

**The 14th World Conference on Earthquake Engineering
October 12-17, 2008, Beijing, China**



***RETROFITTING (AUFRÜSTEN) VON
BETONGEBÄUDEN IN ERDBEBENGEBIETEN
DURCH VERSCHIEDENE METHODEN***

Müller Christian

**Lehrveranstaltung: Baudynamik und Erdbeben 1
WS 2008/2009**

Betreuer: Univ. Prof. DI Dr. techn. Rainer Flesch

Institut für Betonbau der Technischen Universität
Graz



Begriffsdefinition

- **Retrofitting:**
Der Einsatz von neuen Technologien bei älteren Systemen um sie qualitativ aufzurüsten.
- **Seismic retrofitting:**
Bedeutet das Auf- oder Umrüsten bestehender baulicher Strukturen um sie gegen Erdbeben widerstandsfähiger zu machen.

Notwendigkeit besteht, da man bei vielen älteren Gebäuden, vor allem bei jenen, die zwischen 1960-1970 erbaut wurden, keinen ausreichenden Schutz im Erdbebenfall eingeplant hat.

Es wurden auch neue Auflagen seitens der jeweiligen Regierungen bezüglich deren Sicherheit im Erdbebenfall gesetzt.

Die Anwendungen und Verbesserungen von Materialien in ihren Zusammensetzungen und Kombinationen bei Retrofitting hat v.a. in den letzten 10-20 Jahren stark zugenommen.

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Strategien bei seismischer Nachrüstung

- **Verstärkung:**
Erhöhung der Bewehrung, Einbau von Stegen oder zusätzlichen Mauern, Anbringen von Ummantelungen oder Stahlringen bei Stützen, Verkleidungen bei Wänden, Verstrebrungen bei Rahmen oder zusätzliche Rahmenkonstruktionen
- **Selektive Schwächung:** Querschnittsverkleinerungen verbessern die Duktilität und deshalb die Energiedissipation (Dämpfung)
- **Zusätzliche Dämpfung:**
Anbringung von dämpfenden, stabilisierenden Elementen oder Basisisolationssystemen

Kombinationen sind sinnvoll

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Retrofitting-Techniken bei tragenden Elementen von Betonbauten

- FRP (Fiber Reinforced Polymeres): Faserverstärkte Kunststoffe
- CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymeres): Kohlefaser verstärkte Kunststoffe
- TRM (Textile Reinforced Mortar): Textil verstärkte Zementmörtel
- SRF (Super Reinforced with Flexibility): Polyesterfaser verstärkter Kunststoff
- ECC (Engineered Cemented Composites): zementgebundener Mischwerkstoff
- FRC (Fiber Reinforced Concrete): Faserverstärkter Beton

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Retrofitting-Techniken bei tragenden Elementen von Betonbauten

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

- **HPFRCC** (High Performance Fiber Reinforced Cemented Composites): hochfester faserverstärkter zementgebundener Mischwerkstoff
- **MDF** (Micro Defect Free): neuentwickelter Spritzbeton
- **Stahltafeln**
- **CFS** (Carbon Fiber Sheets): Kohlefasertafeln
- **CFRP straps**: Kohlefaser verstärkte Kunststoffbänder
- **Prestressed External Hoops**: Externe Ringvorspannung
- **BRB** (Buckling Restrained Braces): beulungsgedämpfte Streben aus betongefüllten Stahlrohren mit Stahlkern

Retrofitting-Techniken bei tragenden Elementen von Betonbauten

- CFT (Concrete Filled Tube): Betongefüllte Rohre
- CES (Concrete Encased Steel): Stahlbeton mit FRC
- PT-Rods (Post Tensioned): später vorgespannte, diagonale Stahl-Stäbe
- Stahlrahmen

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

FRP (Fiber Reinforced Polymeres): Faserverstärkte Kunststoffe (05-03-0075)

- **Bestehen aus:**
Fasermatrix (z.B. Carbonfasern CFRP) und einem Kunststoffkleber (z.B. Epoxyharz)
- **Verwendung:**
Ummantelung bzw. Verkleidung bestehender Strukturen (Säulen, Balken, Wände)
- **Vorteile:**
Hoher Verstärkungseffekt bei geringem Materialeinsatz
10-fache Festigkeit von Stahl
Korrosionsbeständig
Schneller Einbau bei geringem Raumbedarf
- **Nachteile:**
Geringe Temperaturbeständigkeit
Ablösungsproblem besonders bei feuchtem Untergrund
Durch Ummantelung sind innere Schäden nicht erkennbar

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Verhalten eines Stahlbetonrahmens unter seismischer Einwirkung vor und nach einer Reparatur mit FRP

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Rahmenmodell

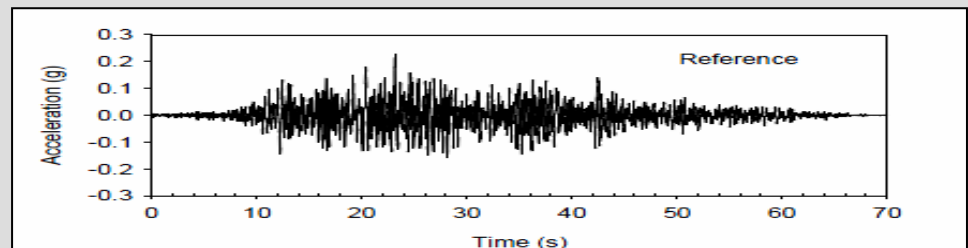
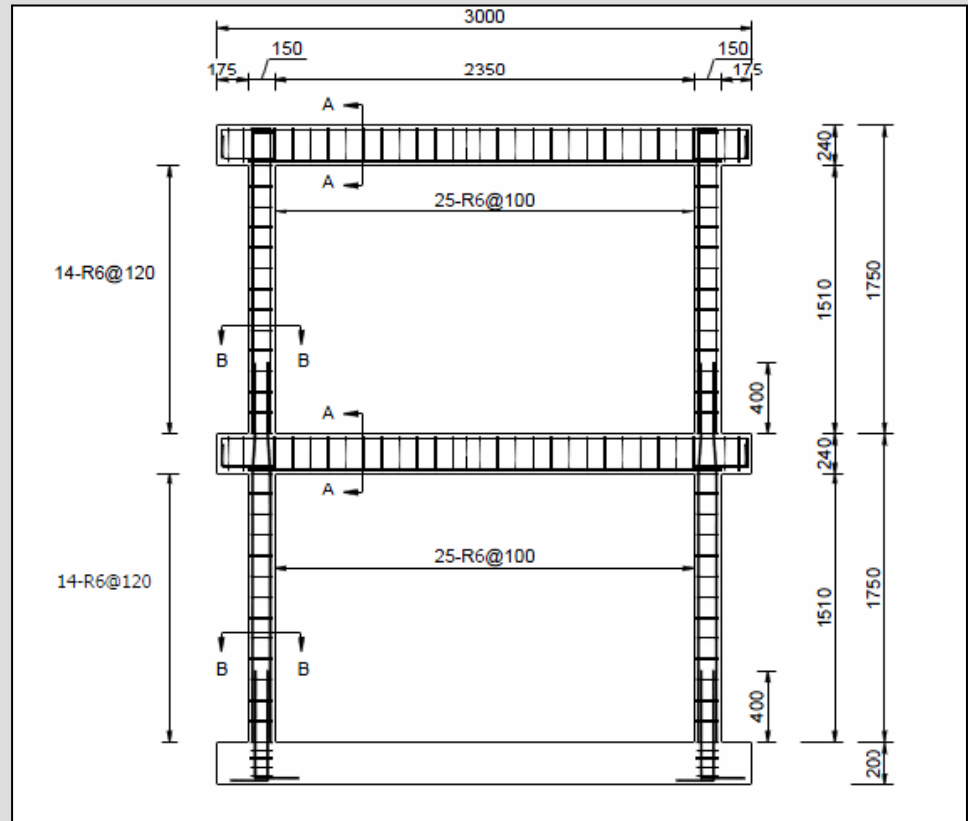
nicht für Erdbeben entworfen,
Eigenfrequenz:
4,60Hz

M 1:2 erfordert
700kg zusätzliche
Masse je
Stockwerk und
einen Zeitfaktor
von $1/\sqrt{2}$



Simuliertes Erdbeben

Magnitude: 7,8
Chile, 1985



Resultat:

- Bei einer maximalen Bodenbeschleunigung von 0,46g große Risse an Rahmenfüßen und -knoten
- Maximaldrift von 2,5% in der ersten Etage
- Eigenfrequenz: 2,05Hz (zu Beginn 4.60Hz)

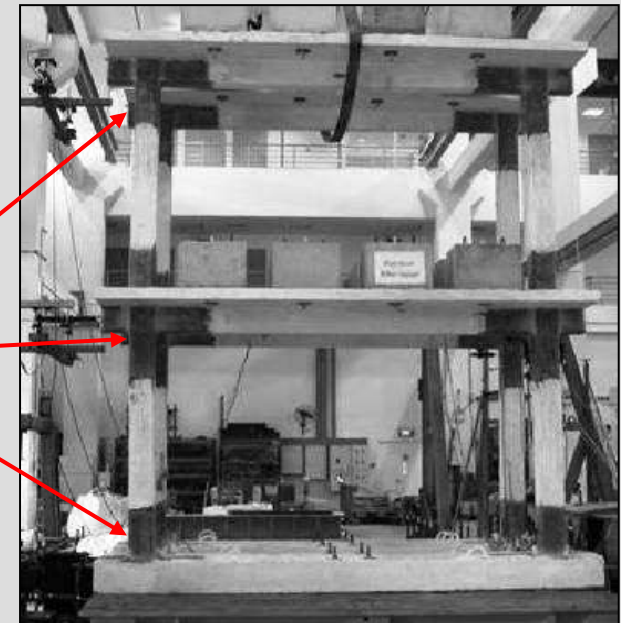


Reparatur:

Epoxy wird in Risse injiziert, auf den abgeschliffenen Betonoberflächen aufgetragen und mit epoxygetränktem Glasfasergewebe ummantelt

Eigenfrequenz: 4,82Hz

Erneutes simuliertes Erdbeben



Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

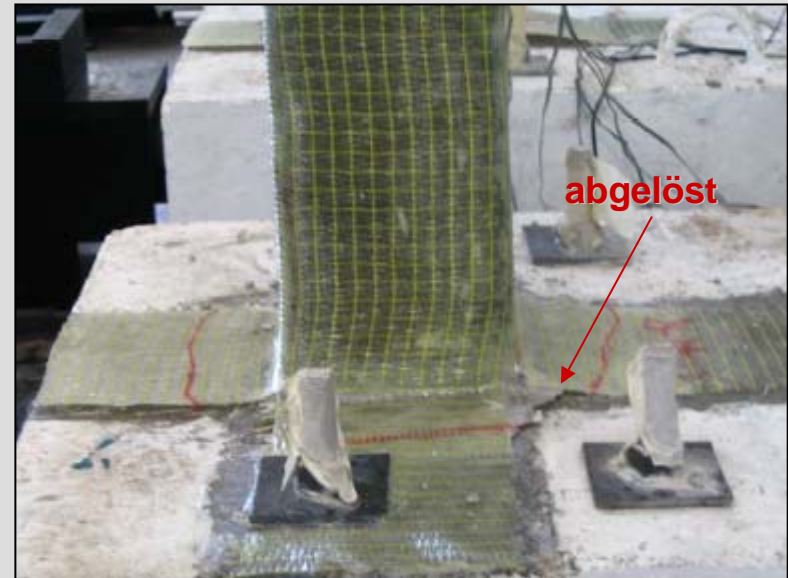
Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

