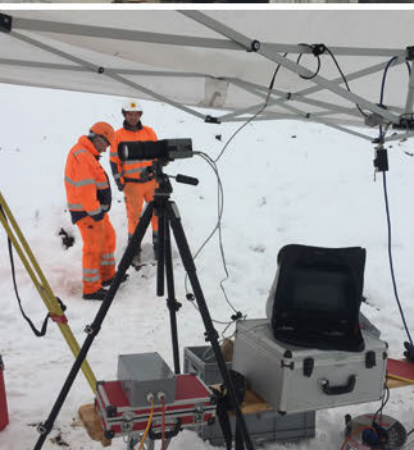


Heft 95, 2020

**WSL Berichte**

ISSN 2296-3456



## **Steinschlagversuche Galerie Pardé**

Versuchsdurchführung, Auswertung und Resultate

Axel Volkwein  
Daniel Fergg  
Yusuke Kurihashi  
Kristian Schellenberg



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL  
CH-8903 Birmensdorf



Heft 95, 2020

**WSL Berichte**

ISSN 2296-3456

# **Steinschlagversuche Galerie Pardé**

Versuchsdurchführung, Auswertung und Resultate

Axel Volkwein  
Daniel Fergg  
Yusuke Kurihashi  
Kristian Schellenberg

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe  
Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft  
Dr. Manfred Stähli, Leiter Forschungseinheit Gebirgshydrologie und  
Massenbewegungen

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, Teamleiterin Publikationen, WSL

Lektorat: Werner Gerber  
Layout: Axel Volkwein und Daniel Fergg

Zitiervorschlag:  
Volkwein, A.; Fergg, D.; Kurihashi, Y.; Schellenberg, K., 2020: Steinschlagversuche  
Galerie Pardé. Versuchsdurchführung, Auswertung und Resultate. WSL Ber. 95. 96 S.

ISSN 2296-3448 (Print)  
ISSN 2296-3456 (Online)

Fotos Umschlag:  
1. Position des Versuchskrans am bergseitigen Galerieportal  
2. Setup der Messtechnik auf dem Galeriedach  
3. Galerie Pardé, Blickrichtung Tschamutt  
4. Versuchsfläche auf dem Galeriedach  
5. Einschlagkrater nach Aufprall

Forschung für Mensch und Umwelt: Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und  
Landschaft WSL überwacht und erforscht Wald, Landschaft, Biodiversität, Naturgefahren  
sowie Schnee und Eis. Sie ist ein Forschungsinstitut des Bundes und gehört zum ETH-Bereich. Das WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF ist seit 1989 Teil der WSL.

© Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL  
Birmensdorf, 2020



## Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung .....	5
1.1 Situation Allgemein .....	5
1.2 Versuchsgrundlagen .....	5
1.3 Übersicht Versuchsbericht .....	6
2 Galerie Pardé 1 .....	7
2.1 Standort .....	7
2.2 Konstruktion .....	7
2.3 Beton .....	10
2.4 Bewehrung .....	10
2.5 Eindeckung .....	11
3 Vorbereitung der Versuche .....	13
3.1 Sicherheitskonzept .....	13
3.2 Galeriedach .....	13
3.3 Zusätzliche Stützen .....	14
3.4 Eindeckung .....	15
3.5 Vermessung & Georeferenzierung .....	16
3.6 Messtechnik .....	16
3.6.1 Beschleunigungsmessung .....	16
3.6.2 Videosysteme .....	17
3.6.3 Datenerfassung .....	19
3.7 Wurfkörper .....	19
3.8 Pneukran .....	20
3.8.1 Sicherung .....	22
3.8.2 Auslösung .....	22
3.9 Stromversorgung .....	23
3.10 Witterung .....	24
4 Versuche .....	25
4.1 Übersicht .....	25
4.2 Abwurfposition .....	26
4.3 Ausrichtung der Wurfkörper .....	26
5 Dynamische Messergebnisse .....	28
5.1 Beschleunigungsmessung .....	28
5.1.1 Wurfkörper .....	28
5.1.2 Galeriedach .....	31
5.2 Videoaufzeichnungen .....	32

6	Datenverarbeitung.....	36
6.1	Beschleunigungsverlauf.....	36
6.2	Integration der Beschleunigungsdaten der Wurfkörper.....	39
6.3	Integration der Beschleunigungsdaten am Galeriedach .....	45
6.4	Videoaufzeichnungen.....	48
6.5	Ableitung der Videobewegungskurven .....	48
6.6	Vergleich der Messungen .....	50
7	Abgeleitete Ergebnisse .....	53
7.1	Maximale Beschleunigungsspitzen .....	53
7.2	Fallzeiten .....	53
7.3	Fallhöhen.....	53
7.4	Einschlaggeschwindigkeit .....	54
7.5	Abbremszeiten.....	54
7.6	Bremsweg und Endlage.....	55
7.7	Rücksprung.....	55
7.8	Rotation .....	56
7.9	Eindeckung .....	56
7.10	Einschlagenergien und -impulse .....	57
7.11	Reaktion der Betonplatte.....	57
7.12	Bremswirkung der Galerieverbauung .....	60
8	Analytisches Modell.....	63
8.1	Prognose Analytisches Modell .....	63
8.2	Vergleich mit Versuchsdaten.....	63
9	Zusammenfassung und abschliessende Bemerkungen.....	66
	Anhang 1: Ergebnisse analytisches Modell.....	67
	Anhang 2: Zusammenstellung Versuchsergebnisse .....	73
	Anhang 3: Druckprüfung Betonproben .....	76
	Anhang 4: Photodokumentation.....	79
	Anhang 5: Numerische Simulation .....	93



# 1 Einleitung

Dieser Bericht beschreibt die Vorbereitung und Durchführung von Steinschlagversuchen auf das Dach einer Schutzgalerie und zeigt die während der Versuche gewonnen Daten und die dazugehörige Auswertung. Die gezeigten Daten wurden grösstenteils vom Eidgenössischen Forschungsinstitut WSL erhoben. Daten zur Beschaffenheit der Stahlbetongalerie und der Eindeckung stammen vom Tiefbauamt Graubünden (TBA GR). Die Photodokumentation im Anhang wurde von Yusuke Kurihashi erstellt. Alle Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengefasst. Die gewonnenen Daten sind öffentlich zugänglich auf <http://www.envidat.ch/dataset/rockfall-gallery-testing-parde-2016> <sup>1</sup> abgelegt.

## 1.1 Situation Allgemein

Im Rahmen des Abrisses zweier Schutzgalerien auf der Graubündner Seite des Oberalppasses sollte die Galerie Pardé 1 vorgängig hinsichtlich ihrer tatsächlichen Schutzwirkung in Bezug auf Steinschlag untersucht werden. Die gewonnenen Ergebnisse dienen als Vergleichswerte, um die Schutzwirkung anderer bestehenden Galerien zuverlässiger abschätzen zu können. Das TBA GR beauftragte die WSL mit der Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung. Sie sollte derart ablaufen, dass Wurfkörper aus Beton mittels eines Mobilkrans über dem Galeriedach abgeworfen werden. Die Einschläge auf die Galerie und deren Reaktion sollten dabei erfasst werden.

## 1.2 Versuchsgrundlagen

Eine erste Vorbesprechung für die Untersuchung fand am 15.9.2015 in den Räumlichkeiten des TBA GR statt. Die Galerien Oberalp Pardé 1 + 2 mit Baujahr 1940 werden 2016 rückgebaut. Das Bauprogramm sieht vor, die Galerie Pardé 1 ab Mitte April 2016, die Galerie Pardé 2 ab Ende Juli 2016 rückzubauen. Über eine Zufahrtsrampe lässt sich auf dem Galeriedach die Eindeckung abtragen. Die Zufahrtsrampen werden jeweils auf der Seite Sedrun der Galerien erstellt. Vorgesehen war ursprünglich eine Versuchsreihe auf einem Feld der Galerie 1 sowie eine Versuchsreihe auf einem Feld der Galerie 2. Die Versuche sollten zu Beginn der Abtragungsarbeiten der Eindeckung auf der jeweiligen Galerie durchgeführt werden. Die Deckenplatte der Galerie soll nach Möglichkeit bis zum Versagen belastet werden. Die Steinschlagversuche dürfen die Bauarbeiten nicht behindern und müssen um das Bauprogramm herum geplant werden. Aufgrund der

---

<sup>1</sup> Volkwein, A. (2018). Rockfall gallery testing Parde 2016. WSL. doi:10.16904/envidat.41.



Bauphasen kann ein Kran für die Durchführung der Versuche auf Galerie 1 nur auf der Seite Oberalppass gestellt werden. Das zu prüfende Feld müsste somit das äusserste Feld der Galerie 1 in Richtung Oberalppass sein; je nach zur Verfügung stehendem Kranausleger könnte allenfalls auch das zweitäusserste Feld in Frage kommen. Für die Durchführung der Versuche steht pro Galerie wahrscheinlich ein Halbttag zur Verfügung, wobei dies mit dem Bauunternehmer noch abgesprochen werden muss.

Der Fallkörper und der Ausklinkmechanismus werden durch die WSL organisiert (wahrscheinlich 3,2-Tonnen-Würfel, Kantenlänge ca. 1.1 m). Der Transport wird durch die WSL organisiert, die Transportaufwendungen gehen zulasten des TBA GR. Die Messeinrichtung wird durch das WSL organisiert und installiert, Aufwendungen für Verbrauchsmaterial und Personalkosten gehen zulasten des TBA GR. Die Auswertung der Versuche erfolgt durch die WSL.

Am 11.3.2016 fand eine Begehung vor Ort mit dem TBA GR, der WSL und dem Bauunternehmer statt. Es wird festgelegt, dass zuerst nur Versuche für die Galerie Pardé 1 geplant werden. Allfällig erforderliche Versuche auf der Galerie Pardé 2 werden erst im Anschluss an die auf Galerie Pardé 1 durchgeführten Versuche neu beurteilt.

Der Zeitpunkt für die Versuche wurde auf Anfang April 2016 festgelegt, zumal der Oberalppass zu diesem Zeitpunkt noch für den öffentlichen Verkehr gesperrt, für die geplanten Versuche jedoch schon ausreichend vom Schnee geräumt werden sein wird. Die Versuche werden so in den Bauablauf zum Abriss der Galerie eingepasst, dass dieser noch vor der Passöffnung komplett durchgeführt werden kann. Damit der Versuch am Freitag 08. April 2016 planmässig stattfinden kann, werden am Vortag diverse Vorbereitungsarbeiten vor Ort durchgeführt.

### 1.3 Übersicht Versuchsbericht

In Kapitel 2 wird die Versuchsgalerie beschrieben. Kapitel 3 befasst sich mit der Beschreibung der Versuchstechnik sowie der Vorbereitung der Feldversuche. Der Ablauf der Versuche selbst ist in Kapitel 4 beschrieben. Kapitel 5 zeigt die gewonnenen Messdaten während der Versuche, im Wesentlichen die Beschleunigungsdaten von Wurfkörpern und Galeriedach sowie die Videoaufzeichnungen. In Kapitel 6 werden die gewonnenen Daten weiter verarbeitet, d.h. die Integration über bzw. die Ableitung nach der Zeit der Beschleunigungs- und Videodaten. Im letzten Abschnitt des Kapitels 6 werden die beiden unabhängigen Messdaten miteinander verglichen. Auf diese Art kann später die Güte der Messungen evaluiert werden. In Kapitel 7 werden einzelne Resultate aus den vorangegangenen Messungen aufgelistet. Kapitel 8 vergleicht abschliessend die im Versuch gewonnenen Ergebnisse mit den Prognosen eines Berechnungsmodells.



