

BEISPIEL FÜR DIE MODELLIERUNG VON FINITEN ELEMENTEN –

**SEISMISCHE LINEARE STATIKBERECHNUNG
EINER HOLZKONSTRUKTION MIT X-RAD-SYSTEM**

Inhalt

1. EINLEITUNG.....	3
2. GEBÄUDEBESCHREIBUNG.....	3
3. FESTLEGUNG DER LASTEN.....	5
4. AUFBAU DES FINITE-ELEMENTE-MODELLS	7
5. BERECHNUNG DER BEANSPRUCHUNGEN AUF JEDEN KNOTENPUNKT.....	14
6. NACHWEIS DES VERBINDERS X-ONE	16

1. EINLEITUNG

Es folgt ein Beispiel für die Modellierung von Finiten Elementen einer Konstruktion mit dem Verbindungssystem X-RAD. Es wird Schritt für Schritt detailliert erklärt, wie eine seismische lineare Statikberechnung durchzuführen ist.

2. GEBÄUDEBESCHREIBUNG

Das berechnete Gebäude weist folgende Merkmale auf:

- 9 m hohes Gebäude mit drei Stockwerken;
- Grundriss 14 x 10 m;
- Flachdach;
- An jeder Ecke der BSP-Platten sind X-RAD Verbindungselemente angebracht;
- Die Geometrie der Wände ist in Abbildung 1 dargestellt.