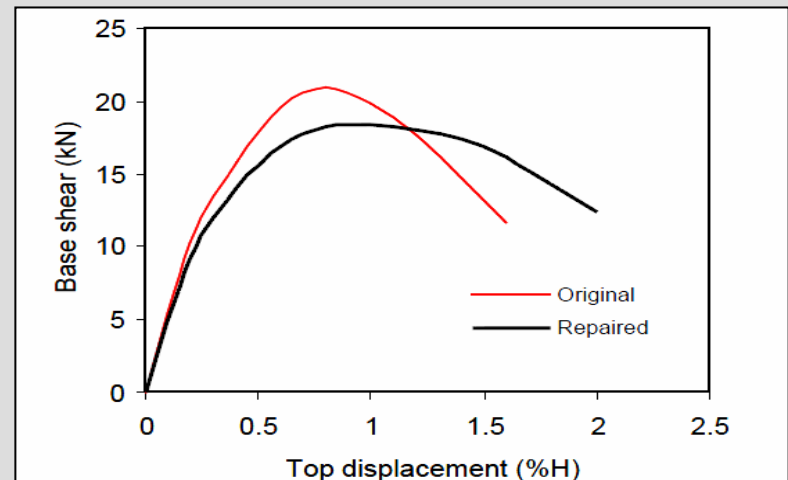
Resultat:

- Der reparierter Rahmen erfährt während des Versuchs einen ähnlichen Steifigkeitsverlust.
- Ein abschließender Test mit 0,69g verursacht das Abreißen der FRP-Lage vom Fundament und Risse im oberen Teil der nicht ummantelten Stütze.



Einspannschub- Drift - Diagramm

vom originalen und reparierten Testrahmen



Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

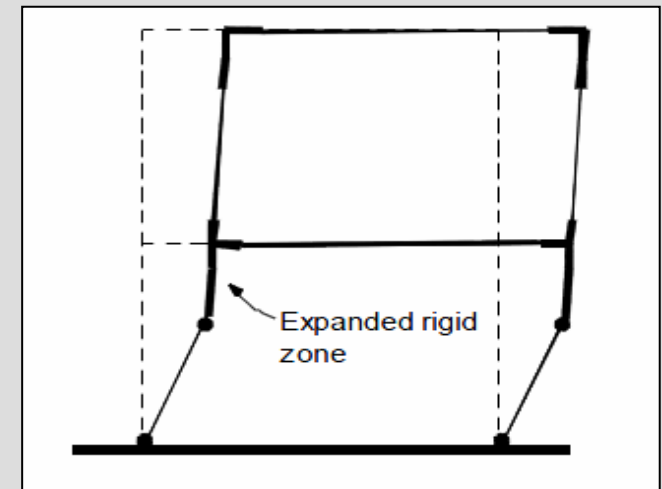
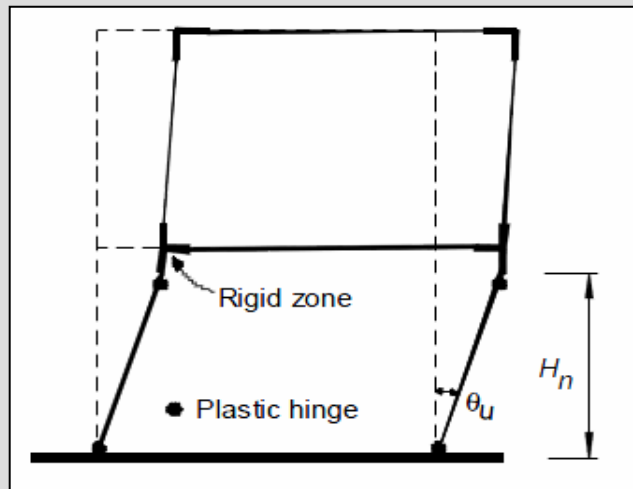
Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Bruchform: Ursprünglicher und reparierter Rahmen

Verschiebung der plastischen Gelenke nach unten bewirkt eine Versteifung des Rahmens nach der Reparatur und eine kleinere Driftkapazität



Die Anwendung von FRP-faserverstärkten Kunststoffen hat sich sehr gut bewährt, um die ursprüngliche Festigkeit und Steifigkeit von erdbebenbeschädigten Stahlbetonrahmen wieder herzustellen.

Dabei wird die Gesamtduktilität deutlich erhöht.

Am effektivsten ist diese Methode in der Stütze und an den Knoten.

Am wenigsten effektiv am Übergang zum Fundament wegen Ablösen der FRP-Streifen, was eine Verankerung erforderlich macht.

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Weiterentwicklung von FRP zu TRM (Textile Reinforced Mortars) (05-03-0071)

Bestehen aus:

Industriell erzeugte Textilien, welche orthogonal gewebt oder nicht gewebt sind. Diese werden zementgebunden.

Verschiedene Textilstärken und Maschengrößen stehen zur Auswahl, um das mechanische Verhalten und die Zementverbundwirkung zu steuern.

Vorteile gegenüber FRP:

temperaturbeständiger,
besseres Haftvermögen auch
bei feuchtem Untergrund,
annähernd gleich große
Zunahme von Duktilität und
Dämpfung

**Anbringung einer TRM-
Ummantelung am Säulenfuß**



Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

SRF (Super Reinforced with Flexibility): Polyesterfaser verstärkter Kunststoff (05-03-0120)

Vorteile gegenüber CFRP:

ökonomischer

10-fache Bruchdehnung

1/40 des E-Moduls

einfacher Einbau

durch das hohe Deformationsvermögen werden die Anzahl der Risse erhöht und daher die Rissbreiten verkleinert, was eine erhöhte Scherfestigkeit zur Folge hat

Table 1 Typical mechanical properties of SRF, CFRP and steel plate

Material	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at tensile strength (%)
SRF (SRF465)	6.3	63	580	17
CFRP	235	* -	3400	1.5
Steel plate (SS400)	220	325	400	20

* CFRP is basically linear elastic and does not yield.

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Beispiele für externe Ringvorspannung mit Stahlstäben oder -platten (12-01-0278, 12-01-0044)

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen



Bei Stützen mit sprödem Scherbruchverhalten kann so der Bruchmechanismus zu einem duktilen Biegebruch verändert werden.

Ringvorspannung von Stahlb.-Stützen mit CFRP Bändern (12-01-0010)



- Wirtschaftliche Methode speziell für Kreisquerschnitte
- Keine vollflächige Verklebung erforderlich

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Verhalten von vier alternativ verstärkten Scherwänden unter weggesteuerter, horizontaler Einwirkung (05-03-0117)

Begriffsdefinition
 Strategien
 Techniken

Verstärken

sel. Schwächen
 zus. Dämpfen

- Verwendete Verstärkungstechniken:

CFS (Kohlefasertafeln)	}	Einfache Nachrüstung, Dicke ~ 5mm
Stahlplatten		

ECC (zementgebundener Mischwerkstoff)	}	Für große Flächen mit Rissbewehrung, Dicke ~ 30mm
MDF (Spritzbeton)		

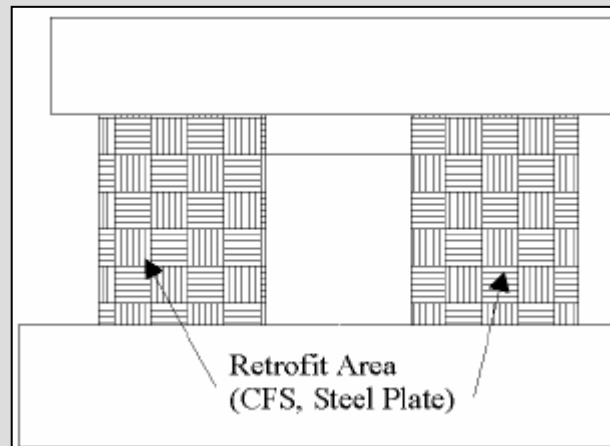
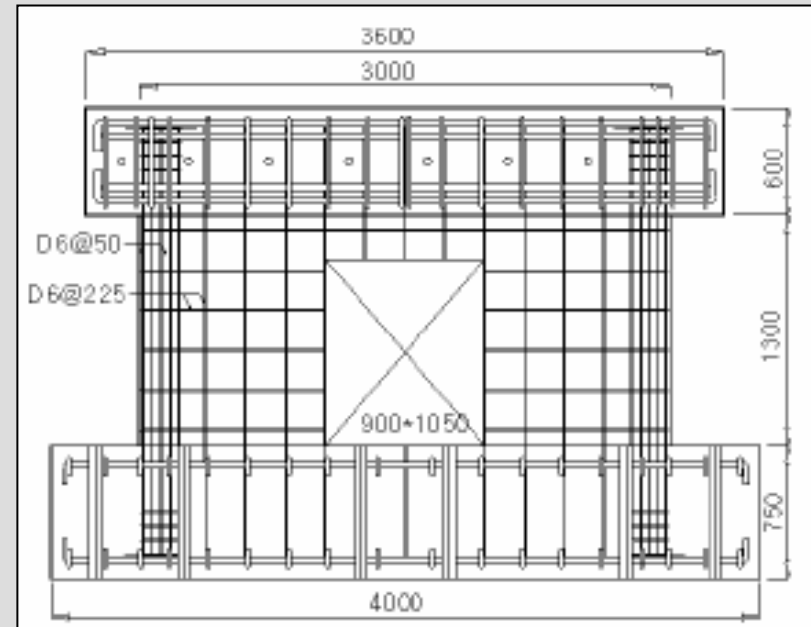
Scherwandmodell:

Scherwanddetails

M 1:2

aus Stahlbeton

später durchgebrochen,
daher nicht mehr für
Erdbeben geeignet



**Verstärkte Bereiche
beidseitig des Durchbruchs**



**Aufbringen der MDF-
Verstärkung (Spritzbeton)**

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Sechs alternative Proben von Scherwänden:

	ohne Durchbruch	mit Durchbruch	nicht verstärkt	verstärkt
WB-soild	*		*	
WB-023		*	*	
WB-CFS		*		*
WB-St.plate		*		*
WB-ECC		*		*
WB-MDF		*		*