## 2 Galerie Pardé 1

### 2.1 Standort

Die Galerie (Abbildung 1) am Oberalppass befindet sich in der Gemeinde Tujetsch, rund einen Kilometer passaufwärts des Dorfes Tschamut im Kanton Graubünden und liegt auf rund 1710 m ü. M. Die Koordinaten nach CH1903 / LV03 lauten: 696'310 / 167'580

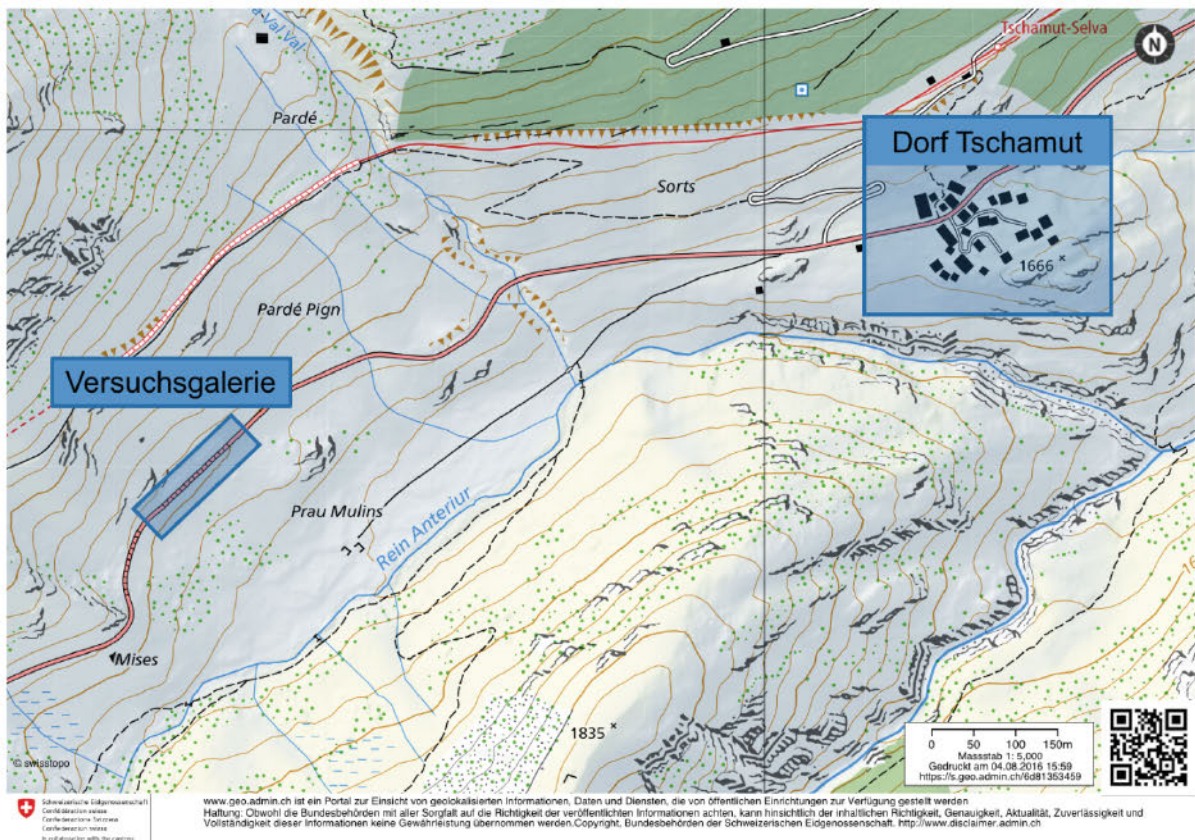


Abbildung 1: Versuchsgalerie (Pardé 1) im Oberalppass GR. (Quelle: map.geo.admin.ch, abgerufen am 13.07.16).

### 2.2 Konstruktion

Die Galerie Pardé 1 wurde 1940 erstellt und überspannt die Kantonsstrasse mit einer Breite von 6.5m auf eine Gesamtlänge von 105.4m. Das Galeriedach wird bergseitig durchlaufend durch eine Mauer, talseitig alle 5m durch eine Betonstütze getragen. Der Bereich zwischen zwei Stützen wird in diesem Bericht als Feld bezeichnet. Immer vier Felder sind durchgängig betoniert. Das Schutzbauwerk wurde geplant gegen Lawinen. An den beiden Galerieportalen befindet sich jeweils noch eine Ablenkmauer. Aus der Bauzeit existieren noch Schalungspläne. Über die Bewehrung liegen keine Informationen vor. 1987 wurden einzelne Stützen nachträglich verstärkt. Mittlerweile sind jedoch viele Stützen in nicht mehr einwandfreiem Zustand. Korrodierte Bewehrung liegt an vielen Stützen und auch am Galeriedach frei.





Abbildung 2: Ansicht Galerie mit Ablenkwand Portal Richtung Kanton Uri.

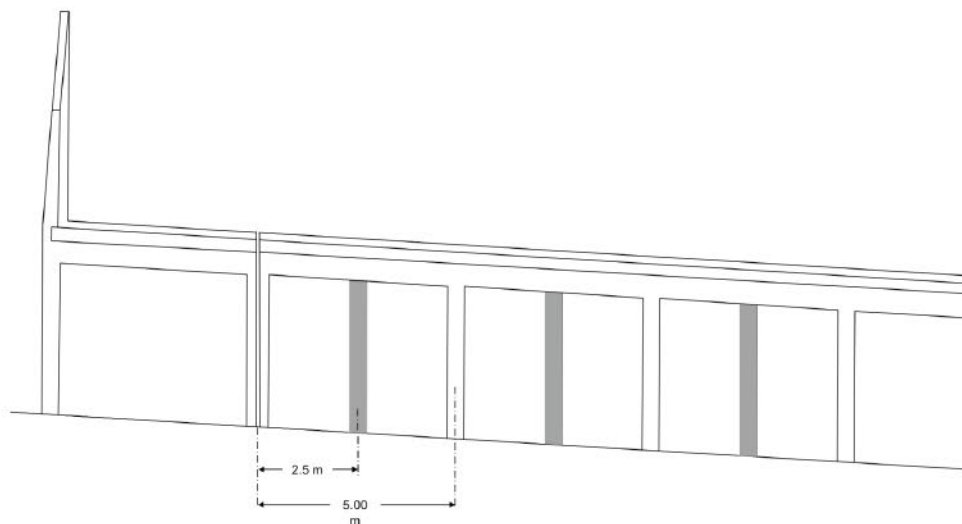


Abbildung 3: Abmessung der Galerie im Längsschnitt inkl. geplanter zusätzlicher Holzstützen (siehe Kapitel „Versuchsvorbereitung“).

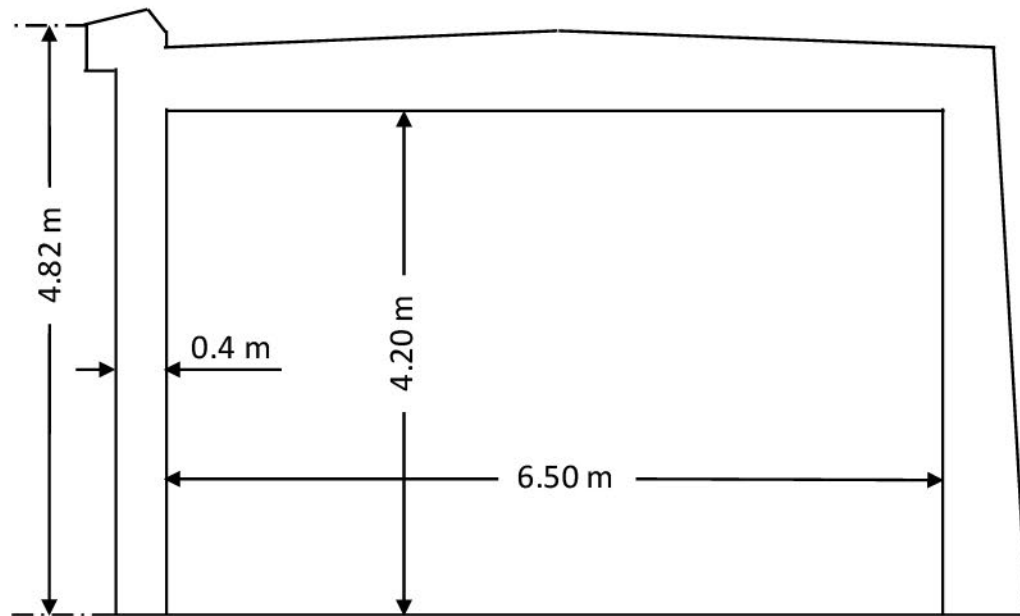


Abbildung 4: Abmessung der Galerie im Querschnitt.



Abbildung 5: (links) Sanierungsbedürftige Stütze in Feld 4 mit schon vorhandener Hilfsstütze und (rechts) Detail Stützenkopf.

## 2.3 Beton

Das Galeriedach wurde in Abschnitten von je 4 Feldern betoniert. Die Dicke der Betonplatte im Testgebiet betrug 60 cm. Zur Bestimmung der Betongüte wurden vom Tiefbauamt Graubünden insgesamt 4 Bohrkern mit einem Durchmesser von 50mm entnommen und auf ihre Druckfestigkeit geprüft (siehe Anhang). Die Resultate lagen zwischen 35.0 und 41.6 MPa. Daraus resultiert ein  $f_{ck, \text{massgebend, ist}}$  von 34.6 MPa. Dies entspricht der Betongüteklasse C30/37 gemäss der Klassifizierung nach der Norm SIA EN 13791:2007.

## 2.4 Bewehrung

Der Bewehrungsgehalt des Galeriedachs konnte erst im Nachgang zu den Versuchen während des Abrisses der Galerie ermittelt werden. Die Bewehrung war wie in der nachfolgenden Tabelle durch das TBA GR angegeben.