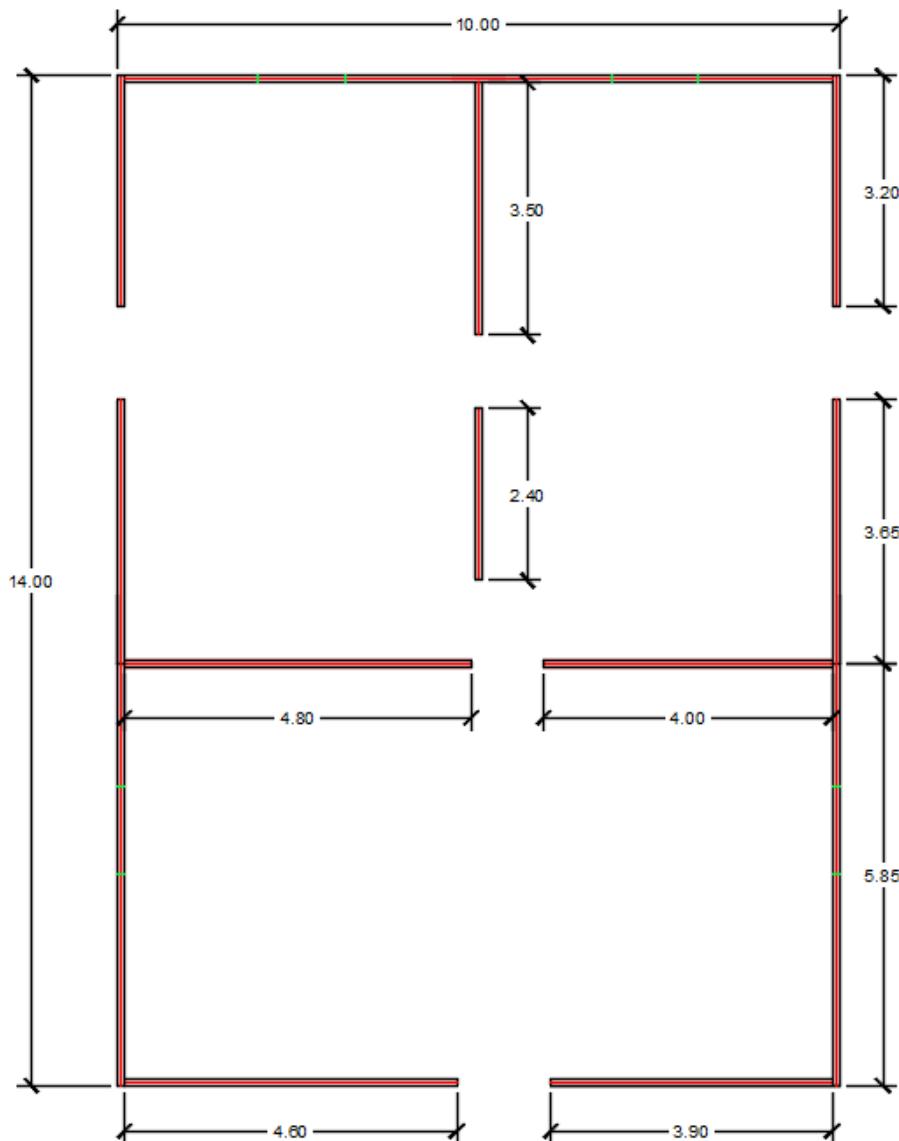


Abbildung 1: Grundriss des Gebäudes

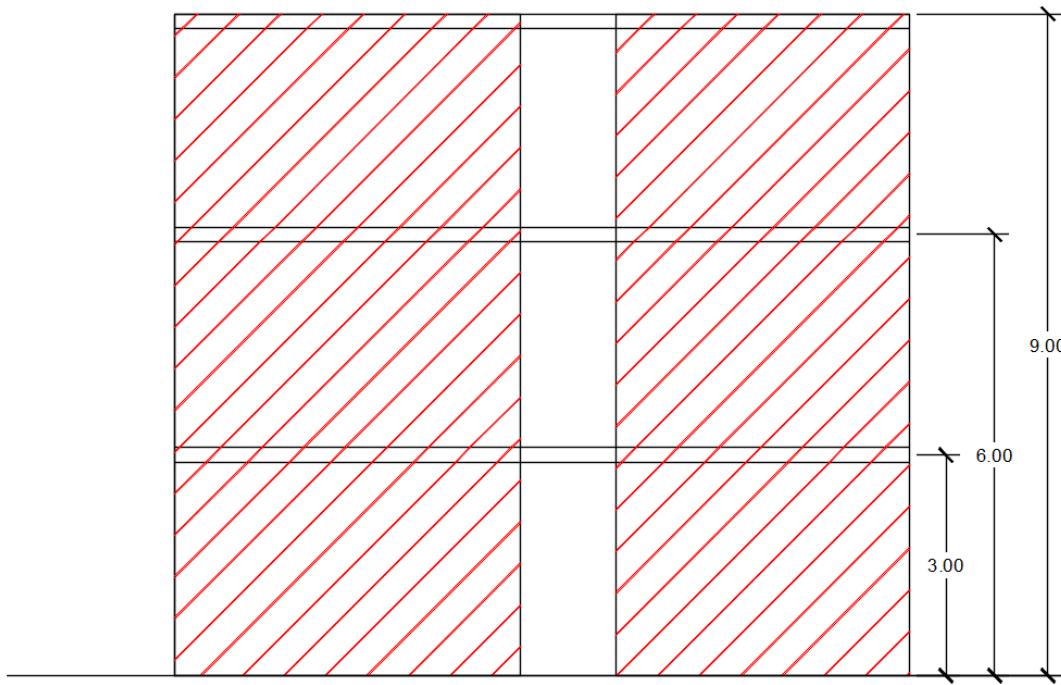


Abbildung 2: Aufriss der Schmalseite des Gebäudes

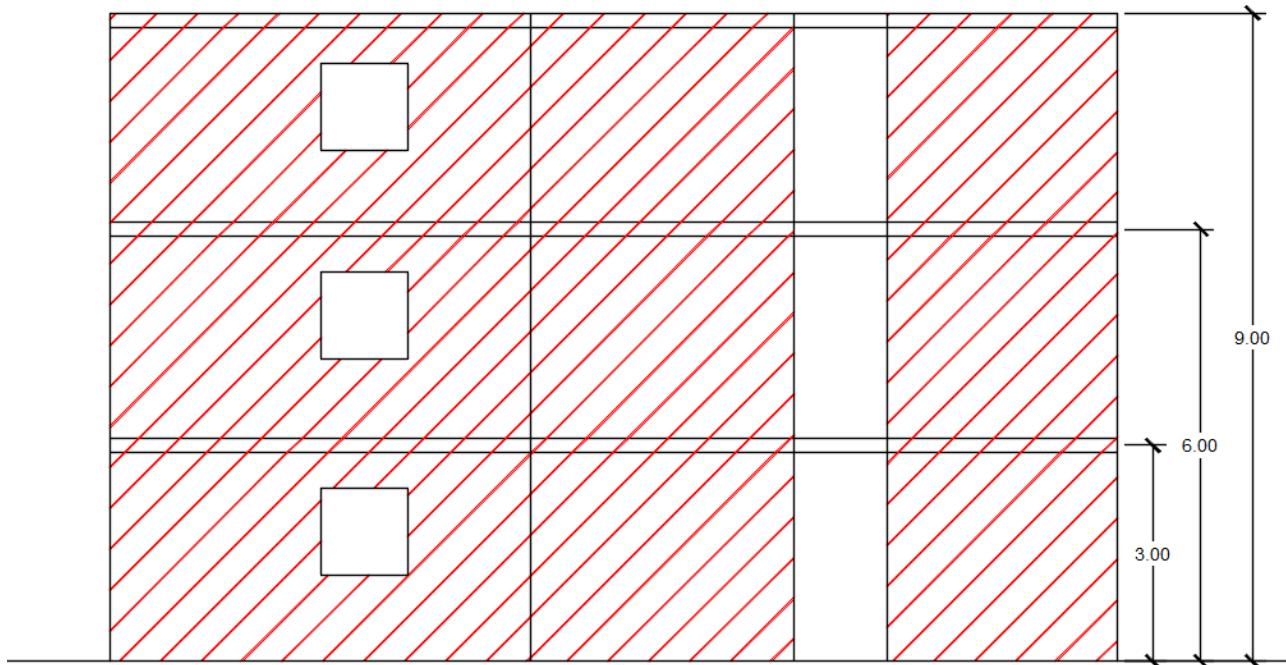


Abbildung 3: Aufriss der Längsseite des Gebäudes

3. FESTLEGUNG DER LASTEN

Es wird von folgenden Lasten ausgegangen:

STATISCHE EINWIRKUNG:

- Eigengewicht + ständige Belastung Decken: 3,5 kN/m²;
- Eigengewicht + ständige Belastung Wände: 1,0 kN/m²;
- Verkehrslast Decken KAT. A: 2,0 kN/m²;

ERDBEBENEINWIRKUNG (Gemeinde Verona):

- $a_g=0,157$ g;
- Baugrundklasse C;
- Topografische Kategorie T₂ bei $h/H=0,7$;
- Konstruktion ungleichmäßiger Höhe mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 1,6$;

Das seismische Spektrum ist in Abbildung 4 angegeben:

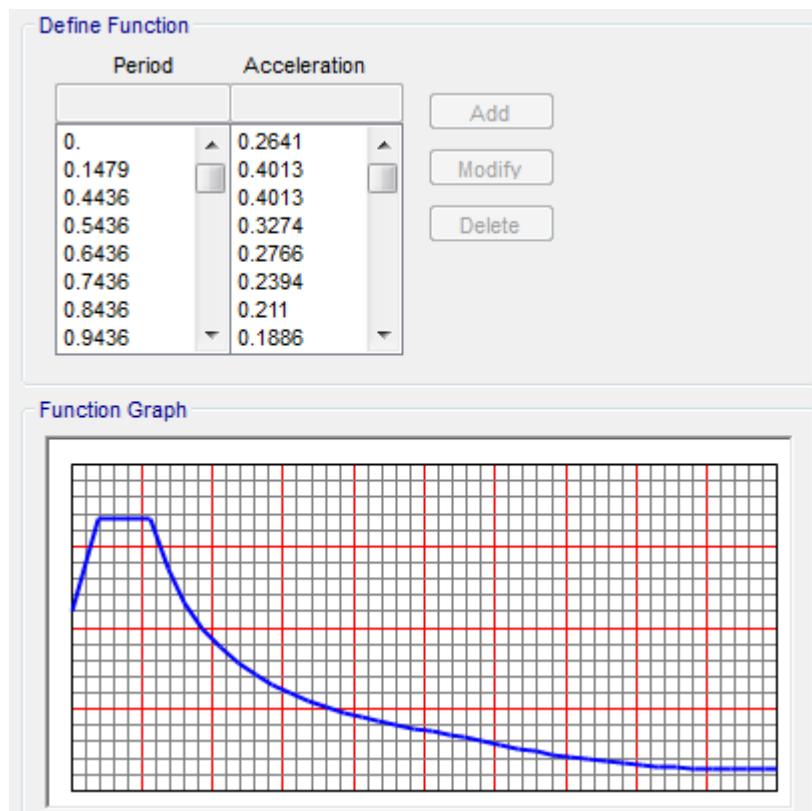


Abbildung 4: Seismische Spektrum des Projekts

Zur Berechnung der Zeit T₁ werden die Vorgaben in der Norm (NTC08) befolgt:

$$T_1 = 0,05 \cdot H^{3/4} = 0,26 \text{ s}$$

Es liegt daher in der Plateauzone des seismischen Spektrums in Abbildung 4, demzufolge ist

$$S_d(T_1) = 0,4013 \text{ g}$$

Als Beispiel werden 9 unterschiedliche Lastkombinationen angeführt, wie in der nachfolgenden Tabelle angegeben:

Tabelle 1: Lastkombinationen:

ANZAHL DER KOMBINATIONEN	ART DER KOMBINATION
1	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)
2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +100%X + 30%Y
3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +100%X - 30%Y
4	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) -100%X + 30%Y
5	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - 100%X - 30%Y
6	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +30%X + 100%Y
7	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +30%X - 100%Y
8	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - 30%X + 100%Y
9	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - 30%X - 100%Y

Die Windeinwirkung und die Verlagerung des seismischen Massenmittelpunkts von 5 % werden demnach nicht berücksichtigt.