Begriffsdefinition

Strategien

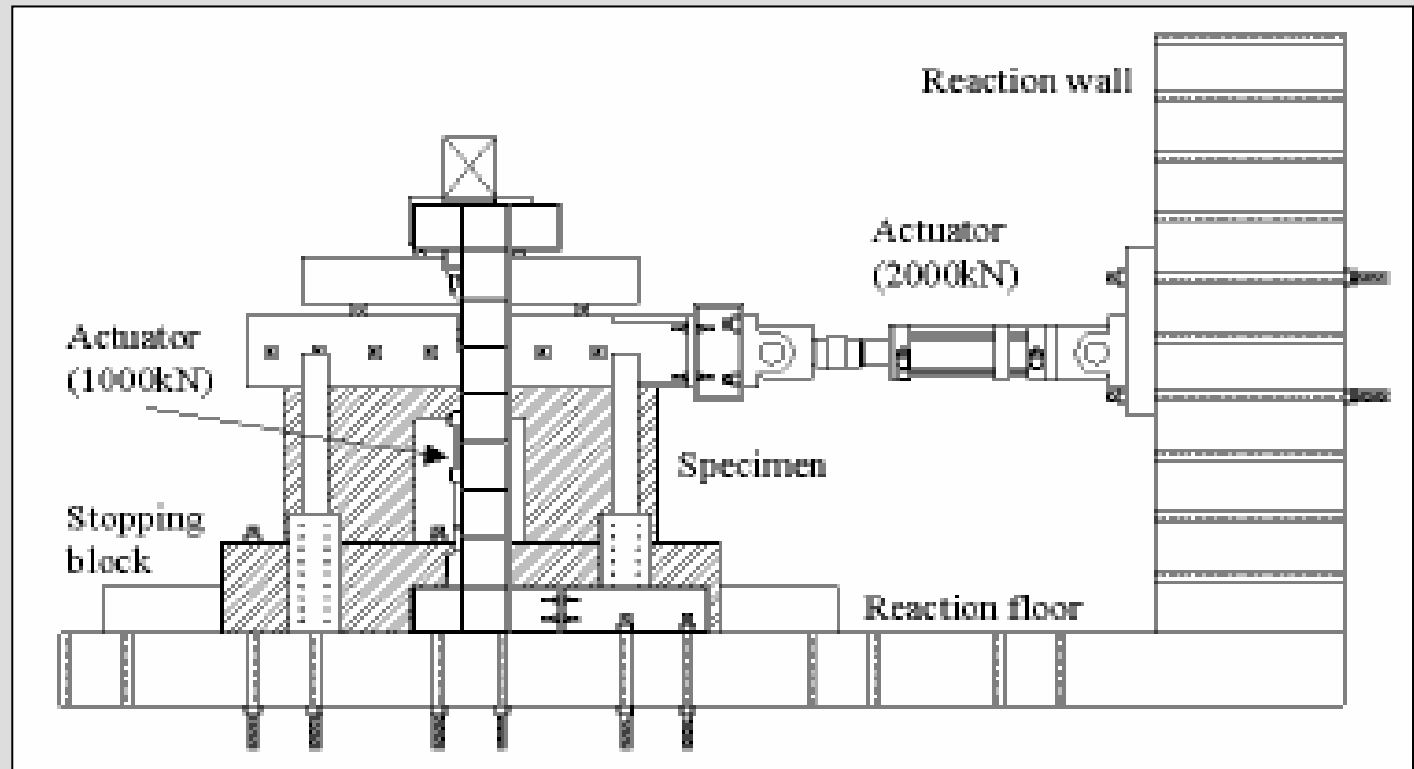
Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Versuchsaufstellung:



Auflast:

10% der errechneten Tragfähigkeit, konstant

Dynamische Einwirkung:

horizontal in Längsrichtung, weggesteuert

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

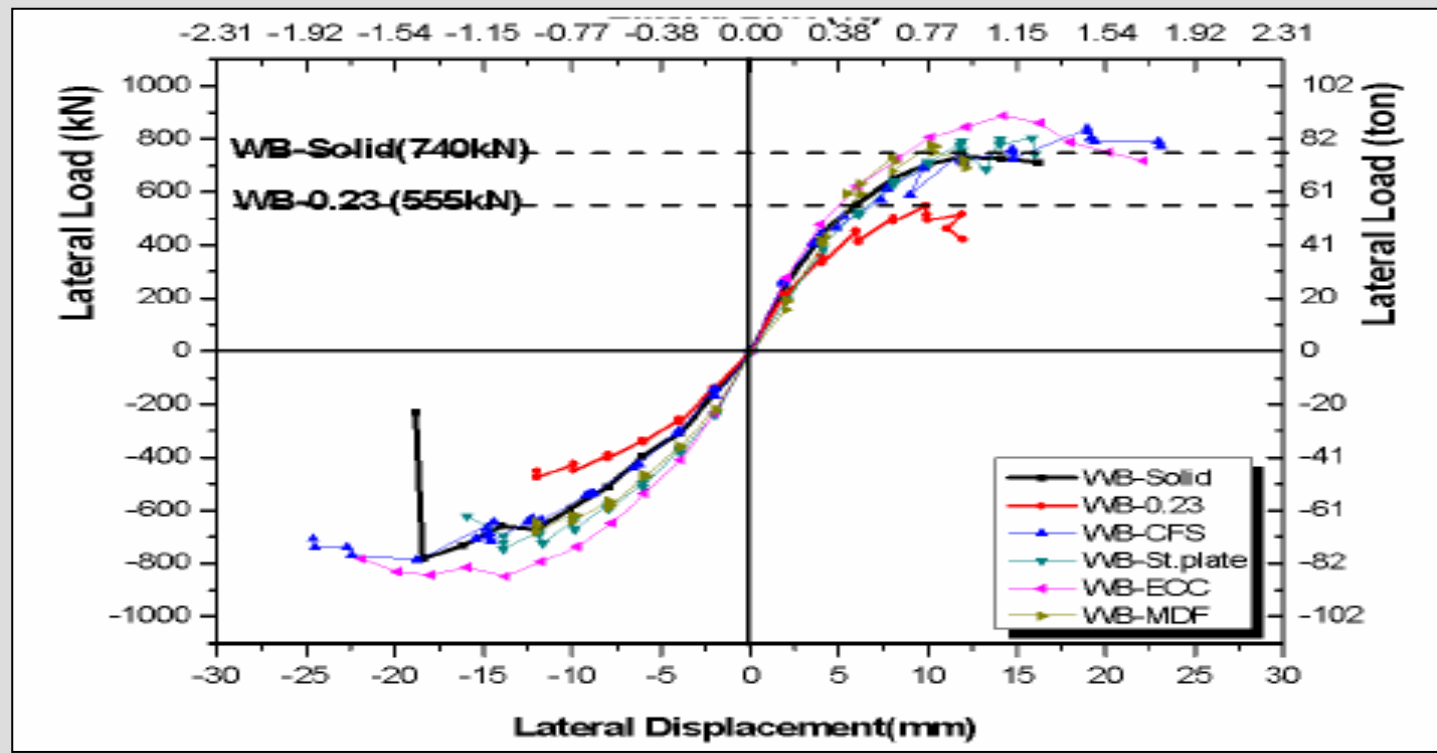
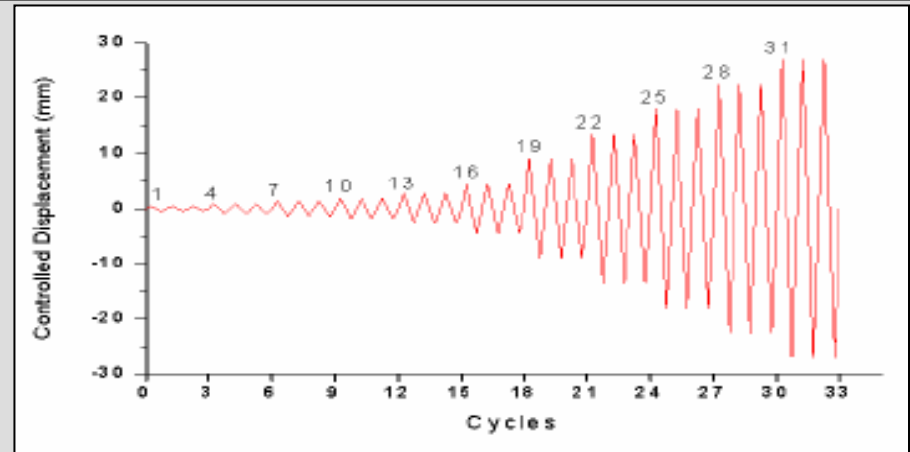
sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Verschiebungs-Verlauf

Drift:

1/1000, 1/500, 1/300,
1/250, 1/200, ...
je drei Lastwechsel

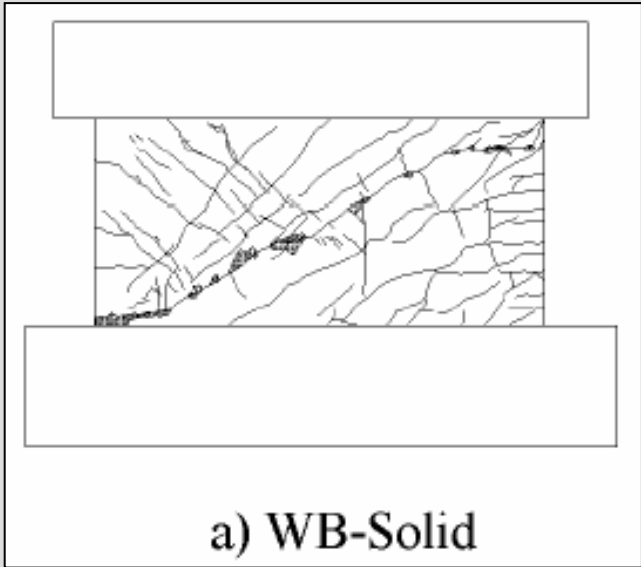


Scherkraft-Verschiebungs-Diagramm

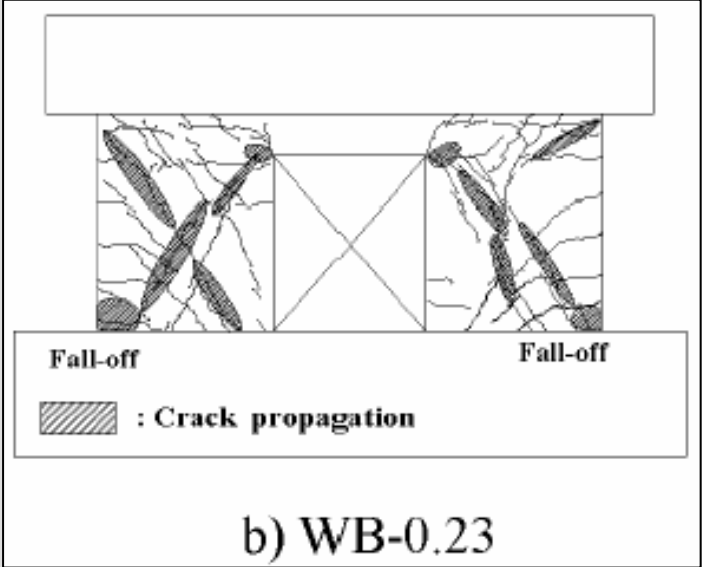
Begriffsdefinition
Strategien
Techniken
Verstärken
sel. Schwächen
zus. Dämpfen