*Tabelle 1: Bewehrung des Galeriedachs.*

	Querrichtung	Längsrichtung
Obere Bewehrungslage	d12@200, c_nom = ca. 80mm	d16@800
Untere Bewehrungslage	d30@200, c_nom = ca. 30mm	d16@800

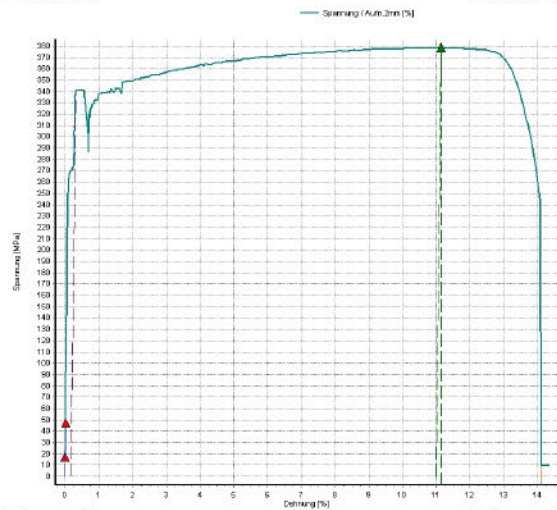
Einzelne Bewehrungsstäbe wurden im Auftrag des TBA GR an der HTW Chur hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit getestet. Es hat sich gezeigt, dass es sich bei den Eisen um Armierungsstahl Klasse 1 gemäss der alten SIA-Norm 162 handelt. Alle Proben sind im Bereich der damals geforderten Zugfestigkeit von 370 N/mm<sup>2</sup>. Der Mittelwert der Proben betrug 372.9 N/mm<sup>2</sup>.

*Tabelle 2: Messresultate der Zugversuche (Quelle: HTW Chur).*

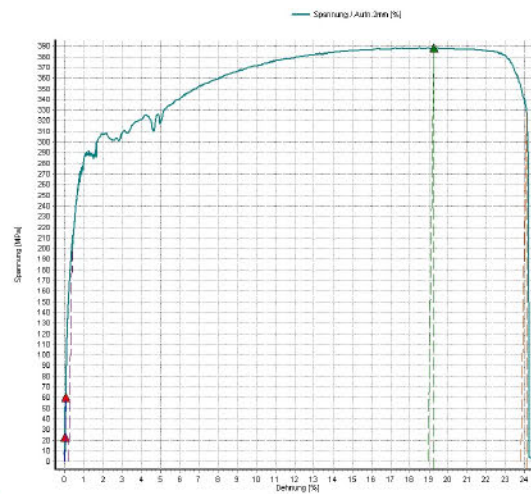
Probe	Durchmesser [mm]	Masse [g]	Länge [mm]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bemerkung
A	12	534.2	595	378.7	
B	20	1453.0	601	388.4	
C	20	1672.3	700	362.3	Oberflächlich stark korrodiert
D	24	2309.9	650	364.8	
E	30	3920.9	700	>370.3	Bruch nicht erreicht



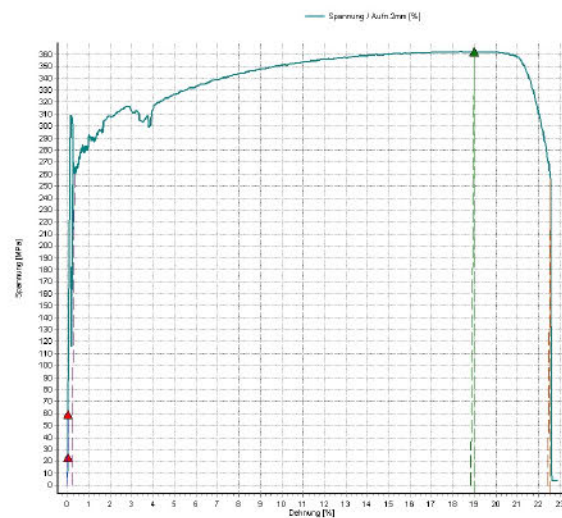
Eisen A



Eisen B



Eisen C



Eisen D

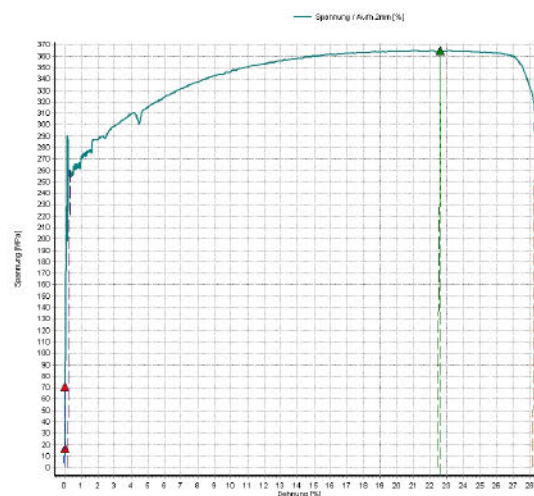


Abbildung 6: Last-Verformungsdiagramme von Zugversuchen an einzelnen Bewehrungsstäben (Quelle: HTW Chur).

## 2.5 Eindeckung

Die Eindeckung der Galerie besteht aus unverdichtetem Lockerboden (siehe nachfolgende Korngrößenverteilung) und ist mit Gras bewachsen. Messungen durch das TBA GR mit einem leichten Fallgewichtsgerät auf der auf 40 cm Dicke reduzierten Deckschicht zeigten  $E_{vd}$ -Werte zwischen  $5.0 \text{ MN/m}^2$  und  $23.5 \text{ MN/m}^2$ .

Tabelle 3: Summierte Korngrößenverteilung einer der Eindeckung entnommenen Probe (Quelle: TBA GR).

Max. Korngrösse [mm]	125	90	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	0.02	0.01	0.002
%	100	93.3	72.8	62.8	51.2	41.8	33.9	28.1	22.5	17.5	12.9	6.6	3.5	0.7
Steilheit	$C_{ud}$	173.3												
Krümmung	$C_{cd}$	1.5												

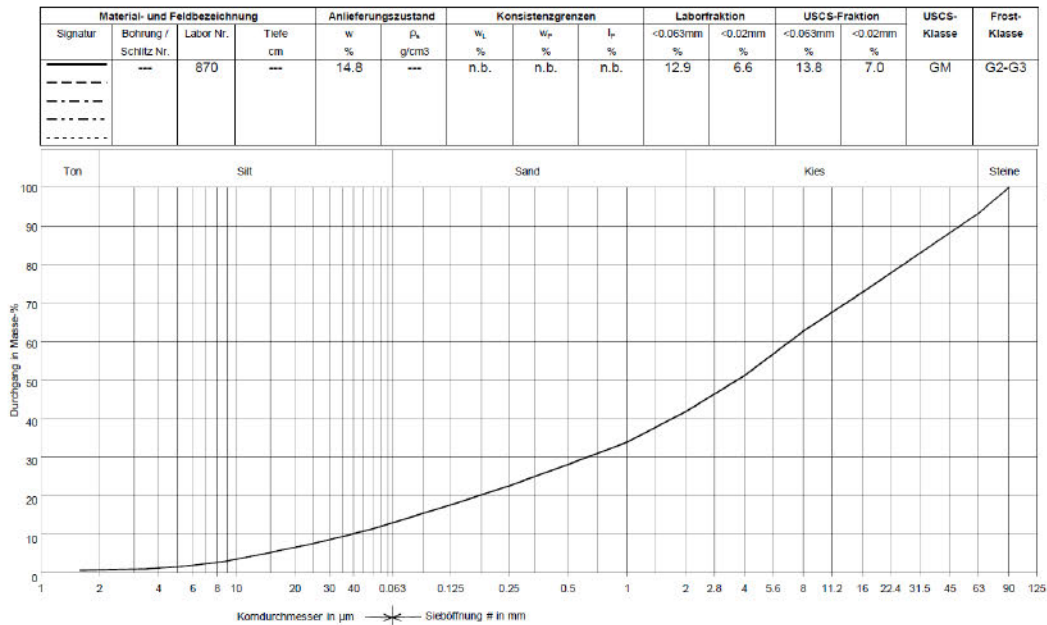
Tiefbauamt Graubünden, Sektion Materialtechnologie  
Sägerstrasse 76A, 7001 Chur

## Korngrössenverteilung (Summationskurve)

Bellage 2

Bericht Nr.:

H19 Oberalpstrasse, Galerie Oberalp Parde 1



Chur, 27.04.2016 RGI

Vorlage: 831\_P840\_vt\_30.9.2008.qg

Datei: G:\KZ\Labor\G2\Prüfungen\ISO 9001\831\Laborversuche\41\Siebenschlamm\2016\Galerie Oberalp Parde 1\ISO 9001-KV\_vt.qg\Diagramm5

Abbildung 7: Korngrössenverteilung einer Probe, welche der Eindeckung entnommen wurde (Quelle: TBA GR).



Abbildung 8: Eindeckung auf dem Galeriedach ungestört am Rand und für Fallversuche vorbereitet in der Mitte.



### **3 Vorbereitung der Versuche**

#### **3.1 Sicherheitskonzept**

Im Vorfeld der Versuche wurde ein Sicherheitskonzept verfasst. Neben den allfälligen Informationen über die Verantwortlichkeiten und für Alarmierung und Rettung dient es vor allem der Unfallprävention. Die Hauptgefahrenmomente wurden hierbei eingeschätzt in Bezug auf die Arbeiten auf dem Galeriedach ohne zusätzliche Abschränkung, sowie der Aufenthalt in der Nähe der Einschlagstellen der Wurfkörper, während sie am Kran hängen. Die Wettersituation (Schneefall, nass) vor Ort erschwerte den Zugang zum Galeriedach. Alle an den Versuchen beteiligten Personen wurden jeweils am Morgen mit den Sicherheitsbestimmungen vertraut gemacht.

Die Messtechnik wurde unter der Galerie im Bereich von Feld 10, auf dem Galeriedach im Bereich von Feld 7 installiert, um so einen ausreichenden Abstand zum Versuchsgebiet zu erhalten. Während der Versuche in Feld 4 erreichten aufgewirbelte Erdbrocken die Messtechnik auf dem Galeriedach.

#### **3.2 Galeriedach**

Für eine bessere Sichtbarkeit der Risse im Beton wurde das Galeriedach auf der Unterseite in den Feldern 2, 3 & 4 weiss gestrichen. Des Weiteren wurden Bohrungen gesetzt, über welche ein Beschleunigungsgeber installiert werden kann. Die Bohrungen wurden entlang der Galeriemitte und entlang der bergseitigen Viertelslinie im Abstand von 2.5m jeweils im Bereich einer Feldstütze und der Feldmitte platziert.