4. AUFBAU DES FINITE-ELEMENTE-MODELLS

Das Grundelement des Modells sieht ein X-RAD-Verbindungselement an jeder Ecke der BSP-Platten vor.

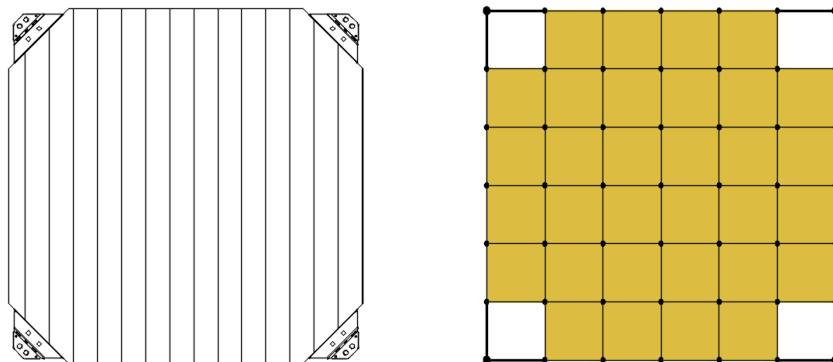


Abbildung 5: Grundelement des Modells

Der Verbinder wird mit zwei Pleuel aus Stahl mit quadratischem Querschnitt und 5,51 mm langer und 255 mm breiter Seite modelliert (Rahmenelemente „Frame“ an den Ecken der Platte in den Abbildungen 5 und 6). Somit erhält man eine Endsteifigkeit der X-RAD-Verbindung von $k=25 \text{ kN/mm}$. Die BSP-Platte wird mit Elementen vom Typ „Shell“ modelliert (isotropes Material mit einer Steifigkeit von $E=5500 \text{ MPa}$). Diese vereinfachte schematische Darstellung des BSP-Materials beruht auf der Beobachtung, dass die Steifigkeit des Systems BSP-XRAD durch die Verformbarkeit des Verbinders bestimmt wird.

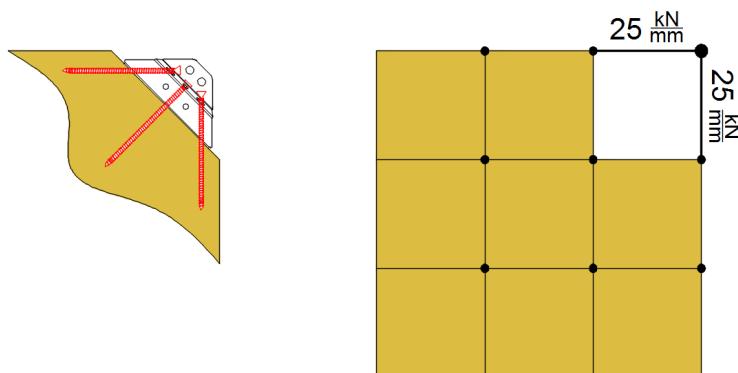


Abbildung 6: Detailansicht X-RAD mit Rahmenelementen „Frame“ modelliert.

Man hat sich dazu entschieden, jeden X-RAD-Verbinder mit zwei Pleuel darzustellen, sodass dem vertikalen Rahmenelement eine Zug-/Druckkraft zugeordnet werden kann, während dem horizontalen Rahmenelement eine Scherkraft zugeordnet wird (siehe Abbildung 7).

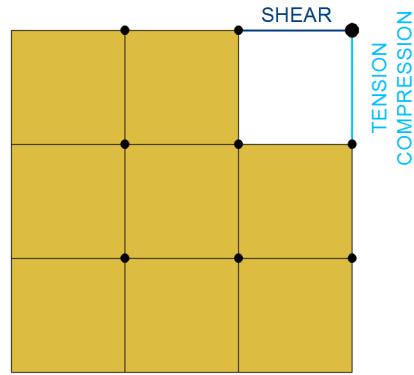


Abbildung 7: Kombinierte Wirkungen auf die beiden Rahmenelemente „Frame“

Um den Kontakt zwischen Platte und Platte sowie zwischen Platte und Fundament zu simulieren, wurden nicht-lineare Federn vom Typ „Gap“ festgelegt. Diese Federn weisen bei Druck eine unendliche Endsteifigkeit und bei Zug eine Nullsteifigkeit auf. Sie sind schematisch in grün mit dem Buchstaben C in Abbildung 8 zu sehen.

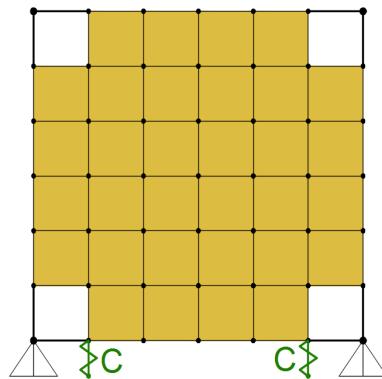


Abbildung 8: Federn vom Typ „Gap“ mit unendlicher Endsteifigkeit bei Druck

An jedem Ende der Platte wird vertikal und horizontal eine Feder angebracht (die den Kontakt zwischen den BSP-Platten simulieren und in Abbildung 9 hellgrün dargestellt sind). Die an der Basis der Wände angebrachten Federn simulieren den Kontakt zwischen Platte und Fundament (dunkelgrün).