Resultat:

unverstärkte Proben



vorwiegend Scherbruch

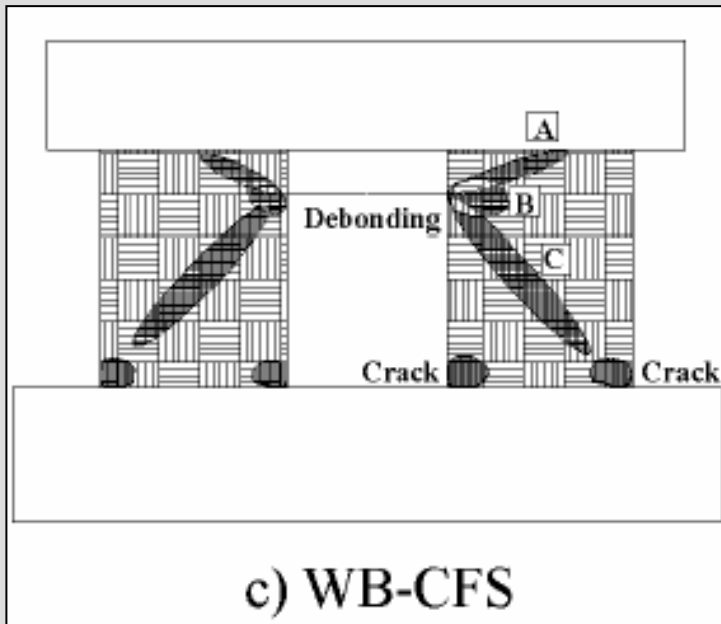


**Größter Widerstand um 25%
kleiner als bei a) aufgrund
des Durchbruchs**

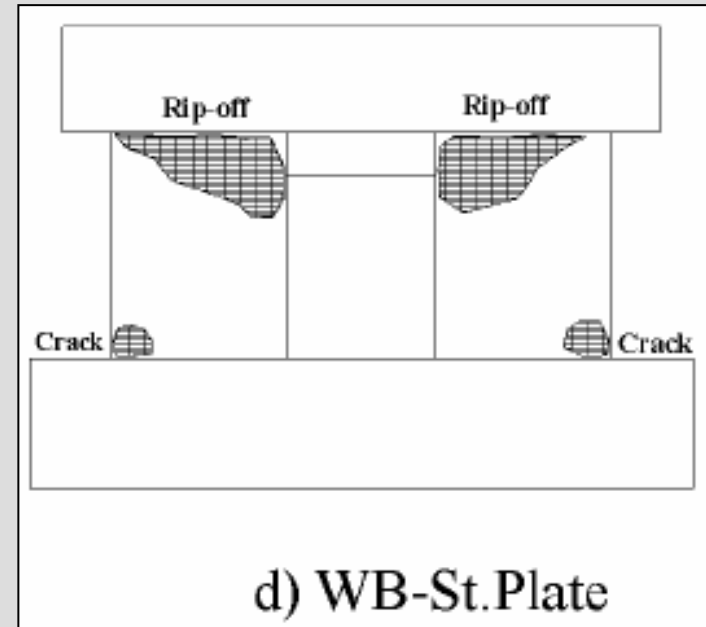
- Begriffsdefinition
- Strategien
- Techniken
- Verstärken**
- sel. Schwächen
- zus. Dämpfen

Resultat:

verstärkte Proben



Eher Rissbildung als Verbundverlust



vorwiegend Verbundverlust

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

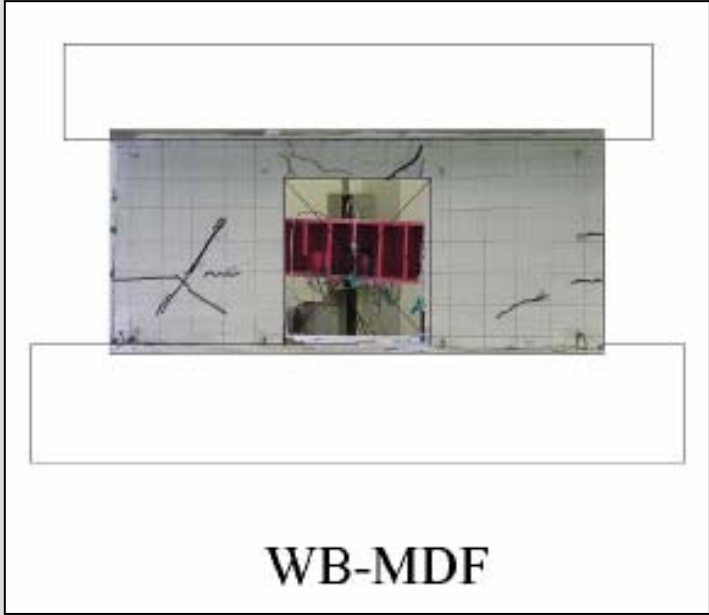
zus. Dämpfen

Resultat:

verstärkte Proben



**besserer Verbund, daher
mehr Risse an der
Oberfläche**

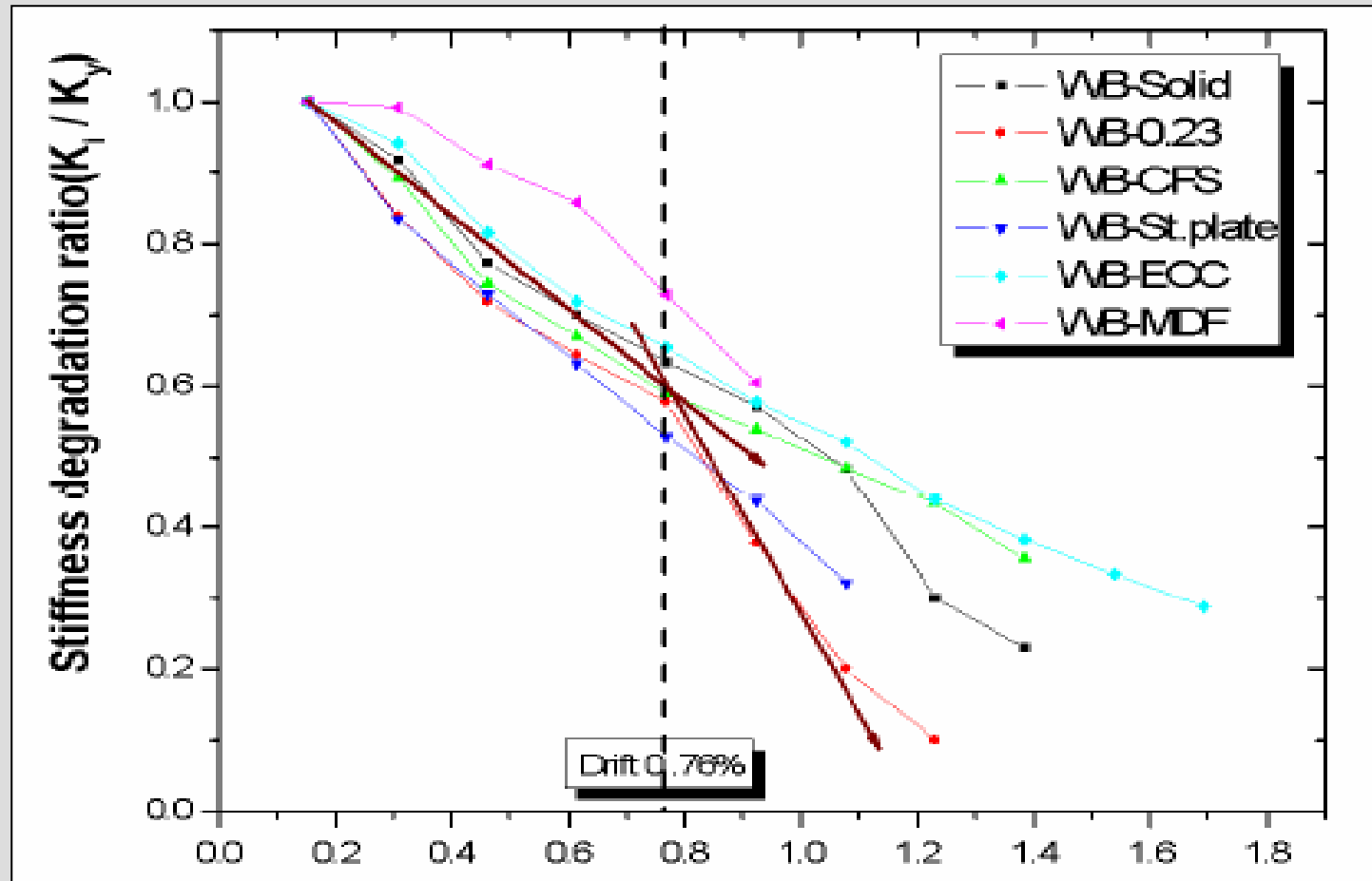


**geringerer Verbund, daher
weniger Risse an der
Oberfläche**

Begriffsdefinition
Strategien
Techniken

Verstärken
sel. Schwächen
zus. Dämpfen

Steifigkeitsreduktion-Drift-Diagramm:



- Die verstärkten Proben hatten im Schnitt einen um 12% größeren Widerstand, aber ein geringeres Dämpfungsvermögen als WB-Solid.
- Die Steifigkeitsreduktion ist bei den verstärkten Proben kleiner

Begriffsdefinition

Strategien

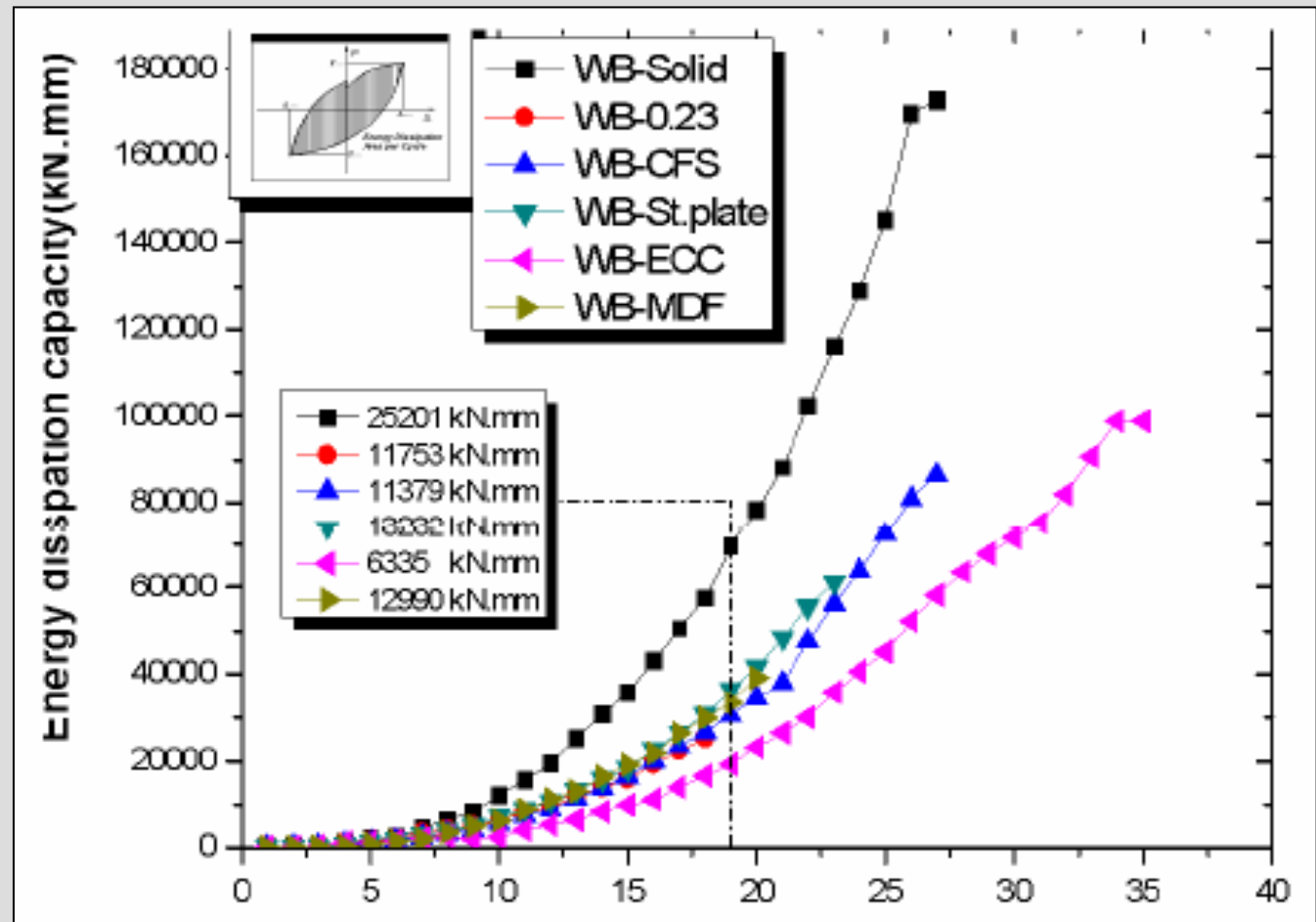
Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Energiedämpfung-Lastwechsel-Diagramm:



Obwohl die verstärkten Proben einer höheren Spitzenbelastung standhielten als WB-Solid, war das Dämpfungsvermögen kleiner.