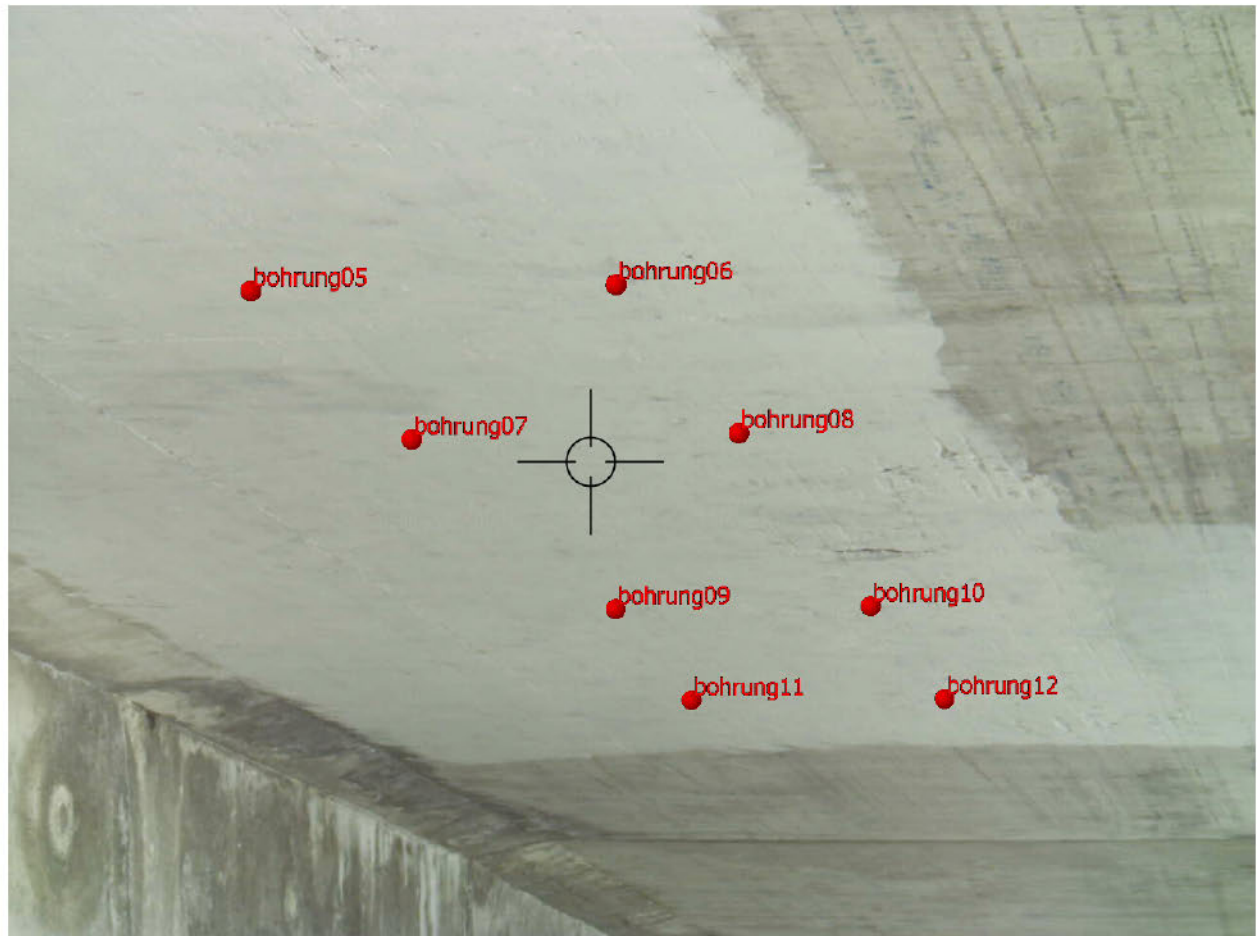


Abbildung 9: Platzierung der Bohrungen zur Befestigung der Beschleunigungsmessung an der Unterseite des Galeriedaches.

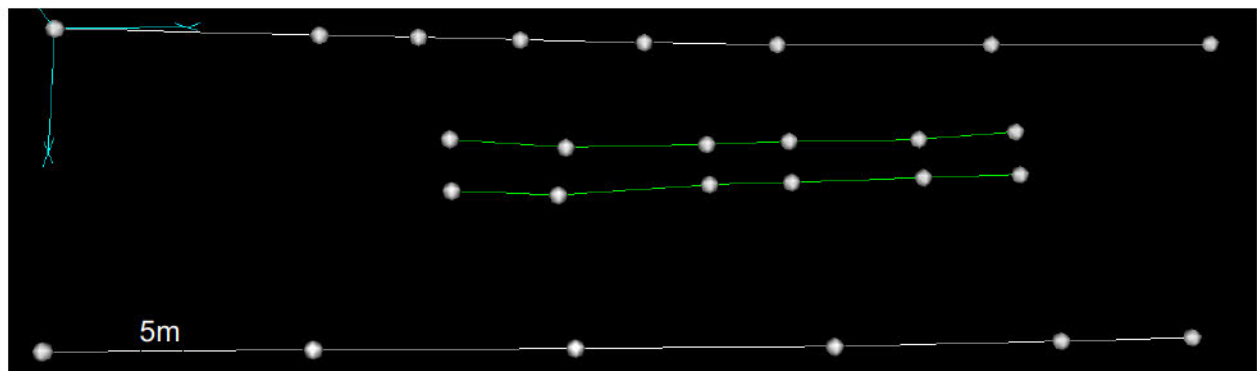


Abbildung 10: Platzierung der Bohrungen (entlang der hellgrünen Linien) zur Befestigung von Beschleunigungssensoren an der Galerieunterseite in den Feldern 2, 3 & 4. Die untere weiße Linie verläuft entlang der Stützen, die obere beschreibt den Übergang zur bergseitigen Galeriewand.

### 3.3 Zusätzliche Stützen

In erster Linie sollte die Tragfähigkeit des Galeriedachs und weniger diejenige der Randstützen untersucht werden. Die Betonstützen waren jedoch teilweise in einem schlechten Zustand. Darum wurde der talseitige Rand der Galerie mit zusätzlichen Holzstützen verstärkt. Hierfür wurden Baumstämme, jeweils auf Höhe der Feldmitten, platziert.





Abbildung 11: Galerieabschnitt mit Baumstamm.



Abbildung 12: Nahaufnahme des Galerieabschnittes mit Baumstamm.

### 3.4 Eindeckung

Für eine gleichmässige Bedeckung der Galerie wurde die Eindeckung vorgängig durch einen Schreitbagger bis auf 40 cm abgetragen. Es wurde dabei darauf geachtet, dass die Restschicht nicht mehr durch schwere Lasten zusätzlich verdichtet wird. Der Abtrag passierte in den Feldern 1-4 vom Pass-seitigen Portal aus gezählt. Das abgetragene Material wurde teilweise talseitig aufgeschichtet, um so einen kleinen Schutzwall zu erhalten. Dieser soll einen eventuellen Rücksprung des Wurfkörpers daran hindern, über die Galeriekante auf den neben der Galerie neu erstellten Fahrweg zu stürzen.





Abbildung 13: Auf 40 cm Mächtigkeit reduzierte Eindeckung im geplanten Testbereich mit Schutzwall zum Tal.

### 3.5 Vermessung & Georeferenzierung

Zur räumlichen Erfassung der Auslöse- bzw. Einschlagpositionen auf der Galerie und der Positionen der Beschleunigungsgeber auf der Unterseite wird ein Tachymeter Modell „Leica MS50“ verwendet.

Für einen gegenseitigen Bezug der verschiedenen Punkte wird ein gemeinsames Koordinatensystem benötigt. Hierfür wurden total sechs georeferenzierte Fixpunkte eingerichtet: Mittels einer dGPS-Messung mit einem Gerät „Leica GPS 1200“ wurden zuvor im Gelände oder an der Baustelle markierte Punkte auf 2-3 cm genau im Schweizerischen Landeskoordinatensystem (CH-1903) eingemessen.

Mit Hilfe dieser Fixpunkte liess sich der Tachymeter mit einer von diesem angegebenen Genauigkeit von 4 cm entweder auf dem Galeriedach oder auf der Kantonsstrasse positionieren.

### 3.6 Messtechnik

#### 3.6.1 Beschleunigungsmessung

Die Beschleunigungen des Galeriedachs und des Wurfkörpers während des Einschlags sollen erfasst werden. Hierfür werden Wurfkörper und die Unterseite des Galeriedachs jeweils mit Bohrungen versehen, sodass Beschleunigungsgeber mittels Einschlagankern befestigt werden können. Die eingesetzten Beschleunigungsgeber AMOS ALM-25 haben einem Messbereich von +/- 500g. Vor Ort wurden die eingesetzten Sensoren derart überprüft, dass zuerst ein Mittelwert über



eine mehrere Sekunden dauernde Messung in Richtung der Erdbeschleunigung genommen wurde. Anschliessend wurde der Sensor um 180° gedreht und musste dann im Mittel einen um 2g verschiedenen Wert abgeben. Die erreichte Genauigkeit lag dabei bei  $\pm 3\%$



Abbildung 14: Montage der Beschleunigungsgeber an Wurfkörper und Unterseite des Galeriedachs. Der Stahlrahmen bzw. die Stahlplatte werden mit Einschlagankern am Beton befestigt.



Abbildung 15: Zusätzlicher versuchsweise eingesetzter Sensor zur Montage im Wurfkörper.

### 3.6.2 Videosysteme

Zum Einsatz kommen zwei Hochgeschwindigkeitsvideosysteme AOS-Pri mit einer Auflösung von 800x600 Pixeln bei einer maximalen Aufnahmerate von 1250 Bildern pro Sekunde. Die eine Kamera filmt die Galeriedachunterseite im Bereich des Einschlags, die andere Kamera den Einschlag selbst auf dem Galeriedach. Die Kameras erhalten das Triggersignal von der zentralen Datenerfassung. Sie sind des Weiteren so eingestellt, dass sie auch vor der Auslösung Bilder mit der eingestellten Bildrate speichern. Die Kalibrierung der Videoaufzeichnungen, d.h. die Umwandlung von Pixeln in Bild in Meter, erfolgt im Rahmen der Auswertung. Die jeweiligen Massstäbe werden direkt am Wurfkörper erstellt, welcher eine bekannte Grösse hat.





Abbildung 16: Auf dem Galeriedach installiertes Videosystem mit aufgestelltem Tachymeter unter dem Wetterschutz-Pavillon.



Abbildung 17: Zentrale Datenerfassung und Triggerung der Messtechnik.

### 3.6.3 Datenerfassung

Während der Versuche kam ein Messsystem mit einer zentralen Triggerung zum Einsatz. Eine National Instruments Datenerfassung wird über ein spezielles Labview-Programm von einem PC angesteuert. Insgesamt stehen 16 Stromeingänge (4-20mA) zur Verfügung, welche mit jeweils 10kHz abgetastet werden können. Per Kabel angeschlossen an die Datenerfassung waren die zwei Beschleunigungsgeber. Die Auslösung der Messung erfolgte in der beschriebenen Versuchsreihe manuell im Moment des Aufschlag des Wurfkörpers auf die Galerie. Die Messung wurde so konfiguriert, dass auch Werte vor der Triggerung erfasst werden. Die Messtechnik leitet das Triggersignal an die Hochgeschwindigkeitsvideokameras weiter.

### 3.7 Wurfkörper

Für die Versuche wurden drei Wurfkörper aus der Steinschlagversuchsanlage Lochezen bei Wallenstadt SG an den Versuchsort transportiert. Die Wurfkörper entsprechen der „Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag“<sup>2</sup> und haben die Massen in den Kategorien 800, 1600 und 3200 kg. Nachfolgende Tabelle und Abbildung zeigen die Masse, Form und Geometrie der aus bewehrtem Stahlfaserbeton verwendeten Wurfkörper.



Abbildung 18: Eingesetzte Wurfkörper 800, 1600 und 3200.

Tabelle 4: Masse und Kantenlänge der verwendeten Wurfkörper.

Wurfkörper	800	1600	3200
Masse	800 kg	1590 kg	3240 kg
Kantenlänge	70 cm	88 cm	111 cm

<sup>2</sup> Gerber, W. (2001) Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag. BAFU, Bern.