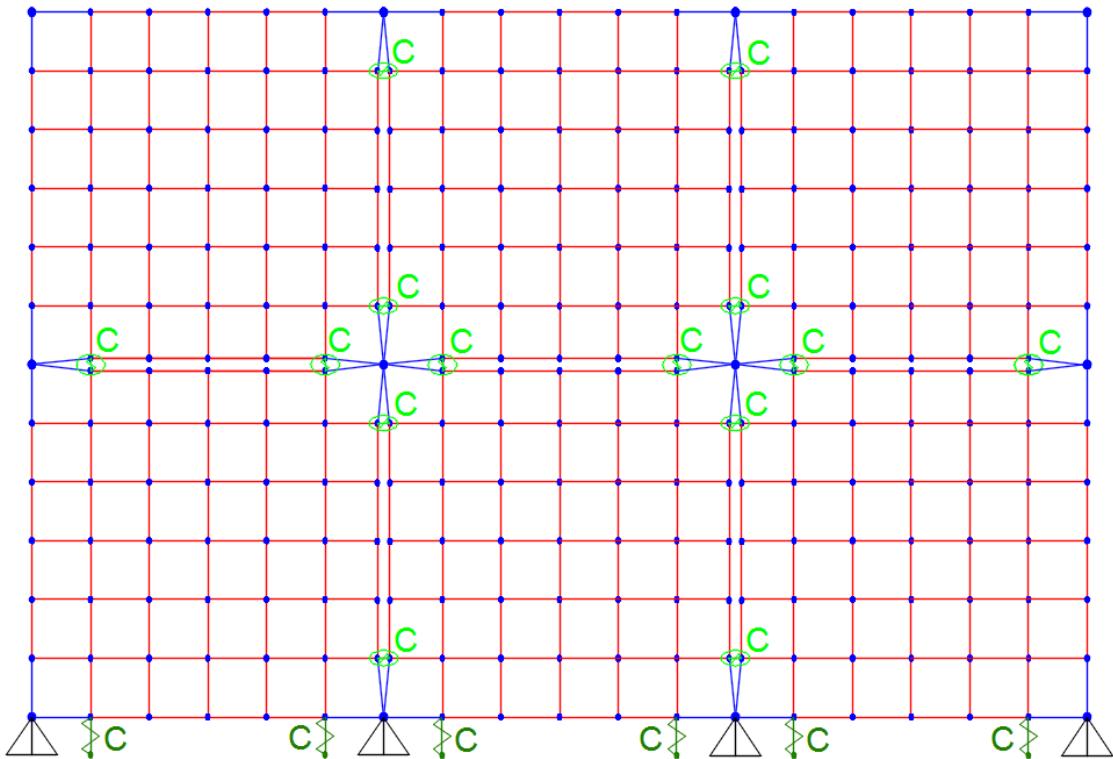


Abbildung 9: Beispiel für die Anordnung der Federn

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, müssen die Pleuel, die den Verbinder simulieren, leicht geneigt sein, um die BSP-Platten mit einem Abstand zueinander auszurichten. Es wurde nachgewiesen, dass diese Neigung hinsichtlich der auf jeden X-RAD-Verbinder wirkenden Kräfte Fehler unter 4 % mit sich bringt, die somit vom technischen Gesichtspunkt aus annehmbar sind.

Es folgt die Abbildung der vier unterschiedlichen Konfigurationen der an einem Gebäude verwendbaren X-RAD-Verbinder mit den entsprechenden Modellen der finiten Elemente:

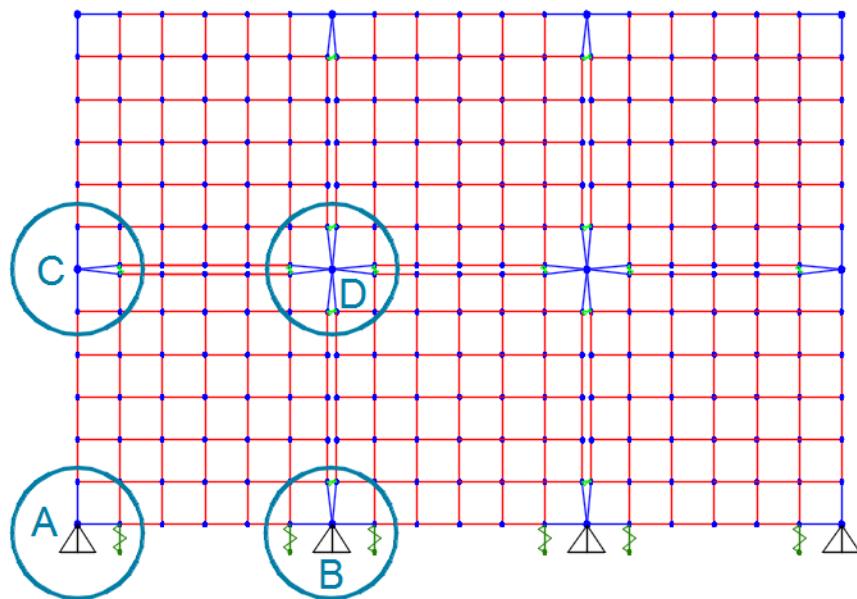


Abbildung 10: Vier mögliche X-RAD-Konfigurationen

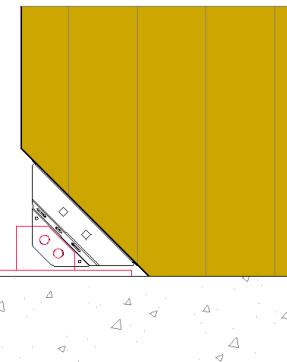


Abbildung 11: Konfiguration mit einwegiger Orientierung (A in Abbildung 10)

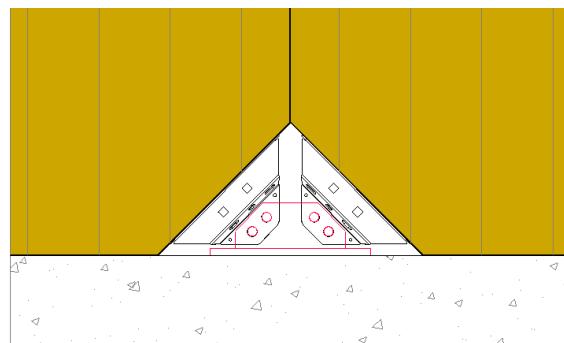


Abbildung 12: Konfiguration mit zweiwegiger horizontaler Orientierung (B in Abbildung 10)

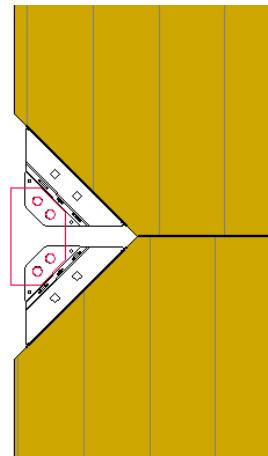


Abbildung 13: Konfiguration mit zweiwegiger vertikaler Orientierung (C in Abbildung 10)