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Strategie der selektiven Schwächung (05-03-0074)

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

- **Prinzip:**

Unelastische Systemmechanismen, die zu spröden Scherbrüchen neigen werden durch gezielte Schwächung an ausgewählten Stellen zu duktilerem und dämpfendem Verhalten verändert.

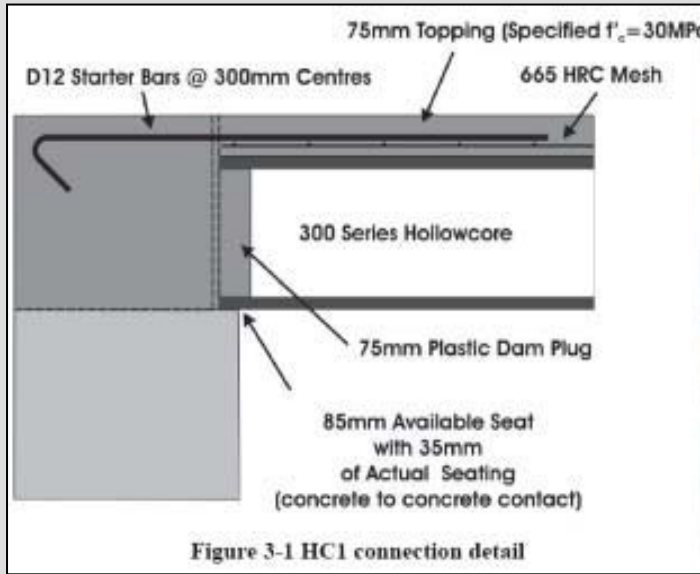
Gezielte Verstärkungsmaßnahmen können daher ergänzend erforderlich werden.

- **Vorteil:**

Ökonomisch, weil in Summe weniger verstärkt werden muß als bei reinem Verstärkungskonzept.

1. Beispiel für eine selektive Schwächung an einer Hohlkammerdecke

Probe ohne selektive Schwächung:



Bruchverhalten einer originalen Hohlkammerdecke nach seismischer Beanspruchung

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

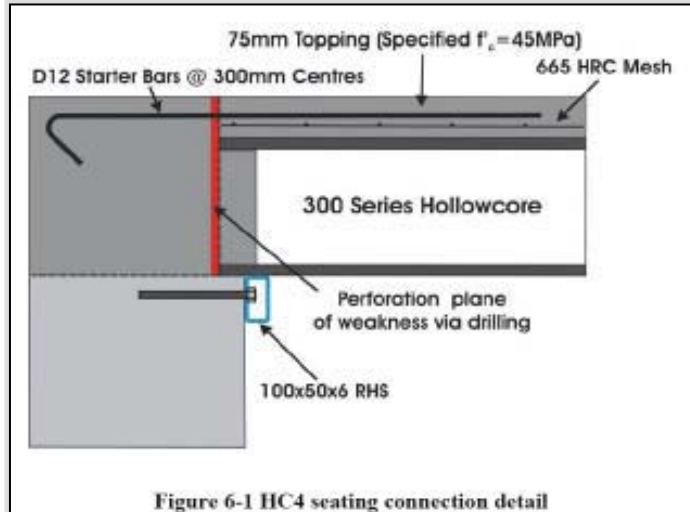
Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

1. Beispiel für eine selektive Schwächung an einer Hohlkammerdecke

Probe mit selektiver Schwächung:



Bruchverhalten einer am Auflager teilweise abgetrennten und zusätzlich unterstützten Hohlkammerdecke nach seismischer Beanspruchung

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

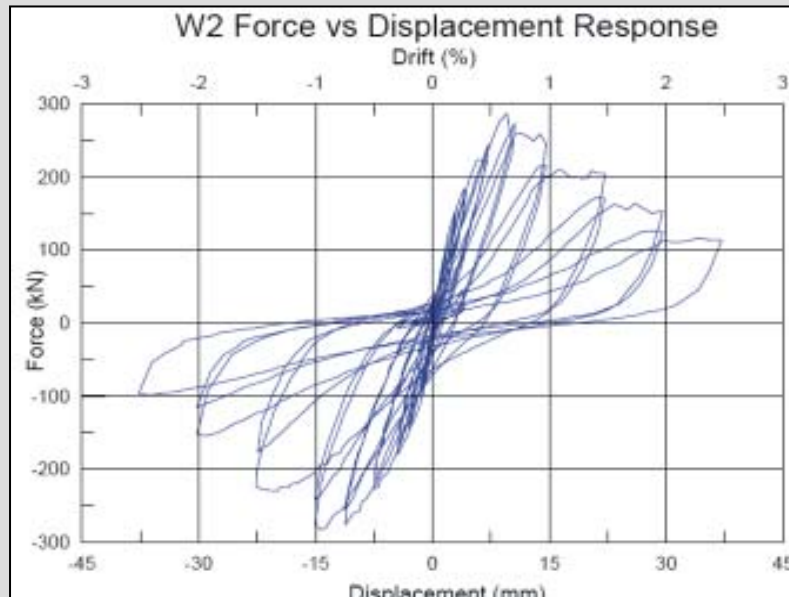
Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

2. Beispiel für eine selektive Schwächung an einer Scherwand

Probe ohne selektiver Schwächung:



Bruchverhalten einer originalen Scherwand nach seismischer Beanspruchung

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

2. Beispiel für eine selektive Schwächung an einer Scherwand

Probe der durch Stahlplatten und FRP reparierten Scherwand, welche durch eine vertikale Fuge geschwächt wurde:

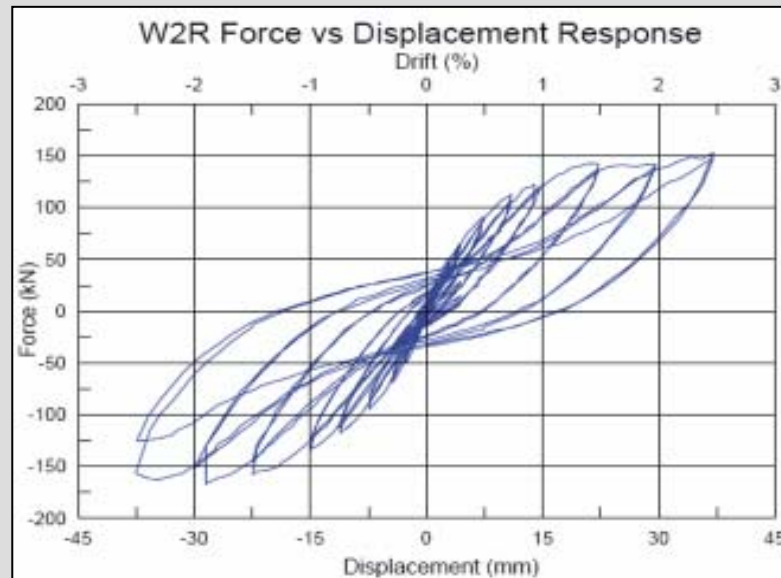
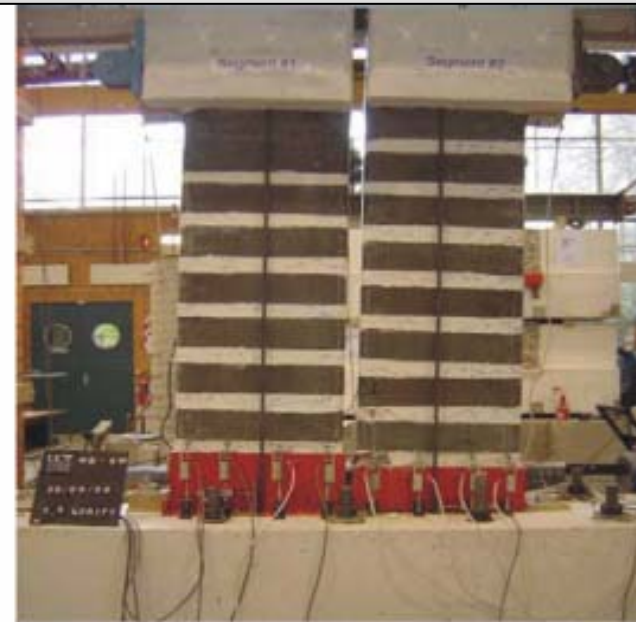


Figure 7-17: Force versus displacement response for W2R



Bruchverhalten einer reparierten und geschwächten Scherwand nach seismischer Beanspruchung

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

3. Beispiel für eine selektive Schwächung an einem Stahlbetonrahmen

Begriffsdefinition

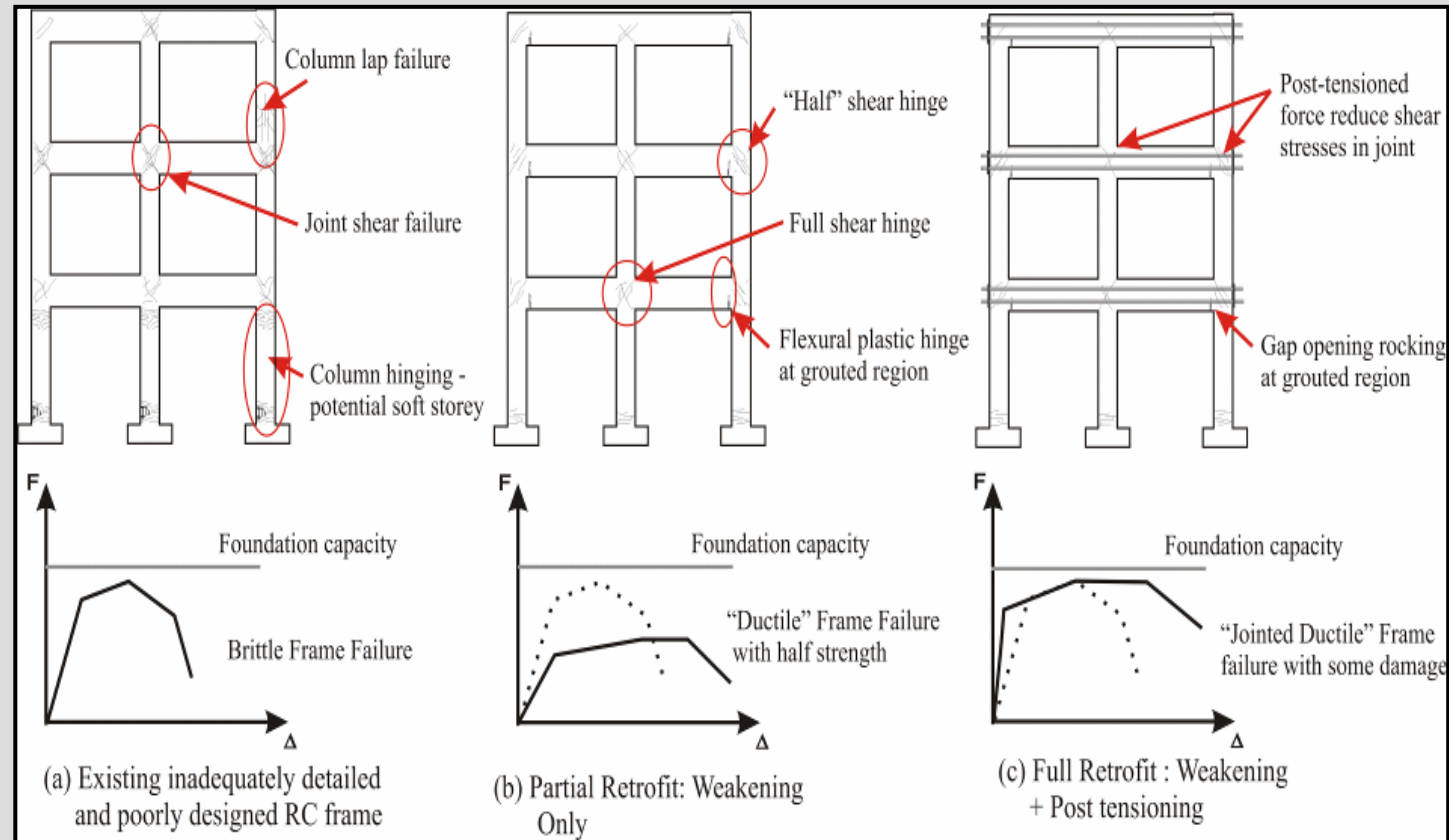
Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen