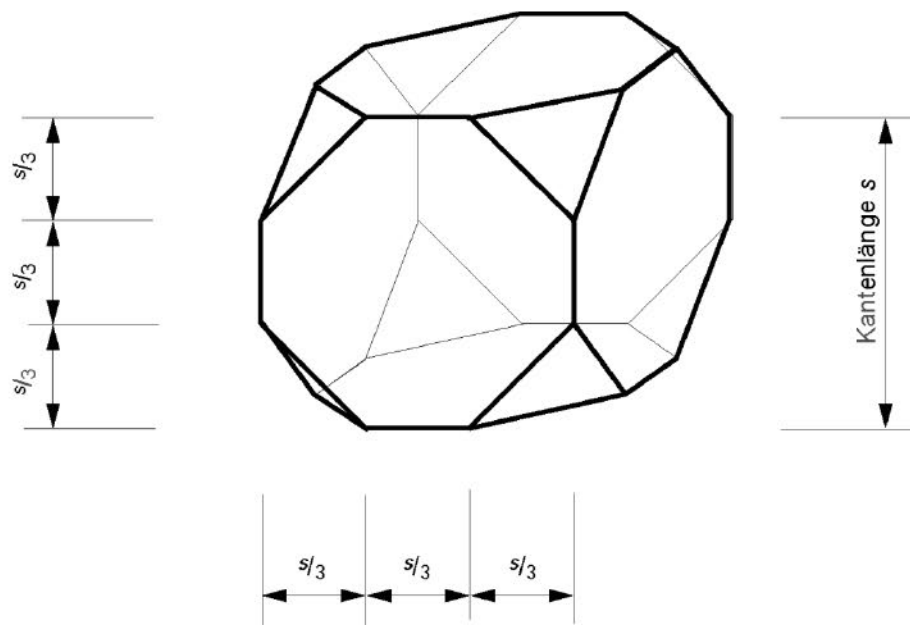


Abbildung 19: Form und Geometrie der Wurfkörper. (Quelle: Gerber W., 2001).

### 3.8 Pneukran

Um die Wurfkörper auf die entsprechende Höhe und Position anzuheben, wurde ein Pneukran der Firma Emil Egger ([www.ete.ch](http://www.ete.ch)) verwendet. Für die Versuche wurde ein GROVE GMK 4080-1 verwendet. Der Aktionsradius des Krans ermöglichte eine Auslösehöhe von 25m bei Verwendung des Wurfkörpers 800 über dem Galeriefeld 4. Die gleiche Abwurfhöhe konnte mit den Wurfkörpern 1600 und 3200 über den Feldern 3 und 2 erreicht werden.



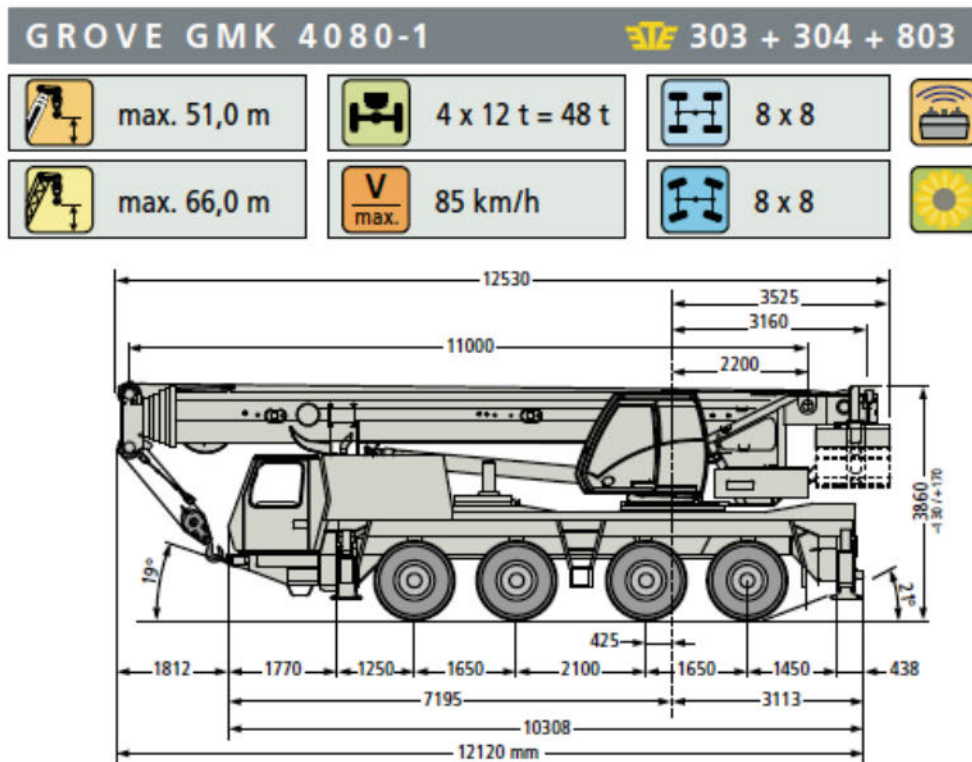


Abbildung 20: Spezifikationen GROVE GMK 4080-1 (80 t) (Quelle: [www.ete.ch/epaper/#28](http://www.ete.ch/epaper/#28), abgerufen am 15.07.16).



Abbildung 21: Aufstellung des Mobilkrans am passseitigen Galerieportal

### 3.8.1 Sicherung

Das plötzliche Auslösen der Wurfkörper erzeugt ein gegengerichtetes Momentum auf den Ausleger von gleicher Grössenordnung. Um zu verhindern, dass der Kran durch diesen Rückstoss von den Podesten gehoben wird, wurde eine zusätzliche Abspannvorrichtung vorgesehen. Der Kranhaken wird hierbei über eine V-Abspannung gegen unten gesichert. Als Widerlager für die Abspannung dient talseitig eine der Galeriestützen, welche mit einer Kette umfahren wird. Bergseitig sind zwei 2.5to-Gewichte schwer genug, um den erwarteten Zug aufzunehmen. Eingesetzt wurde die Abspannung für die Versuche mit dem Wurfkörper 3200.



Abbildung 22: Gegengewichte zur Rückschlagsicherung des Krankopfes.

### 3.8.2 Auslösung

Um die Wurfkörper fallen zu lassen, standen zwei Auslöseeinheiten zur Verfügung. Die kleinere „Helikopterklinke“ vermag den Wurfkörper 800 auszulösen. Sie kann via Kabelverbindung ferngesteuert werden.



Die zweite Klinke ist eine Einzelanfertigung der Firma Baremo. Sie vermag eine Auslösung einer Masse von maximal 20t. Die Klinke kann über Funk oder Kabel ferngesteuert werden. Zwei Akkus im Inneren müssen geladen sein, um einen Elektromagneten zu aktivieren. Die kalte Witterung und eine zu kurze Ladezeit verunmöglichten jedoch den Elektrobetrieb während der Versuche. Alternativ wurde der Ausklinkmechanismus rein mechanisch mittels einer Schnurverbindung ausgelöst. Hierzu begab sich eine Person bergwärts, bis sie ungefähr auf gleicher Höhe wie die Klinke in der Auslöseposition befand. Der Zug an der Schnur öffnete dann die Schliessarretierung. Im Falle einer versehentlichen vorzeitigen Auslösung durch ungewollten Zug auf der Auslöseschnur wurde die Versuchsfläche vor Anheben der Last geräumt und die Messtechnik für eine vorzeitige Triggerung eingerichtet.



Abbildung 23: Verwendete Auslöseeinheiten.

### 3.9 Stromversorgung

Zur Stromversorgung der gesamten Messtechnik stand ein 2 kW Generator zur Verfügung. Ein weiterer Generator mit einer Leistung von 500 W lieferte keine konstante Spannung wegen vermutlich der kalten Witterung und der grossen Höhe über dem Meer.

### **3.10 Witterung**

Da es in der Nacht vom Donnerstag, 07. April 2016, zeitweise intensiv schneite, kamen im Versuchsgebiet bis zu 30 cm Neuschnee zusammen. Am Versuchstag selbst herrschte eine dichte Bewölkung und es schneite mit wenigen Unterbrüchen den ganzen Tag bei einer Temperatur um 2 Grad.

Die Witterungsverhältnisse machten einen zusätzlichen Wetterschutz zum Schutze des Videosystems auf dem Galeriedach in Form eine Faltpavillons erforderlich. Tische und Bänke ermöglichten die Aufstellung der Messtechnik auf dem Galeriedach frei vom Boden und Schnee. Unter der Galerie war es bis auf einige Undichtigkeiten im Galeriedach trocken. Die Versuchsfläche auf dem Galeriedach wurde manuell vom gefallenen Schnee befreit.

Der Schneefall war zeitweise so stark, dass Messungen mit dem Tachymeter oder eine ausreichende Messung in den Videoaufzeichnungen nicht möglich waren.



## 4 Versuche

In diesem Kapitel werden die erhaltenen Ergebnisse abschnittsweise dargestellt. Die gesammelten Resultate sind – soweit in Tabellenform darstellbar – auch vollständig im Anhang zu finden. Sollten in Tabellen einzelne Werte fehlen, so bedeutet dies, dass die jeweilige Grösse nicht ermittelt werden konnte. Ursachen sind neben „nicht erfasst“ auch qualitativ unzureichende Messungen infolge Witterung oder Fehlmessungen.

### 4.1 Übersicht

Am Freitag, den 8. April 2016 wurden auf dem Dach der Galerie Pardé 1 insgesamt 5 Steinschlagversuche auf drei Galerieabschnitten (Felder 4, 3 & 2) durchgeführt. Es wurden verschiedene Wurfkörper wie auch Abwurfhöhen festgelegt.

Den Anfang machte Test P10 aus 10 m Höhe mit 800 kg in Feld 4. Dieser diente in erster Linie der Überprüfung der gesamten Versuchsinstallation. Im Anschluss erfolgte Test P11 auch wieder mit 800 kg in Feld 4 an dieselbe Stelle, jedoch mit einer Fallhöhe von 25 m. Test P20 erfolgte mit der doppelten Masse von rund 1600 kg auch wieder aus 25 m Höhe in Feld 3. Anschliessend wurde in Test P30 das erneut doppelte Gewicht von rund 3200 kg in Feld 2 aus 25 m Höhe fallen gelassen. Der Versuch P31 erfolgte identisch zum selben Aufprallort. Nachfolgend wird die Bezeichnung der Versuche dargestellt.

*Tabelle 5: Bezeichnung der Versuche inkl. Schusshöhen und Gewicht der Wurfkörper.*

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Galeriefeld		4	4	3	2	2
Wurfkörper	kg	800	800	1600	3200	3200
Fallhöhe (soll)	m	10	25	25	25	25
Energie (Grössenordnung)	kJ	80	200	400	800	800

Alle Versuche konnten im Wesentlichen erfolgreich durchgeführt und gemessen werden. Der Einschlag der Wurfkörper erzeugte deutlich spürbare Impulse sowohl auf dem Galeriedach als auch auf der Strasse unterhalb der Galerie. Der erste Einschlag in einem Feld erzeugte jeweils einen starken Auswurf des Deckmaterials, zum Teil mit einer deutlichen Ausbildung von Einschlagkratern im Deckmaterial. Beim Versuch P31 war quasi keine Eindeckung mehr vorhanden. Dieser Versuch erzeugte auf der Unterseite des Galeriedaches einzelne Risse im Beton und kleinere Abplatzungen. Während des Rücksprungs wurde der Block um 180 Grad um die horizontale Achse gedreht.