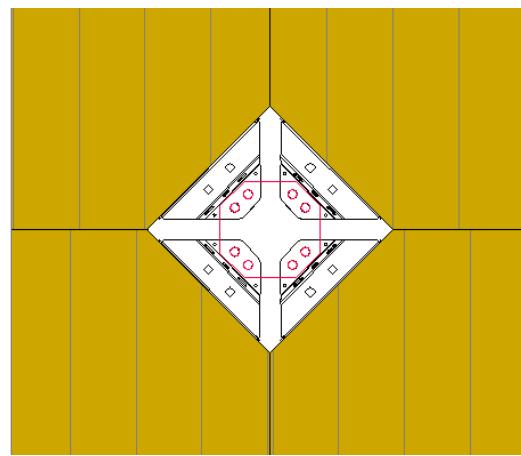


Abbildung 14: Konfiguration mit vierwegiger Orientierung (C in Abbildung 10)

Bei jeder Orientierung wurden steife Wände eingefügt, damit alle von der Decke aus verbundenen Stellen die gleiche horizontale Verschiebung aufweisen. Diese Bindung modelliert die Verstrebung der Fläche, die aus entsprechend miteinander verbundenen BSP-Platten der Decke besteht. Um Fehler bei der Implementierung zu vermeiden, ist es wichtig, von der horizontalen Wand die X-RAD-Knotenpunkte auszuschließen (in Abbildung 15 sind die schwarzen Knotenpunkte Teil der Wand, während die zum X-RAD gehörenden roten Knotenpunkte ausgeschlossen worden sind).

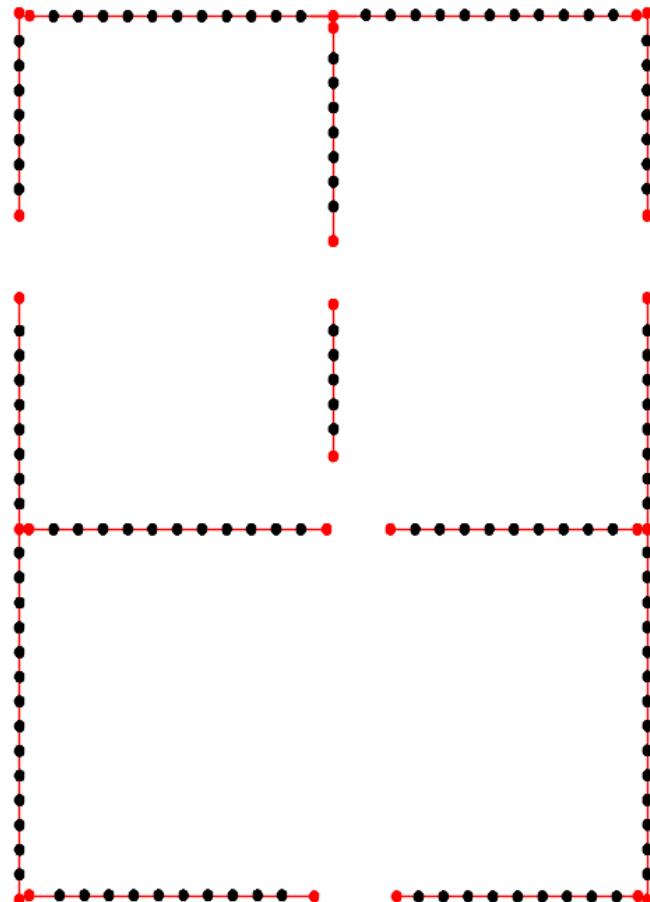


Abbildung 15: Festlegung der horizontalen Wände

Die winkelrecht angeordneten Platten sind getrennt voneinander. Die Platten, die die winkelrechten Wände tatsächlich verbinden, werden als bauliche Verbindung außerhalb der Berechnung eingefügt.

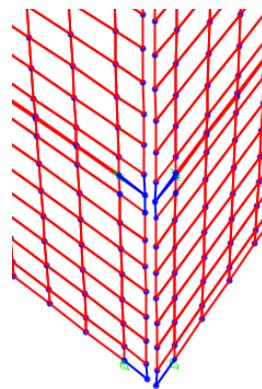


Abbildung 16: Trennung zwischen den winkelrechten Platten

In Bezug auf die Eingabe der Lasten in das Modell können zwei unterschiedliche Methoden angewendet werden:

- Die Lasten können direkt an den Punkten der „Shell“-Elemente der Wände eingegeben werden, auf denen die Decken aufliegen.
- Es können spezielle Elemente festgelegt werden, die typischerweise „lasttragende Balken“ genannt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass diese lasttragenden Balken nur als Pleuel fungieren.

Hinsichtlich der Modellierung etwaiger, am Gebäude vorhandener Balken oder Stürze können Pleuel festgelegt werden (z. B. die blauen Stürze in Abbildung 17).

So erreicht man die endgültige Definition des Modells:

- 3D-Ansicht

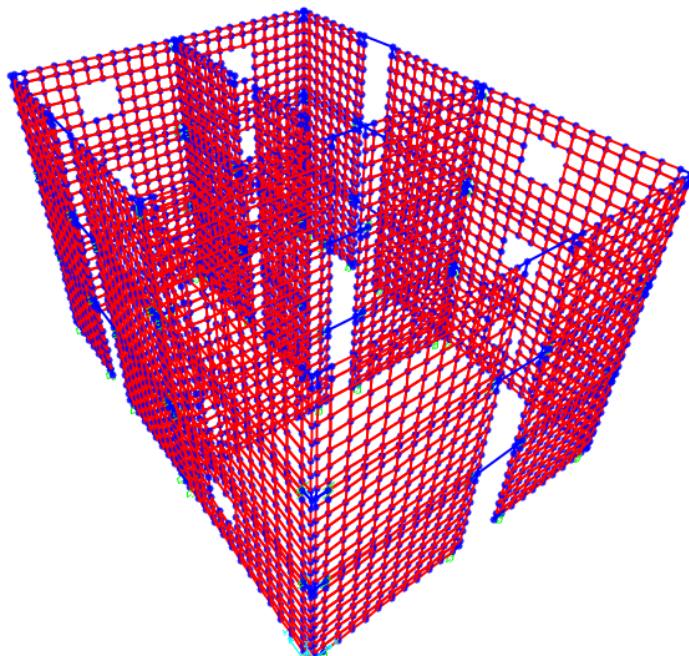


Abbildung 17: 3D-Ansicht des endgültigen Modells

- BEISPIEL FÜR EIN „WANDSYSTEM“

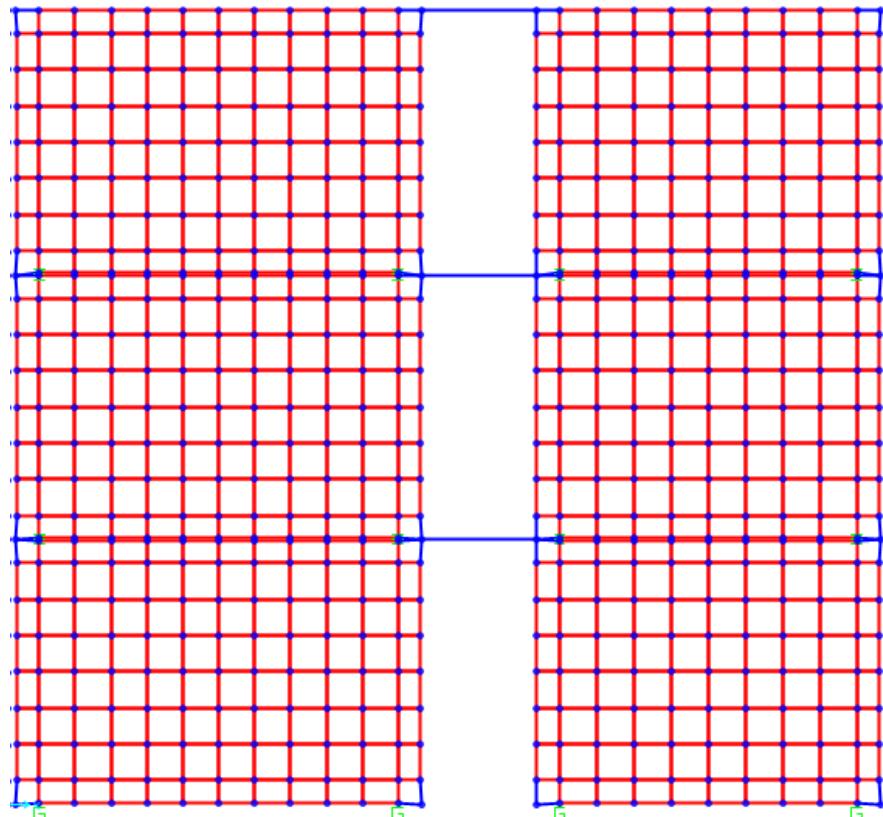


Abbildung 18: Modell der Außenwände an der Schmalseite

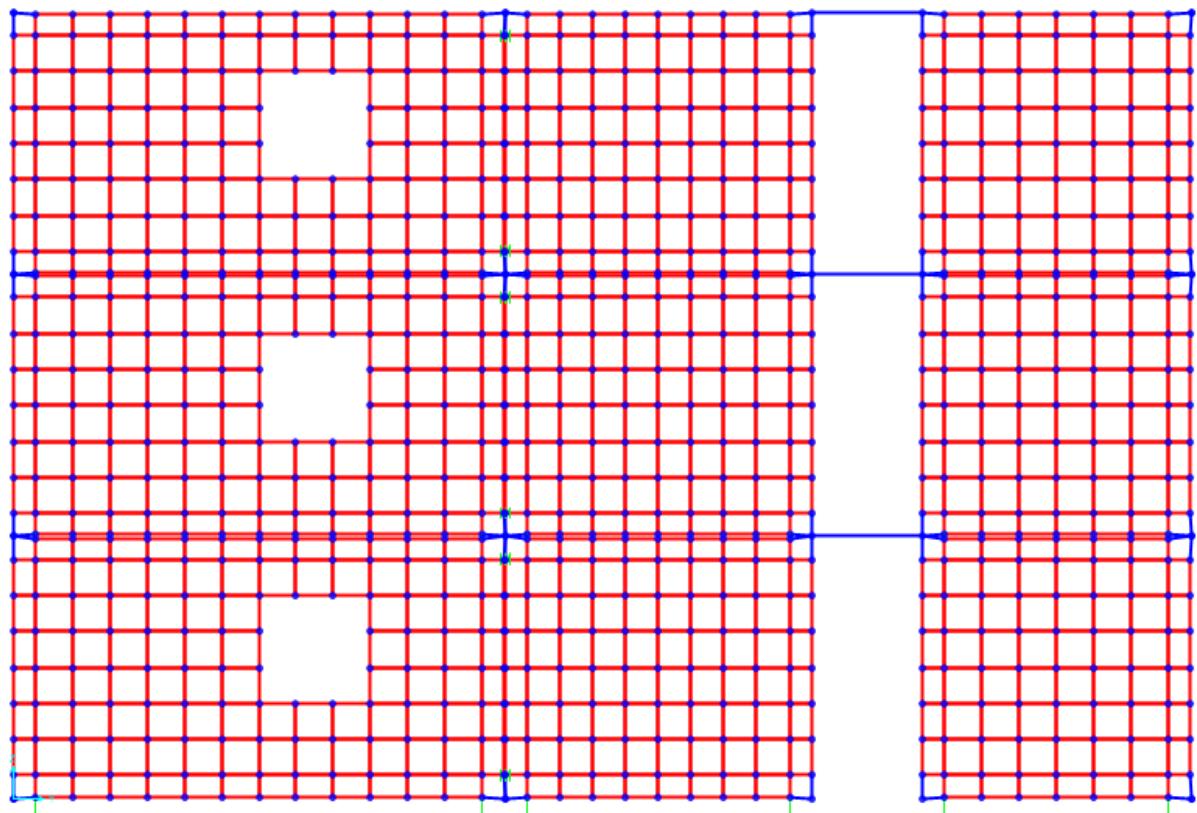


Abbildung 19: Modell der Außenwände an der Längsseite

5. BERECHNUNG DER BEANSPRUCHUNGEN AUF JEDEN KNOTENPUNKT

Zur Berechnung der Beanspruchungen an jedem Verbinder in der Prüfungsphase, wird das nachstehende Flussdiagramm befolgt.