Nicht erdbebengerecht



geschwächt



vorgespannt

Strategie der zusätzlichen Dämpfung durch eine BRB-Versteifung (05-03-0213)

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

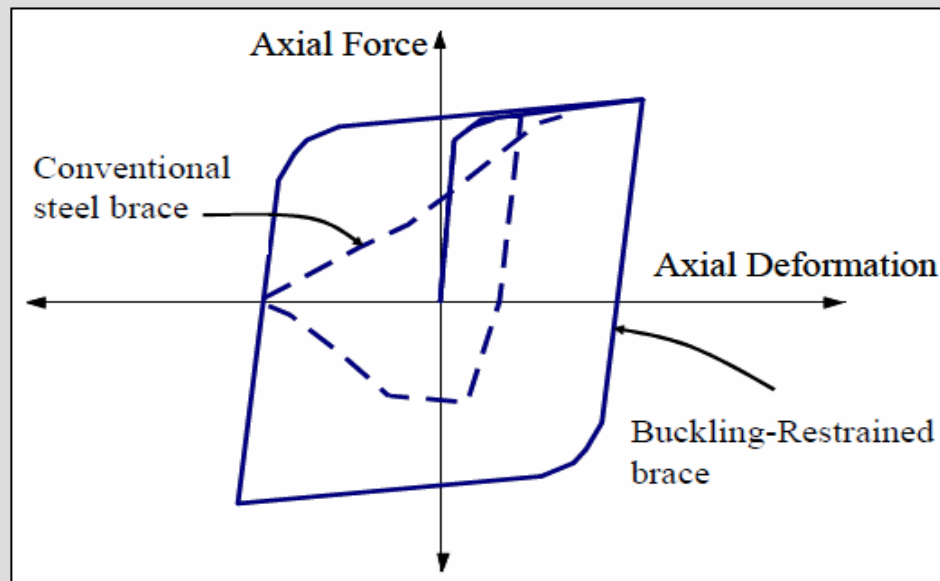
sel. Schwächen

zus. Dämpfen

- **Prinzip BRB:**

Energiedissipation durch beulungsdämpfende Streben aus betongefüllten Stahlrohren mit einem Stahlkern.

Das Dämpfungsvermögen ist gegenüber einer konventionellen Stahlstrebe höher (siehe Abbildung).



Verhalten eines Stahlbetonrahmens unter dynamischer Einwirkung, die durch eine BRB-Versteifung gestützt wird

Begriffsdefinition

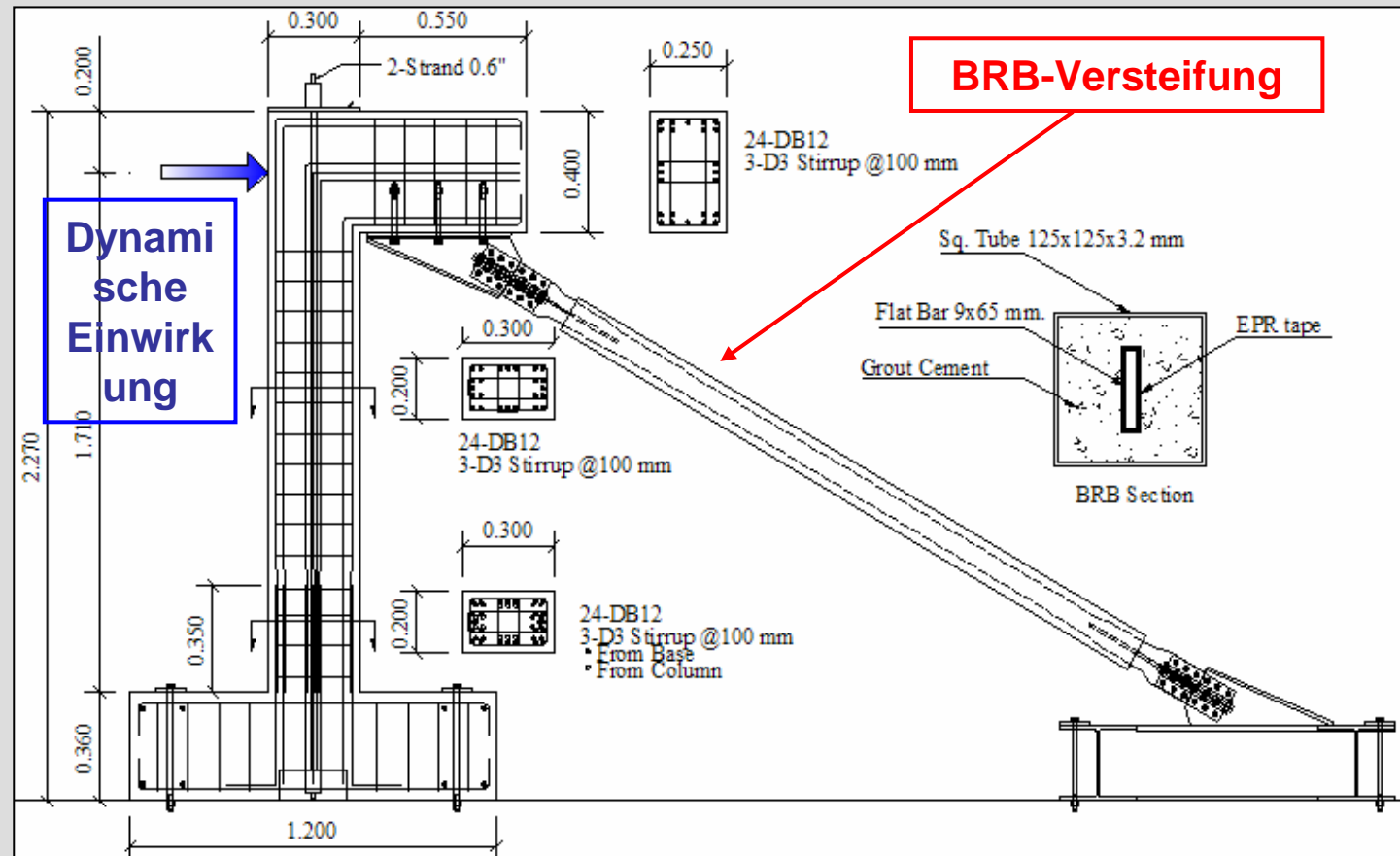
Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen



Horizontaler, dynamischer, weggesteuerter Belastungsverlauf

Begriffsdefinition

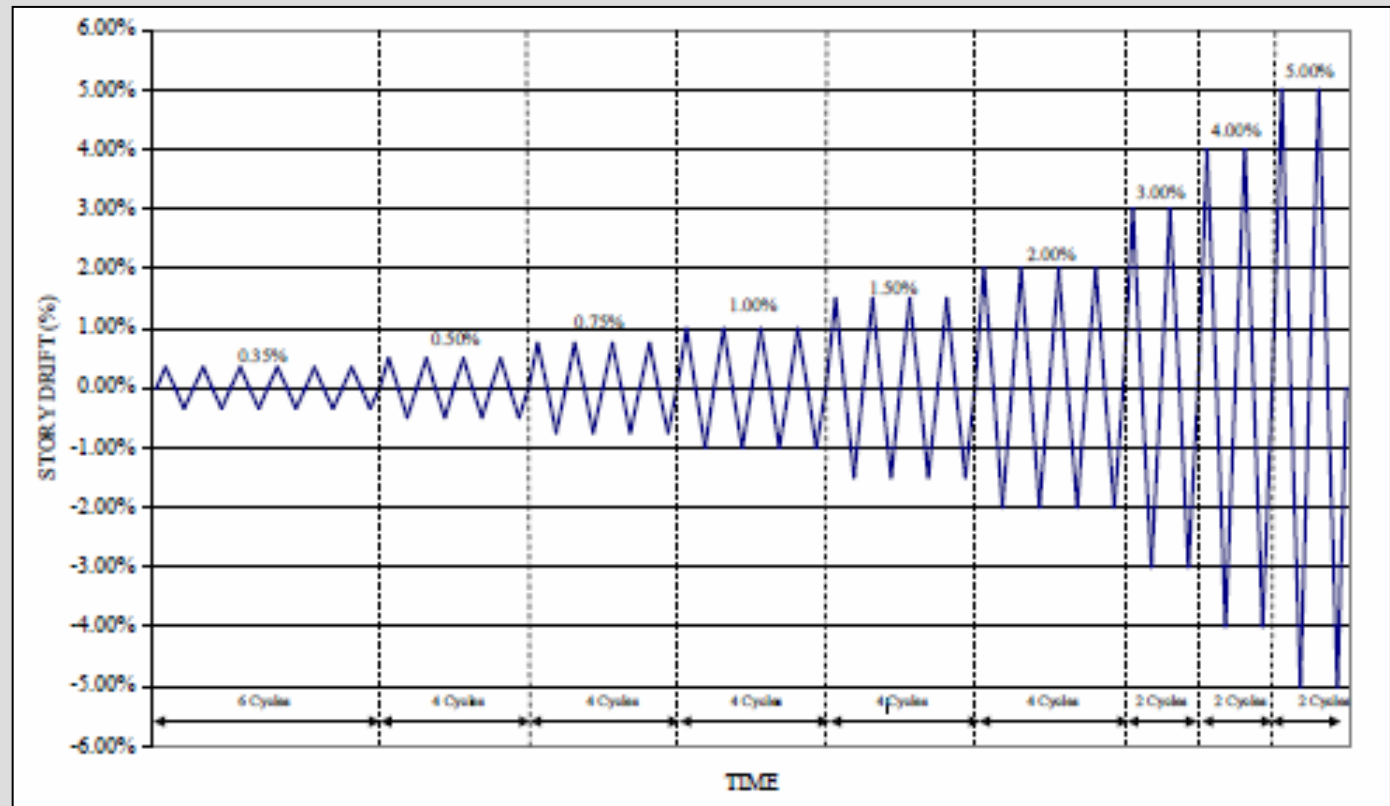
Strategien

Techniken

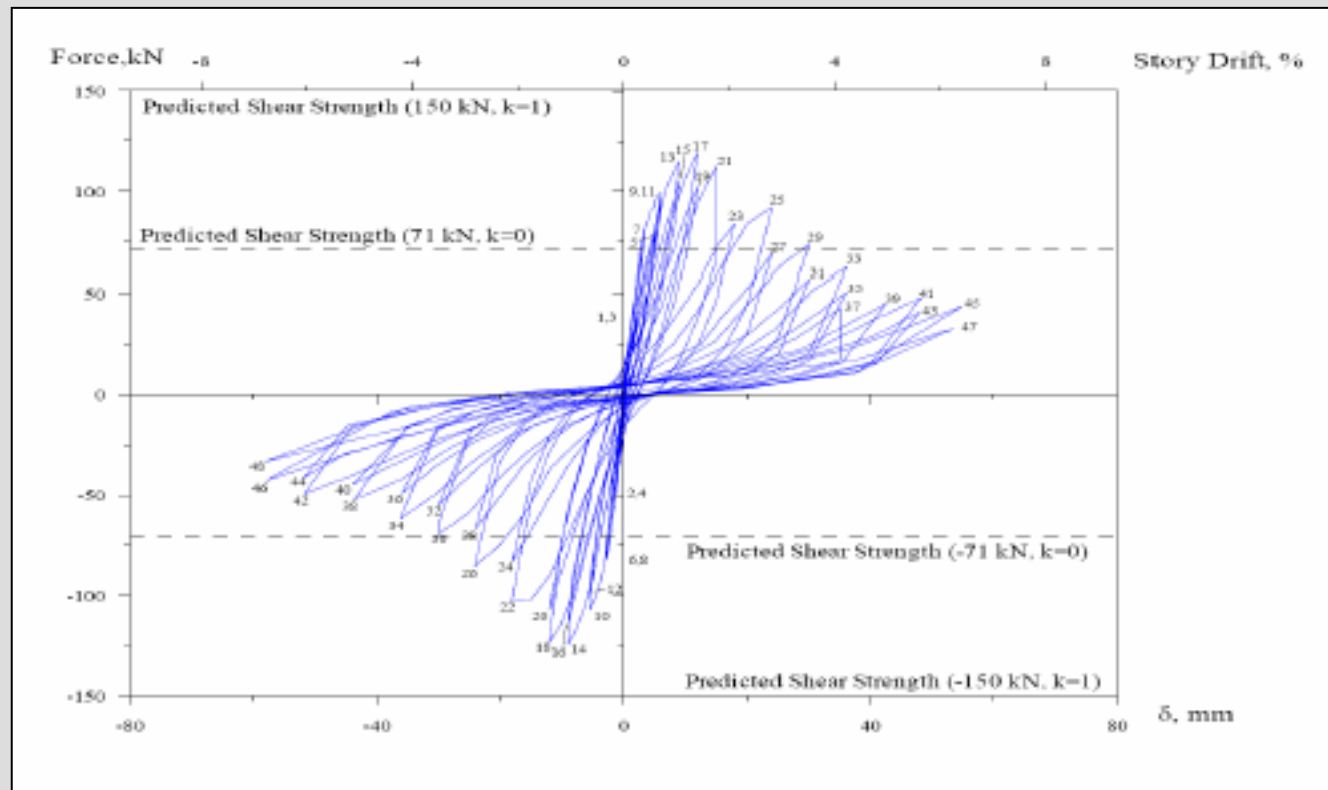
Verstärken

sel. Schwächen

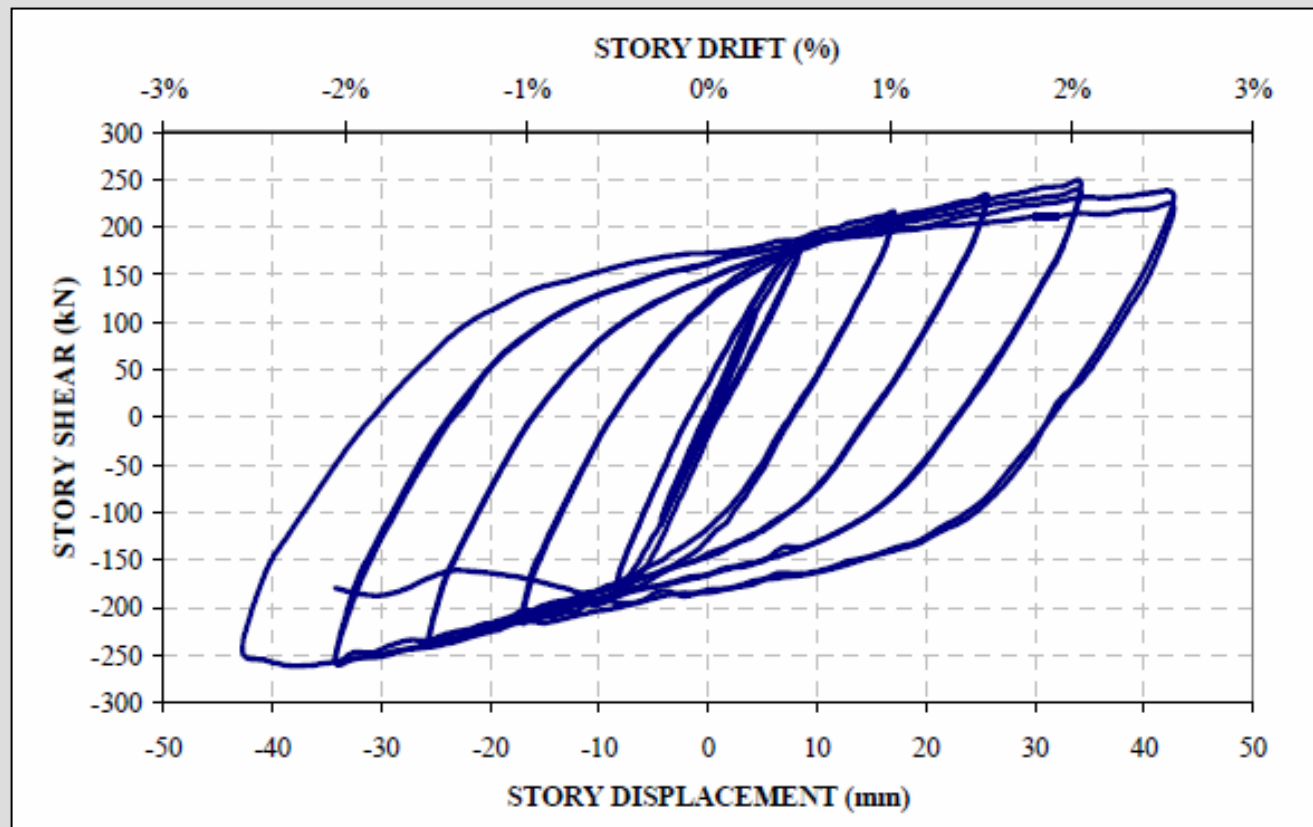
zus. Dämpfen



Hysteresisschleifen für einen nicht-duktilen Rahmen ohne BRB-Versteifung



Hysteresisschleifen für den nicht-duktilen Rahmen mit BRB-Versteifung



Begriffsdefinition

Strategien

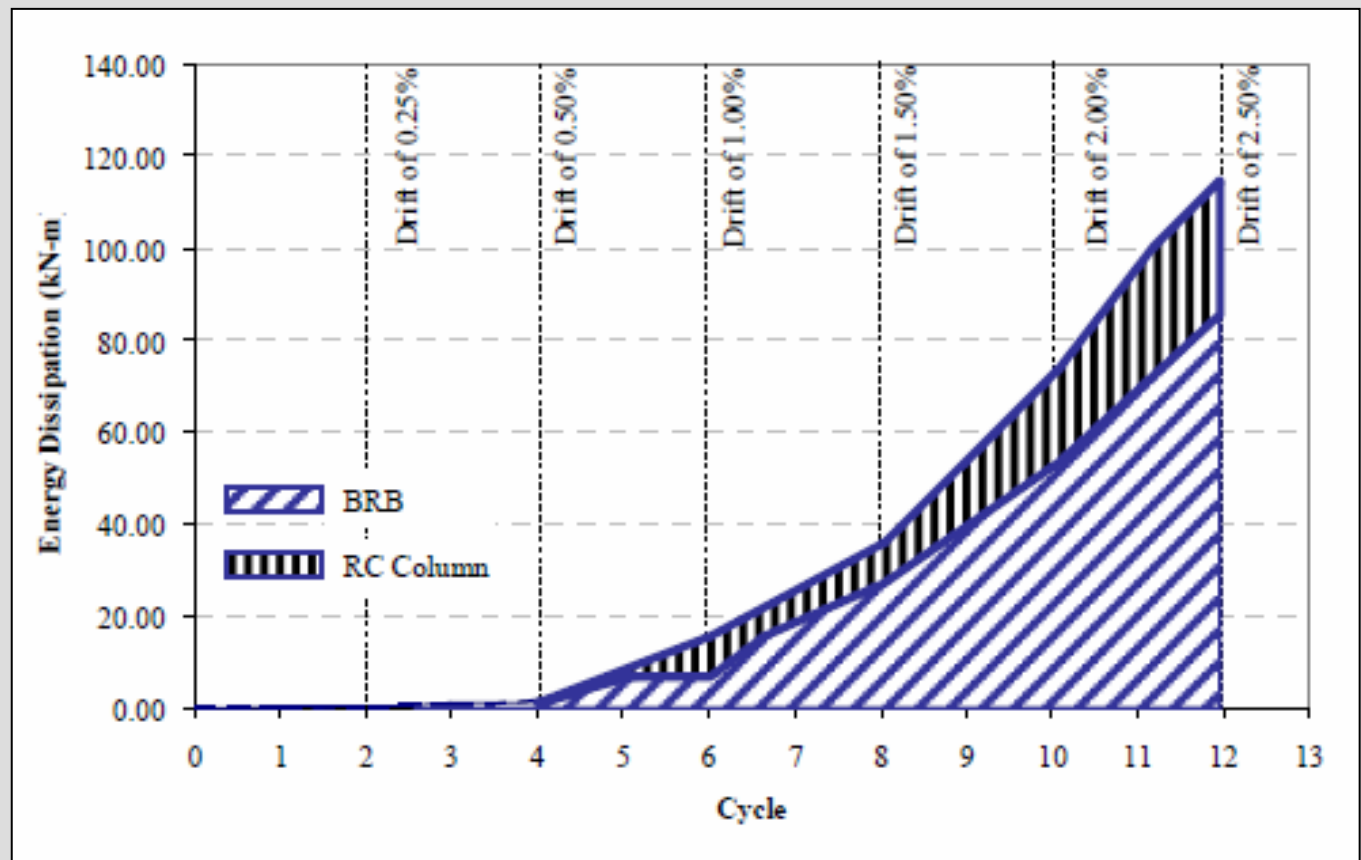
Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Aufteilung der Energie-Dissipation auf Rahmen und BRB-Versteifung



