseits sind die Berechnungsverfahren, welche die Entscheidungsgrundlagen liefern sollten, nicht unbedingt über alle Zweifel erhaben. Aufgrund der von uns durchgeführten Berechnungen und Messungen lassen sich folgende Aussagen machen:

- Dynamische FE-Berechnungen, welche das Gesamtproblem, d.h. Hochhaus, Baugrund und dynamische Anregung durch den Zugverkehr, zuverlässig modellieren können, existieren heute noch nicht. Insbesondere im Bereich der Ankopplung (Übergang der Bodenerschütterung auf das Gebäudefundament) liegen grosse Diskrepanzen zwischen Messungen und dem FE-Modell vor.
- Dynamische FE-Berechnungen, welche lediglich das Hochhaus (mit dynamischer Anregung auf der Fundamentkote) modellieren, ergeben vielversprechende Ergebnisse. Allerdings muss man hier bedenken, dass nur ein kleiner Teil der Problemstellung berücksichtigt wird. Die Erschütterungsausbreitung im Boden, die Ankopplungseffekte und auch die Umwandlung von Deckenschwingungen in Körperschall werden dabei nicht erfasst.

- Empirische Terz-Spektren-Methoden, wie sie gegenwärtig häufig für die Prognose von Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen eingesetzt werden, scheinen uns immer noch das zuverlässigste Verfahren darzustellen.

Im Gegensatz zu „normalen“ Gebäuden ist bei Hochhäusern folgendes zu beachten:

- Wegen der grossen Masse pro Fläche ist die auf ein Hochhaus übertragene Erschütterung geringer als bei einem „normalen“ Gebäude.
- Der Hochhauskern schwingt in seiner vertikalen Eigenfrequenz. Dies kann in den obersten Geschossen zu einer Verdoppelung der vertikalen Schwingungen führen.
- Diese Verstärkung der vertikalen Schwingungen betrifft primär die tieferen Frequenzen. Bei Frequenzen über 30 Hz wird sogar eine Abschwächung beobachtet.
- Bei einem ungünstigen Verhältnis zwischen Eigenfrequenz des Kerns und Eigenfrequenz der Geschosdecken kann es zu extremen Verstärkungen der Deckenschwingungen kommen.

Ähnlich wie bei „normalen“ Gebäuden, wird es auch bei Hochhäusern eine grosse Anzahl von Messungen brauchen, bis wir eine zuverlässige Immissionsprognose erstellen können. Allerdings dürfte die FE-Modellierung bei Hochhäusern – nicht zuletzt wegen der möglichen Schwingungsverstärkung durch den Gebäudekern - einen grösseren Stellenwert haben als bei „normalen“ Wohnhäusern.