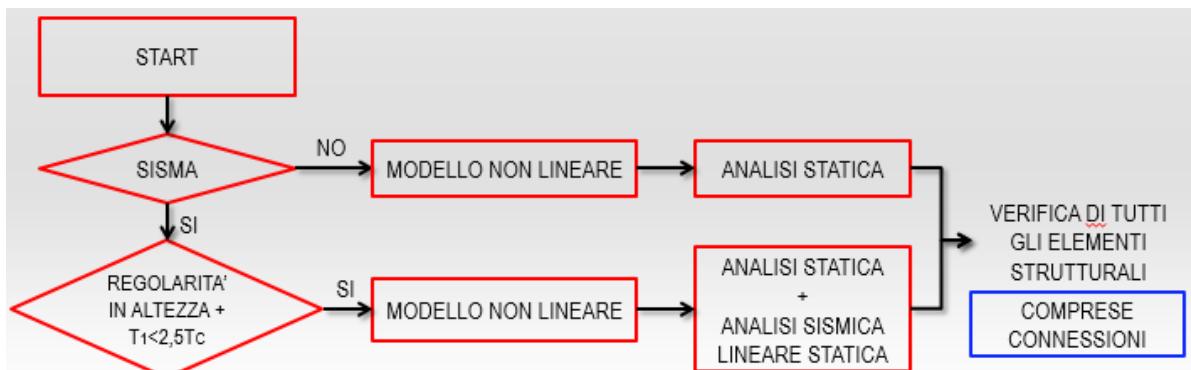


Abbildung 20: Flussdiagramm

START	START
SISMA	ERDBEBEN
SI / NO	JA / NEIN
REGOLARITA IN ALTEZZA + T1<2,5Tc	HÖHENGLEICHMÄSSIGKEIT + T1<2,5Tc
MODELLO NON LINEARE	NICHT-LINEARES MODELL
ANALISI STATICHE	STATISCHE ANALYSE
ANALISI STATICHE + ANALISI SISMICA LINEARE STATICHE	STATISCHE ANALYSE + SEISMISCHE LINEARE STATISCHE ANALYSE
VERIFICA DI TUTTI GLI ELEMENTI STRUTTURALI COMPRESE CONNESSIONI	NACHWEIS ALLER TRAGENDEN ELEMENTE, EINSCHLIESSLICH VERBINDUNGEN

Die Analyse sieht ein analytisches Modellverfahren an den NICHT-LINEAREN Finiten Elementen vor, da die zuvor beschriebenen Federn vorhanden sind, die nur bei Druck wirken.

Nachdem die externen Wirkungen und die unterschiedlichen Lastkombinationen festgelegt wurden, kann man dem Output des Programms FEM die axialen Wirkungen auf jedes Pleuel entnehmen. Wie bereits erwähnt, werden den vertikalen Pleuel die Zug-/Druckkräfte zugeordnet, während den horizontalen Pleuel die Scherkräfte zugeordnet werden (Abbildung 7).

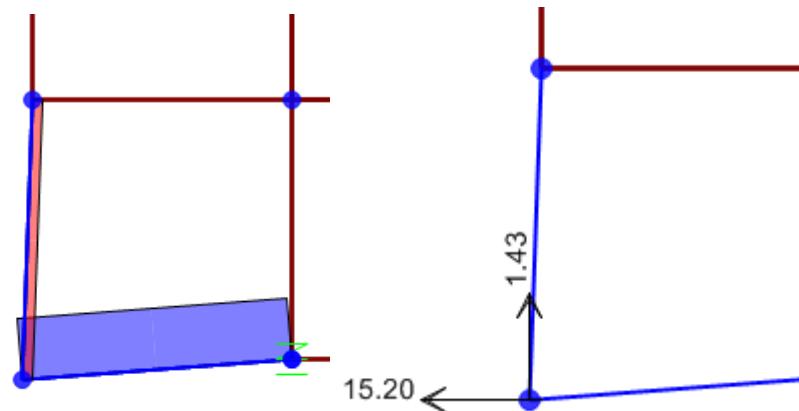


Abbildung 21: Beispiel für die Beanspruchung an einem X-RAD im Fundament

Der X-RAD-Verbinder in Abbildung 21 unterliegt einer Druckkraft (rot) von 1,43 kN und einer Scherkraft (blau) von 15,20 kN.

Um den Verbinder zu prüfen, müssen die beiden Kräfte kombiniert werden, und es ist zu prüfen, dass die resultierende Kraft innerhalb des Bruchbereichs liegt. Dieser Schritt wird durch die Verwendung der Software „MyProject“ erleichtert, die den Planern zur Verfügung gestellt wird und auf der Internetseite www.rothoblaas.com heruntergeladen werden kann. Es genügt, für jeden X-RAD-Verbinder die Tabellen mit den beiden Beanspruchungen (Scherkraft sowie Zug-/Druckkraft) in das Softwareprogramm zu kopieren. Die Software führt dann selbstständig den Nachweis der Verbinder X-ONE durch.

In Abbildung 22 ist zu sehen, dass die Verbinder, die höheren Beanspruchungen ausgesetzt sind, diejenigen im Fundament sind. Im betreffenden Fall sind auch die X-RAD-Verbinder der oberen Stockwerke geprüft, wenn die Analysen im Erdgeschoss zufriedenstellend sind.