## 4.2 Abwurfposition

Die Mitten der Galeriefelder wurden vor dem Versuch händisch mittels Massband bezogen auf das passseitige Galerieportal grob bestimmt und markiert. Hier wurde mit dem Kranausleger jeweils der Wurfkörper positioniert und dann in die Höhe gehoben. Die Sollhöhe wurde mittels eines Schnurlotes erreicht. Die genau Abwurfhöhe dann noch mit einem Tachymeter gemessen und dokumentiert.

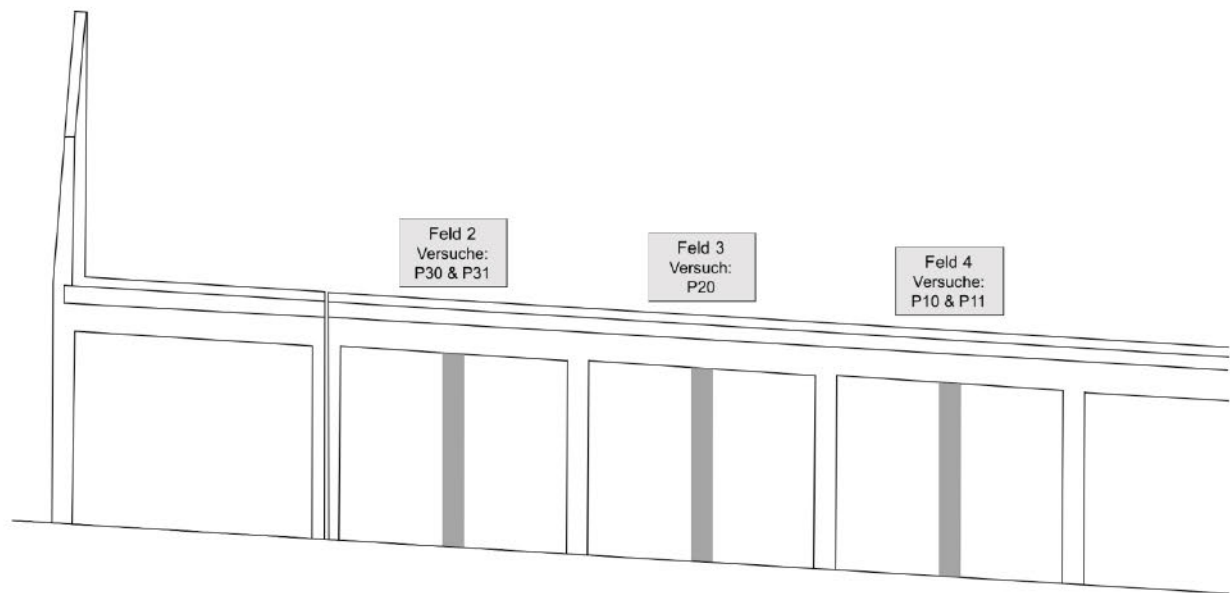


Abbildung 24: Bezeichnung der Galerieabschnitte und ungefähre Lage der Versuche P10, P11, P20, P30 & P31 im Längsschnitt (Quelle: Tiefbauamt Graubünden).

Tabelle 6: Einschlagposition der einzelnen Versuche in Bezug auf die Feldmitten und Positionen der Beschleunigungsmessungen auf der Unterseite des Galeriedaches.

Test Nr.			P10	P11	P20	P30	P31
Distanz von Plattenmitte	Querrichtung	m	0.9	0.9	1	0.9	0.9
	Längsrichtung	m		0	0.35	0.25	
Distanz von Beschleunigungssensor	Querrichtung	m	0.7	0.7	1.0	0.1	0.1
	Längsrichtung	m		0.1	0.35	0.1	
	Höhe	m		0.61	0.83	0.7	

## 4.3 Ausrichtung der Wurfkörper

Die drei eingesetzten Wurfkörper wurden jeweils mit einer Seilstruppe an die Auslöseeinheiten angehängt. Infolge von Aussermittigkeiten der Aufhängepunkte dieser Seilschlaufen an den Wurfkörpern ergab sich eine leichte Schiefelage der Wurfkörper beim Abwurf. Die Unterseite der



Wurfkörper traf dadurch nicht planparallel auf die Galerieeindeckung auf. Die Wurfkörper wiesen beim Einschlag eine Schrägstellung zwischen 7 und 14 Grad auf. Diese Schrägstellung bewirkte beim Versuch P31 letztendlich auch die Ausbildung einer Rotation des Wurfkörpers nach dem Ersteinschlag.

*Tabelle 7: Schräglage der Wurfkörper vor dem Aufprall.*

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
<i>Schrägstellung des Wurfkörpers</i>	<i>Grad</i>	<i>7</i>	<i>7</i>	<i>14</i>	<i>10</i>	<i>10</i>

## 5 Dynamische Messergebnisse

### 5.1 Beschleunigungsmessung

#### 5.1.1 Wurfkörper

Während der Versuche wurden die Beschleunigungen im jeweiligen Wurfkörper und an der Unterseite des Galeriedaches mit jeweils einem 500g-Beschleunigungsgeber gemessen. Die Aufzeichnungsrate betrug 10kHz (Versuch P10 = 2kHz). Die Messungen wurden zum Zeitpunkt des Einschlags manuell ausgelöst.

Steigung und Nullpunkt der verwendeten Sensoren wurden vor der Messung derart eingestellt, dass die angezeigte Beschleunigung bei einem Körper in Ruhe gleich Null und im freien Fall gleich  $-1$  ist. Diese Einstellung bewirkt, dass die Beschleunigungen praktisch eine Horizontalbewegung abbilden. Das Eigengewicht eines Körpers wird jedoch eliminiert. Möchte man mit Hilfe der angegebenen Beschleunigungsmessungen die wirkenden Kräfte direkt mittels „Newton“ (Kraft = Masse \* Beschleunigung) angeben, so muss bei den in diesem Bericht angegebenen Beschleunigungen jeweils noch die Erdbeschleunigung  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  addiert werden.

Tabelle 8: Aufzeichnungsrate, Messdauer & Pre-Triggerzeiten der Beschleunigungsmessung.

Test Nr.	P10	P11	P20	P30	P31
Messfrequenz Sensoren	Hz	2000	10000	10000	10000
Messdauer	s	3	5	5	5
Pre-Trigger-Intervall	S	2	3	3	3
Manuelle Triggerung bei Zeit	s	1.957	2.937	3.012	3.03

Die nachfolgende Abbildung zeigt, wie die Beschleunigung  $a$  des Wurfkörpers bei der Auslösung vom Wert  $a = 0 \text{ m/s}^2$  auf  $a = -g$  ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) abfällt. Im Moment des Einschlags geht die Beschleunigung anschliessend sprunghaft nach oben.

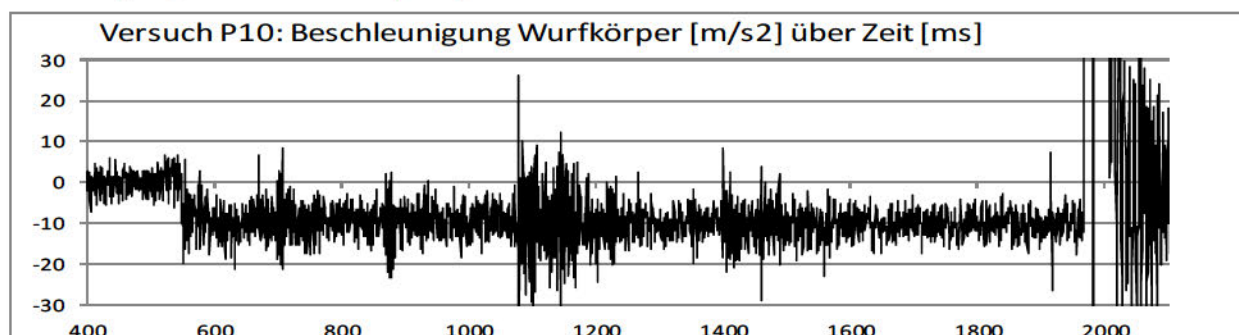


Abbildung 25: Beschleunigungsverlauf von Versuch P10 zwischen Auslösung und Einschlag.



Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Beschleunigungskurven der einzelnen Versuche während des Aufpralls. Man erkennt deutlich den Anstieg der Beschleunigung mit Beschleunigungsspitzen von bis zu  $6000 \text{ m/s}^2 = 600 \text{ g}$ . Auf der anderen Seite erkennt man jedoch auch starke Schwingungen im Signalverlauf. Dies und die Tatsache, dass die Beschleunigungsspitzen nur sehr kurzzeitig wirken, lässt vermuten, dass diese Spitzen durch den Versuchsaufbau induziert werden. Dies können sein die Befestigung des Sensors am Wurfkörper oder die Eigenfrequenz des Sensors an sich (Masse-Feder-System). Die etwas langsameren Schwingungen gegen Messende werden vermutet als die gemeinsame Bewegung von Wurfkörper und Galeriedach.