Begriffsdefinition

Strategien

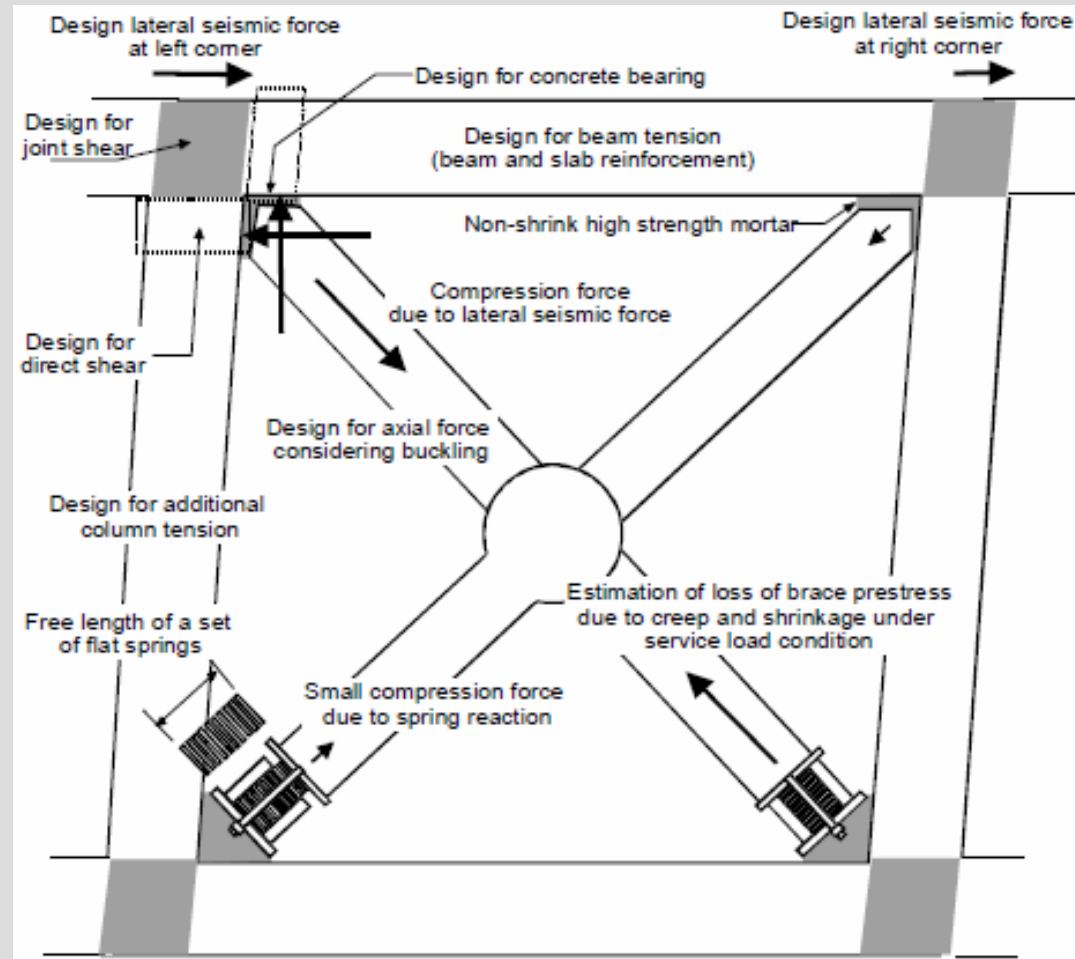
Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Dämpfende Druck-Streben aus CFT oder FRC, mit Tellerfedern vorgespannt (S15-028)



- dämpfende Verstärkung mit wenig Duktilitätsverlust
- bei horizontaler Drift kein zusätzlicher Druck in den Stützen

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

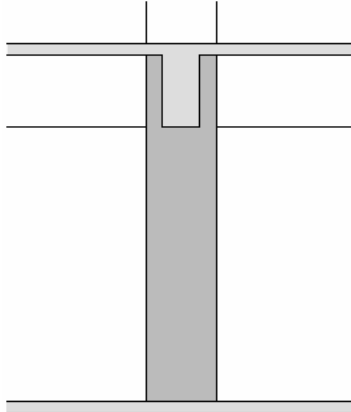
Verstärken

sel. Schwächen

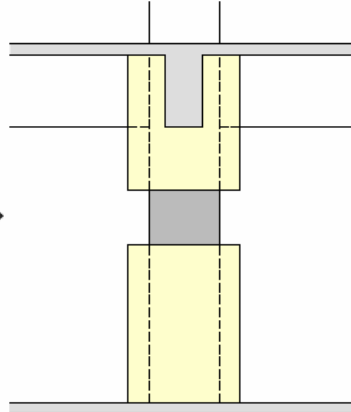
zus. Dämpfen

Beispiel einer Nachrüstung von Stahlb.-Säulen mit seismischer Basisisolation (S05-01016)

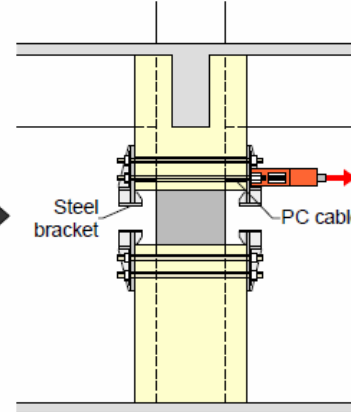
1 Existing frame before retrofit



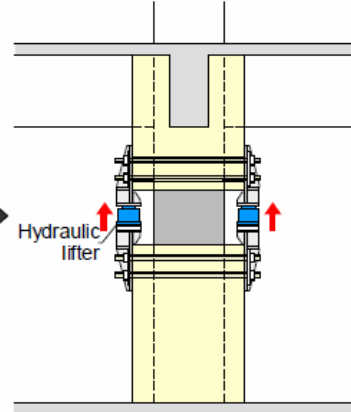
2 Structural member reinforcement



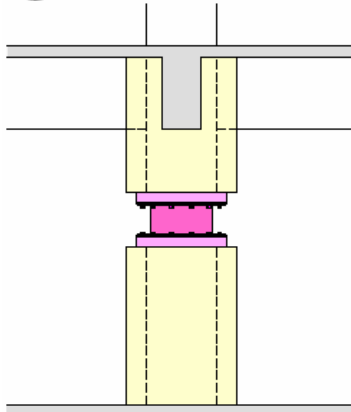
3 Steel brackets and cables installation and tensioning



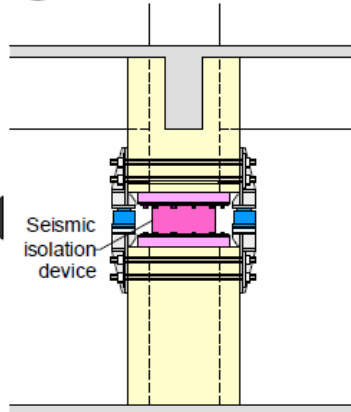
4 Hydraulic lifters installation and preloading



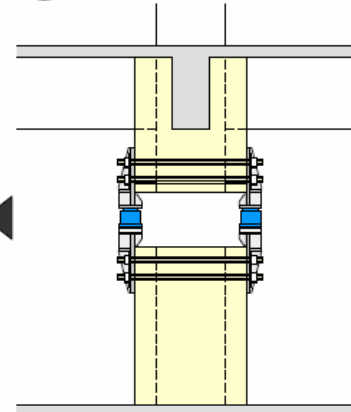
8 Temporary supporting removal, and completion



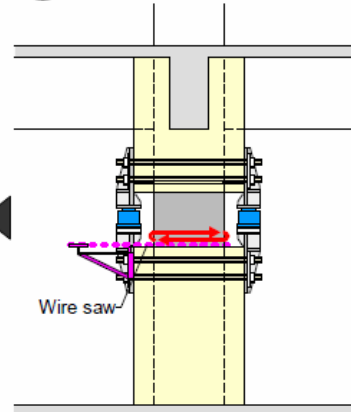
7 Seismic isolation device installation and fixation



6 Existing column removal



5 Wire saw installation / Existing column cutting



Einbau eines dämpfenden Lagers aus Gummi oder Blei

Begriffsdefinition

Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen

Retrofitting-Beispiel eines Gebäudes durch einen äußeren CES Rahmen (05-06-0075)

Begriffsdefinition

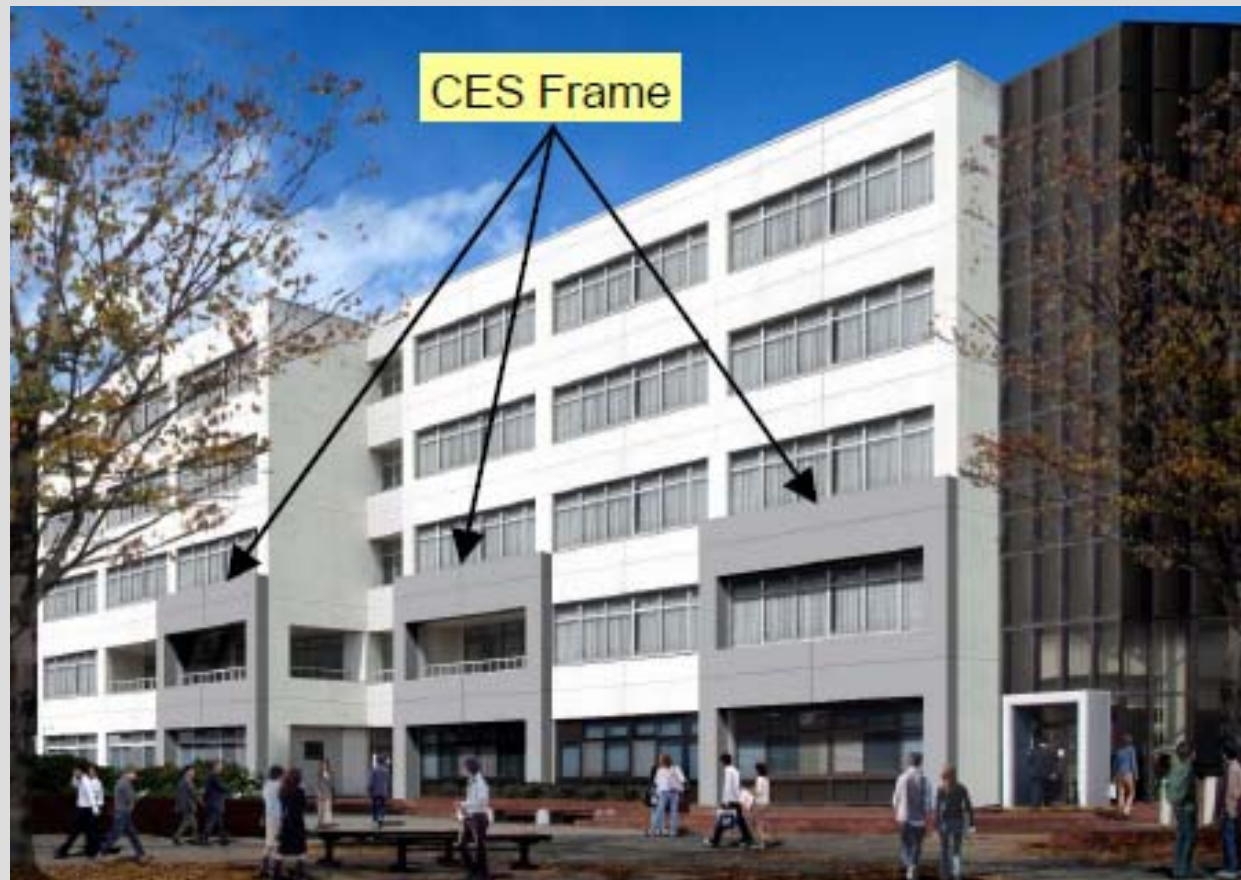
Strategien

Techniken

Verstärken

sel. Schwächen

zus. Dämpfen



CES (Concrete Encased Steel): Stahlbeton mit FRC

FRC (Fiber Reinforced Concrete): Faserverstärkter Beton