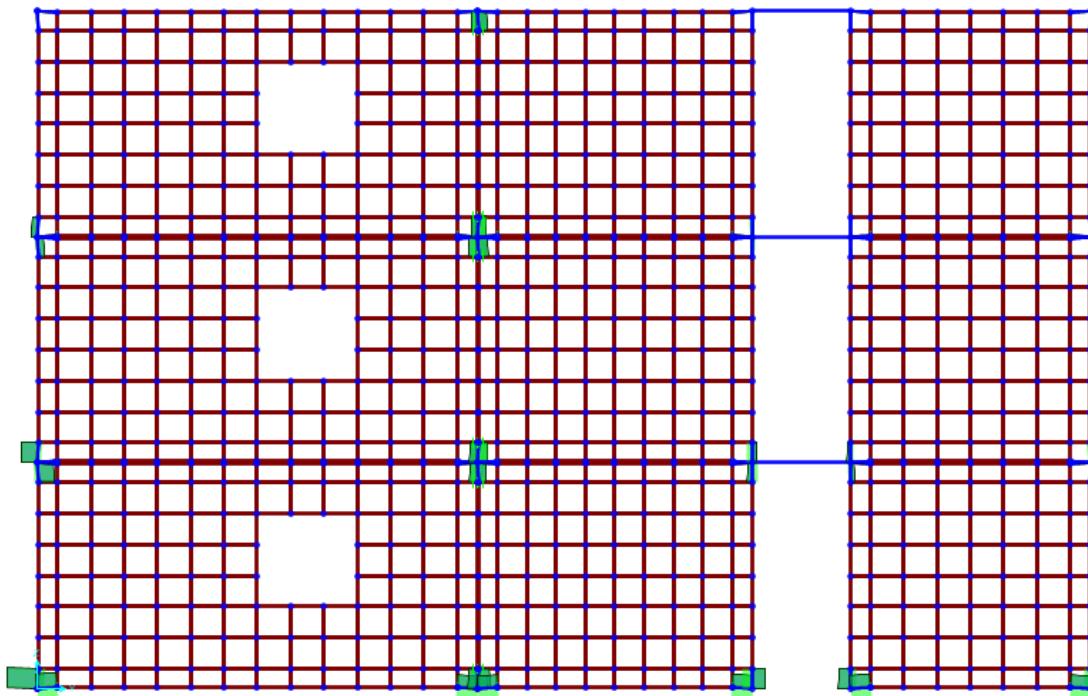


Abbildung 22: Beanspruchungen am Wandsystem

6. NACHWEIS DES VERBINDERS X-ONE

Nachdem die Kräfte auf jedem X-RAD-Verbinder aus dem Finite-Elemente-Modell exportiert wurden, ist die Analyse der Verbinder einfach. Das Programm MyProject führt diese Analyse automatisch durch, nachdem die Scherbeanspruchungen (Vd) und die axiale Kraft (Nd) in die entsprechende Tabelle eingegeben wurden. Die Zugkräfte werden mit einem positiven Zeichen und die Druckkräfte mit einem negativen Zeichen eingegeben. Es kann eine unendliche Anzahl von Kraftkombinationen eingegeben werden, wobei jede Kraftkombination einer bestimmten Lastkombination zugeordnet wird, die in der Richtlinie vorgesehen ist.

Beispielsweise ist in Abbildung 23 die Analyse eines in grüner Farbe hervorgehobenen X-RAD-Verbinders des Fundaments dargestellt.

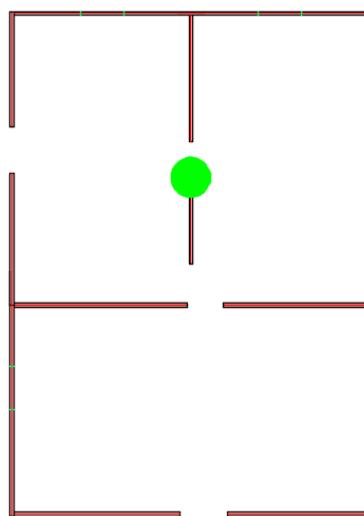


Abbildung 23: Prüfgegenständlicher X-RAD-Verbinder

Die auf diesen Verbinder wirkenden Kräfte sind für jede Lastenkombination in der Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Beanspruchungen bei unterschiedlichen Kombinationen:

ART DER KOMBINATION	Vd [kN]	Nd [kN]
Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	0,8	-22,2
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +100%X + 30%Y	-12,3	-17,3
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +100%X - 30%Y	11,6	-8,3
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) -100%X + 30%Y	-12,3	-17,3

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - 100%X - 30%Y	11,6	-8,4
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +30%X + 100%Y	-38,4	-33,9
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) +30%X - 100%Y	38,7	14,9
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - 30%X + 100%Y	-38,4	-33,9
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - 30%X - 100%Y	38,7	14,9

Diese Paare der Beanspruchungen werden in die Eingabetabelle der Software „MyProject“ eingegeben, wie in Abbildung 24 dargestellt.

canc	Nr. coppia	Componente Vd [kN]	Componente Nd [kN]	Risultante Fd [kN]	Angolo α [°]
X	1	0.80	-22.20	22.21	272.06°
X	2	-12.30	-17.30	21.23	234.59°
X	3	11.60	-8.30	14.26	324.42°
X	4	-12.30	-17.30	21.23	234.59°
X	5	11.60	-8.40	14.32	324.09°
X	6	-38.40	-33.90	51.22	221.44°
X	7	38.70	14.90	41.47	21.06°
X	8	38.40	-33.90	51.22	318.56°
X	9	38.70	14.90	41.47	21.06°

Abbildung 24: Eingabetabelle „MyProject“ mit 9 Kombinationen

Das Programm kombiniert automatisch die eingegebenen Kräfte und führt für jede eine Analyse in grafischer und numerischer Form durch.

Im betreffenden Fall wurde der Verbinder mit allen Kombinationen geprüft.

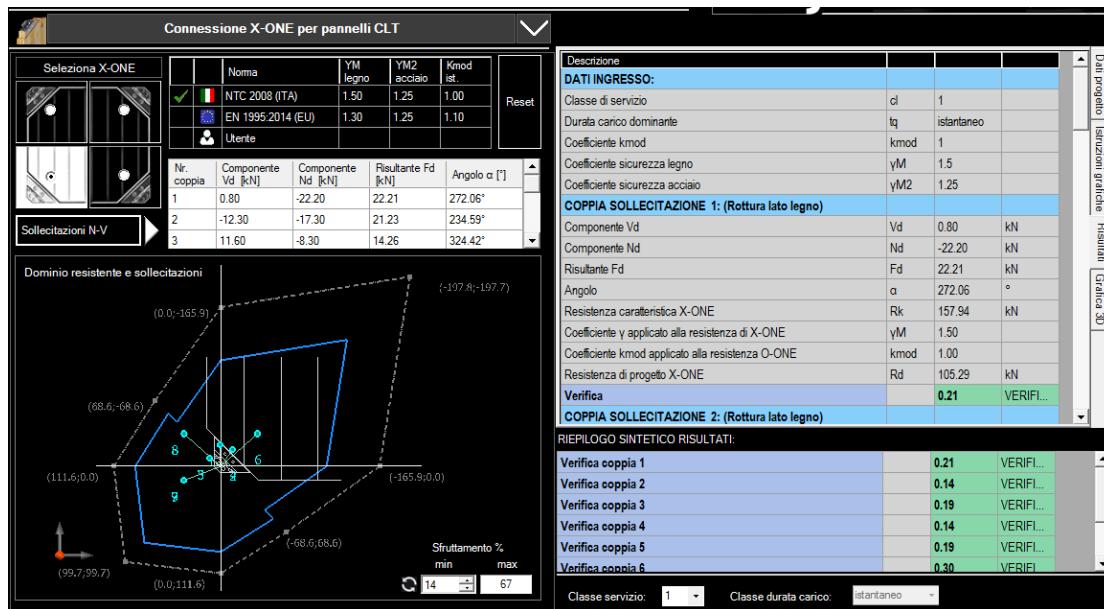


Abbildung 25: Nachweis des Verbinders durch „MyProject“

Es ist zu sehen, dass alle Punkte, die der resultierenden Wirkung auf den Verbinder entsprechen, grün dargestellt sind und innerhalb des Bruchbereichs liegen, der durch die blaue Linie in Abbildung 25 begrenzt wird.