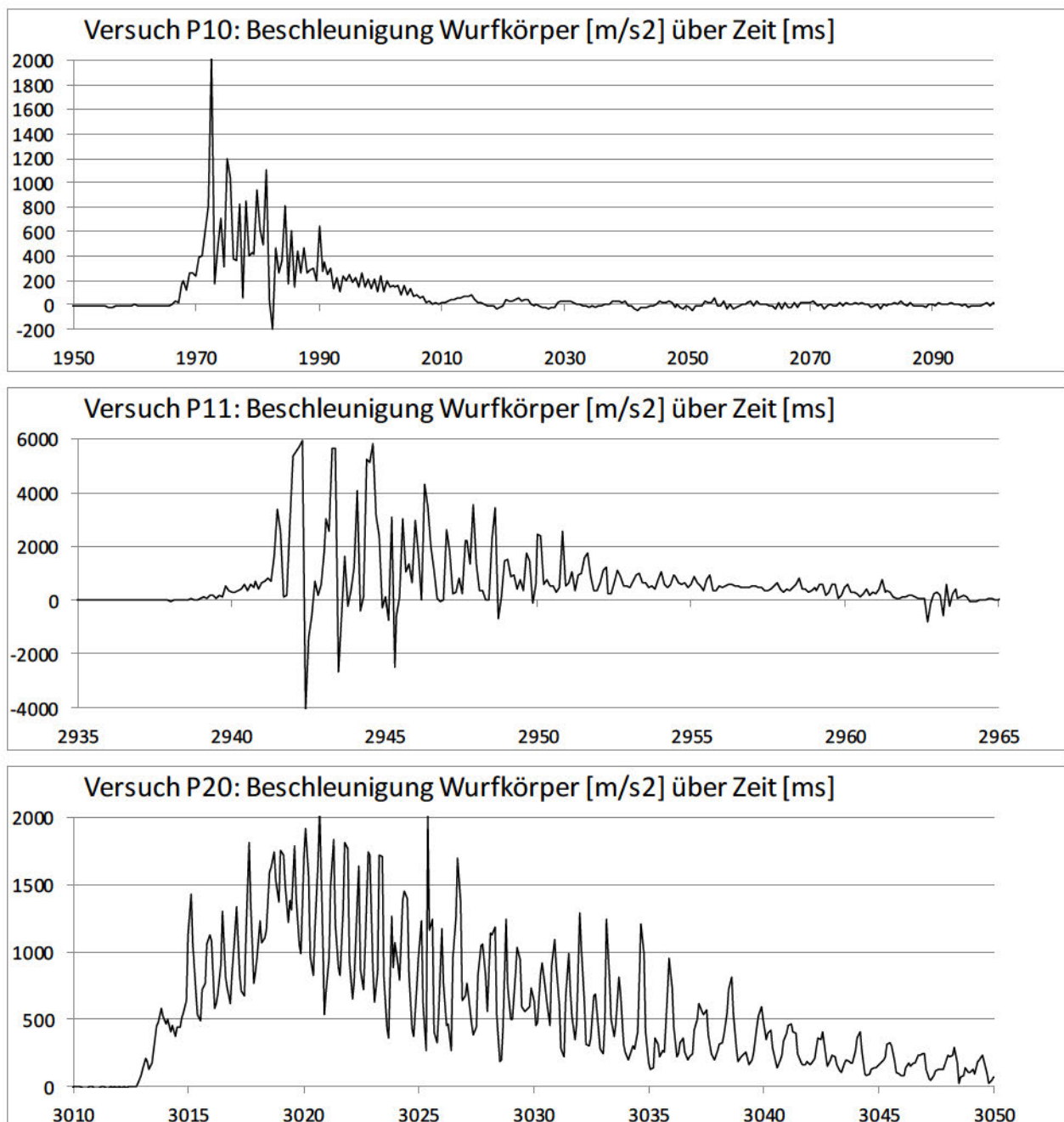


Abbildung 26: Beschleunigungsverlauf der Wurfkörper bei den Versuchen P10, P11 & P20 während des Einschlags.

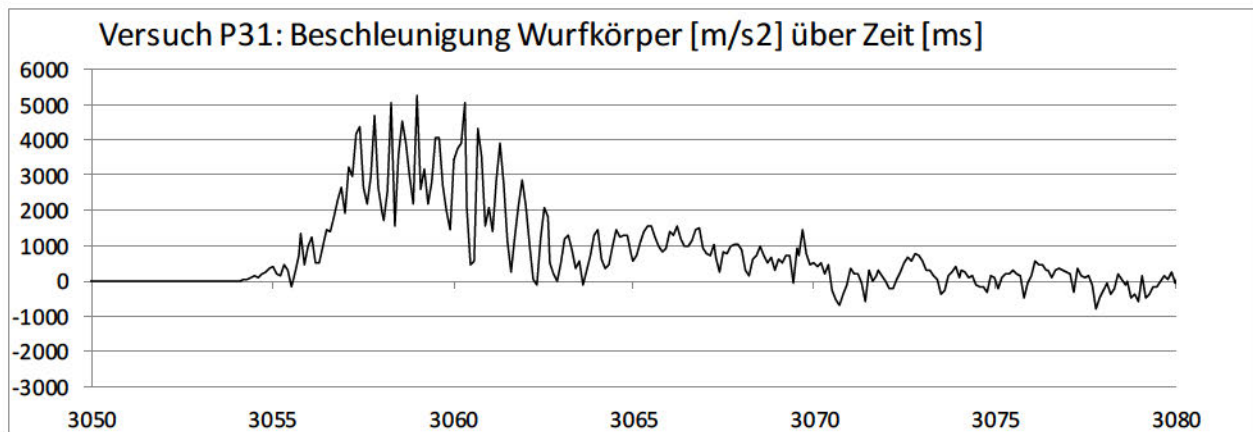
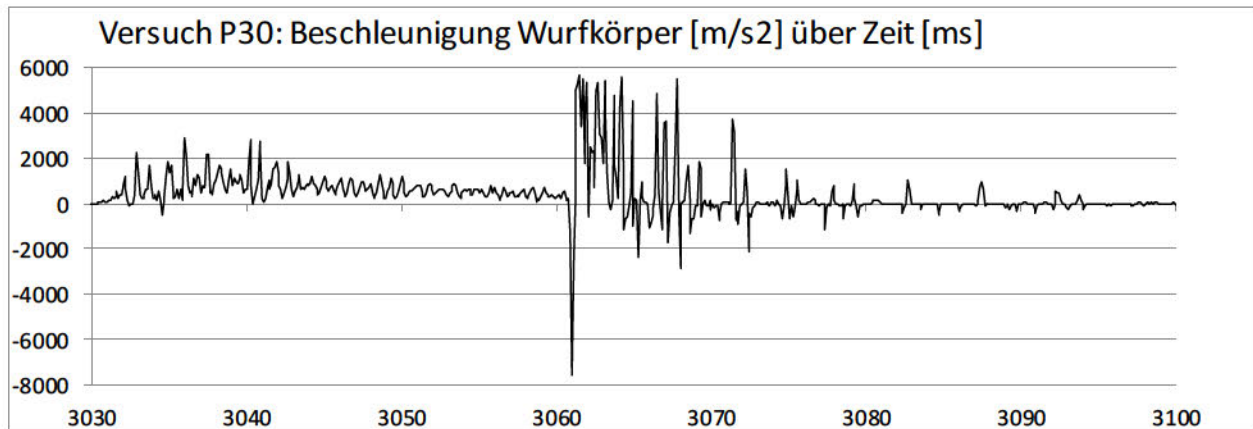


Abbildung 27: Beschleunigungsverlauf der Wurfkörper bei den Versuchen P30 & P31 während des Einschlags.

In Versuch P30 tritt die höchste Beschleunigung erst nach der Zeit  $t=3050\text{ms}$  auf. Dies ist jedoch keine effektive Beschleunigung des Wurfkörpers, sondern vielmehr der Einschlag der Seilschlinge, an welcher der Wurfkörper am Kran angehängt war, auf das Stahlprofil auf der Wurfkörperoberseite, welches den Sensor beinhaltet. Diese Beschleunigung trägt effektiv also nicht zur Bewegung des Wurfkörpers bei, wird aber voraussichtlich die Zeitintegration des Beschleunigungssignals beeinflussen. Aus diesem Grund wird für die weitere Behandlung der Beschleunigungsdaten des Wurfkörpers bei Versuch P30 der Beschleunigungsimpuls infolge des Seilschlingenaufschlags für 20 ms aus den Daten gelöscht und statt dessen mit einem linear interpolierten Beschleunigungsverlauf „aufgefüllt“ (siehe nachfolgende Abbildung).

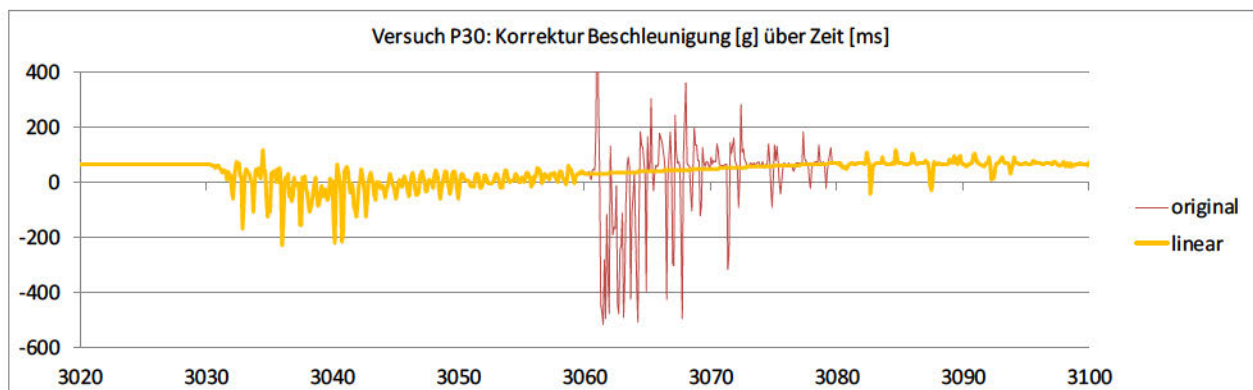


Abbildung 28: Korrigierter Beschleunigungsverlauf des Wurfkörpers bei Versuch P30 während des Einschlags.



### 5.1.2 Galeriedach

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen die während des Einschlags gemessenen Beschleunigungen an der Unterseite des Galeriedaches. Deutlich sieht man die erste Bewegung nach unten und das sich gleich anschliessende Zurückschwingen der Platte wieder nach oben. Auch hier sind nach der Ersterregung wieder mehrere Schwingungen erkennbar. Diese werden vermutlich einmal der Befestigung des Sensors an der Decke geschuldet sein (einfache Stahlplatte nur einseitig mit einer Schraube fixiert) und zum anderen bilden sie die Schwingung der Galeriedecke ab.

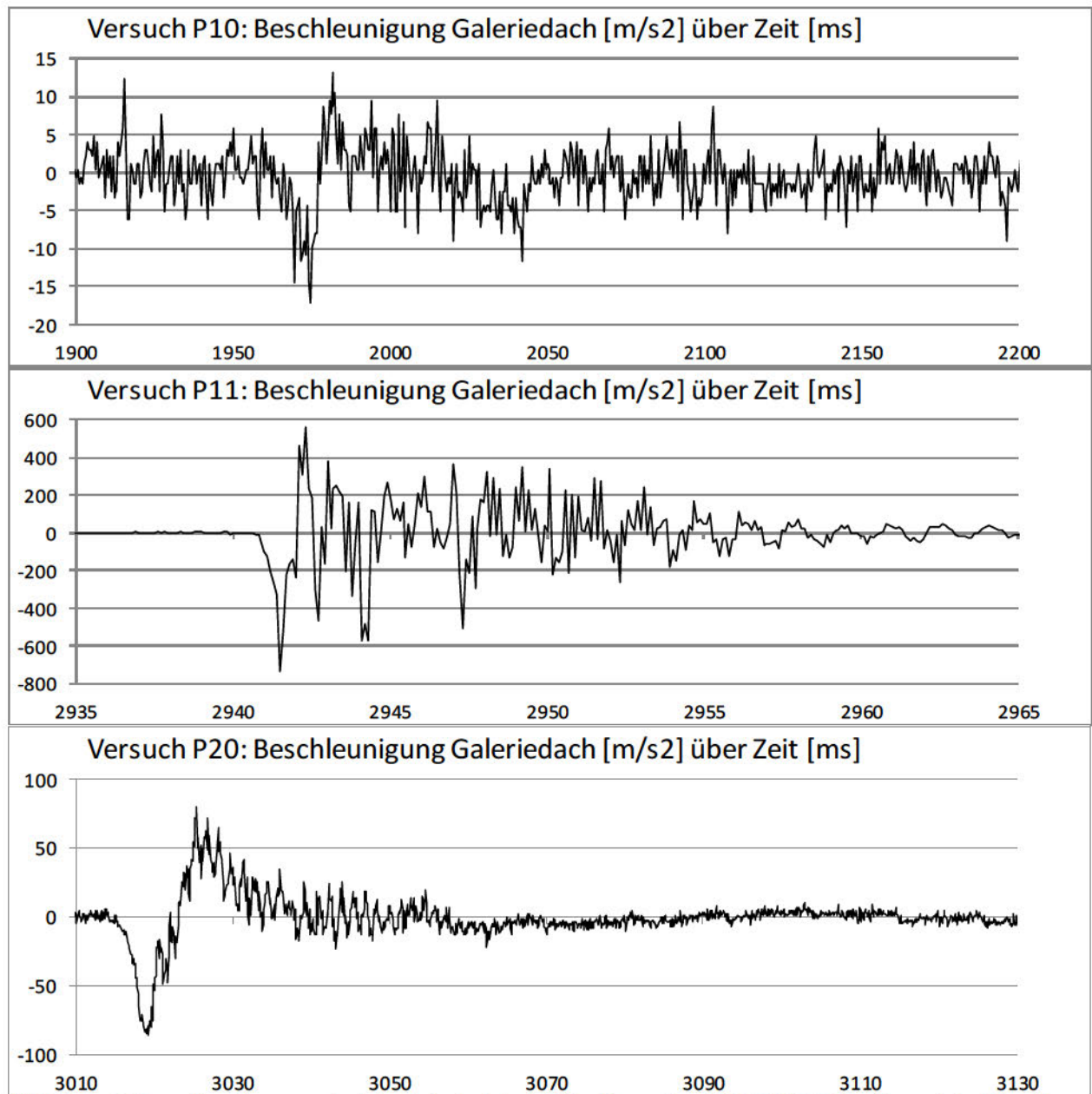


Abbildung 29: Beschleunigungsverlauf der Galerieplatte bei den Versuchen P10, P11 & P20 während des Einschlags.

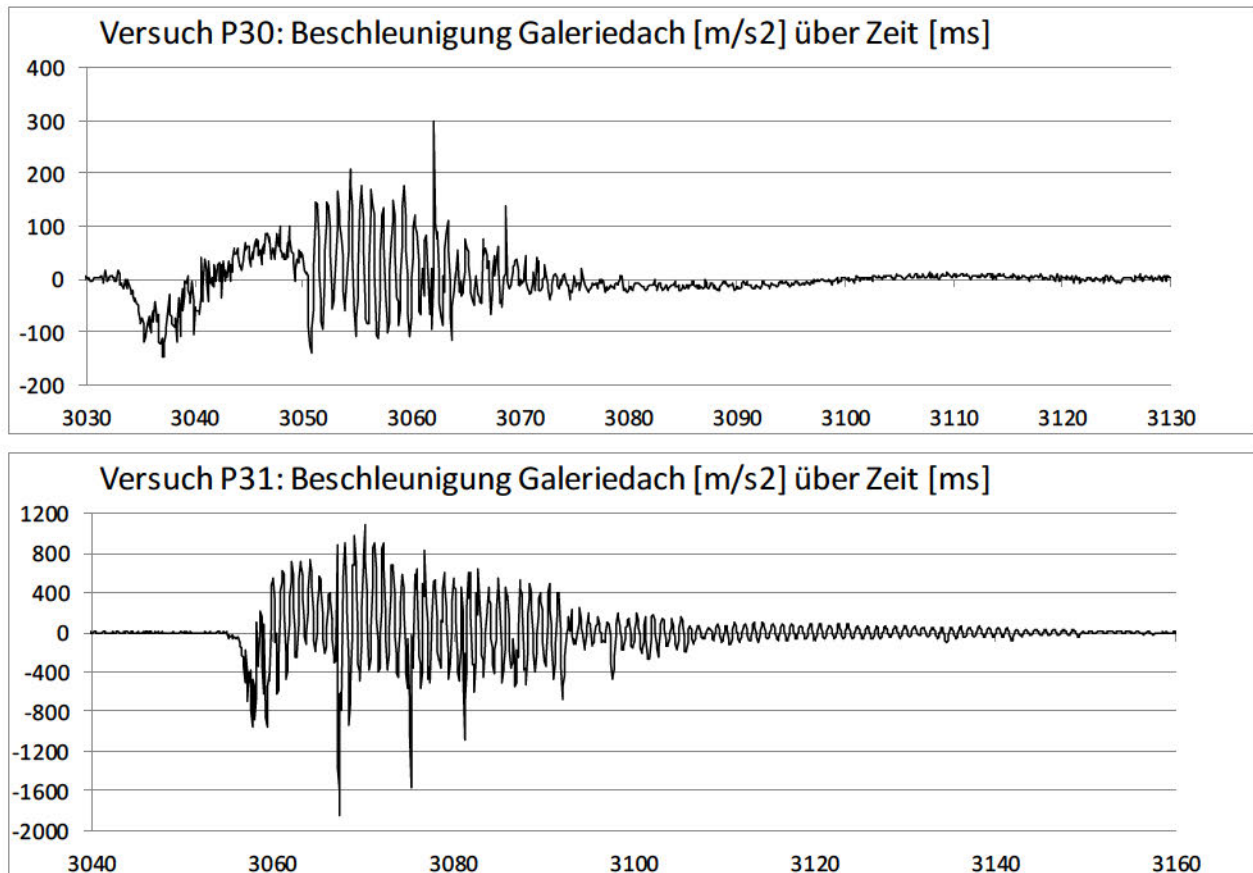


Abbildung 30: Beschleunigungsverlauf der Galerieplatte bei den Versuchen P30 & P31 während des Einschlags.

## 5.2 Videoaufzeichnungen

Während der Versuche war eine Kamera auf die Unterseite des Galeriedaches im Einschlagbereich gerichtet. Die andere filmte horizontal über das Galeriedach hinweg und erfasste so den Wurfkörper während des Einschlags. Die Kameras filmten mit unterschiedlichen Bildraten wie in der nachfolgenden Tabelle beschrieben. Die Kameras zeichneten kontinuierlich in einen Ring-speicher auf, bis sie getriggert wurden. Die Triggerung erfolgte synchron mit der Beschleunigungsmessung. Die Zeitachsen der Videokameras weichen also um höchstens ein Bildintervall von derjenigen der Beschleunigungsmessung ab. Die Pre-Trigger-Zeit ist ebenfalls in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die Videoaufzeichnungen der Galerieunterseite lieferten kein für eine Auswertung nutzbares Bildmaterial.

Es zeigte sich, dass der Materialaufwurf von Galeriematerial bei den Einschlägen aus 25m Fallhöhe so gross war, dass die Wurfkörper in den Videoaufzeichnungen nicht mehr erkennbar waren. In den nachfolgenden Abbildungen sieht man zuerst Versuch P10 aus 10m Fallhöhe kurz vor dem Aufprall und anschliessend bei maximaler Eindrückung. Anschliessend ist der Versuch P30 mit 25m Fallhöhe kurz vor dem Einschlag und bei maximalem Materialauswurf zu sehen.



Deutlich erkennt man hier auch die Schiefstellung des Wurfkörpers infolge exzentrischer Aufhängung.

Tabelle 9: Bildrate, Messdauer & Pre-Triggerzeiten der Videoaufzeichnungen.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Bildrate	Hz	250	250	250	1000	1000
Zeit pro Bild	s	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001
Einschlag bei	s	0.388	0.356	0.356	0.57	0.597
Pre-Trigger-Intervall	s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

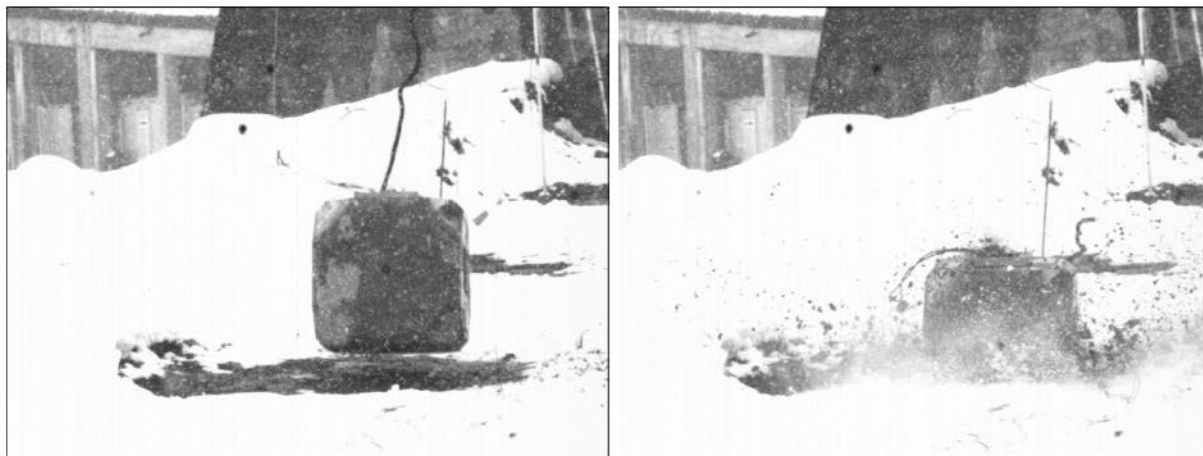


Abbildung 31: Versuch P10: Videoaufzeichnung kurz vor dem Einschlag und bei maximaler Eindrückung.

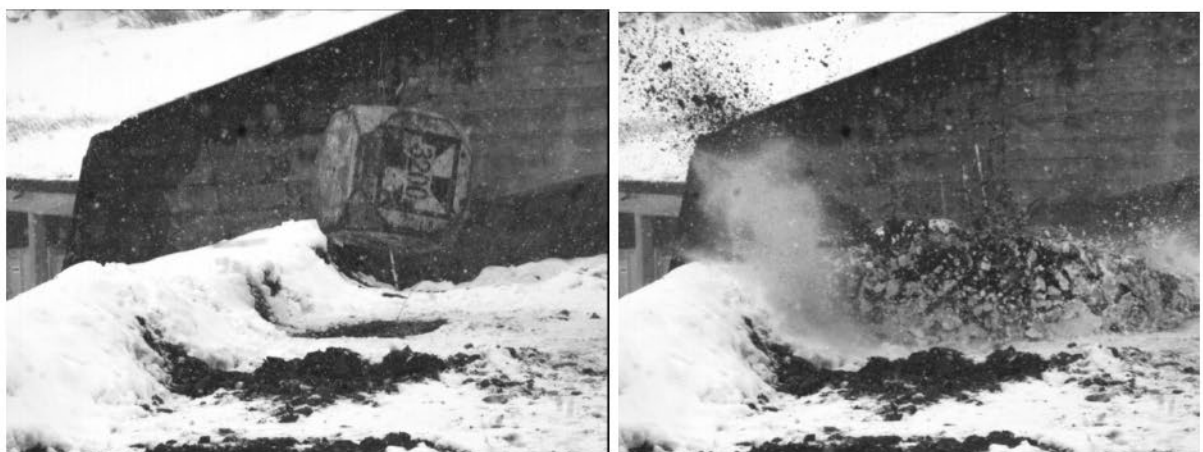


Abbildung 32: Versuch P30: Videoaufzeichnung kurz vor dem Einschlag und bei maximalem Materialauswurf.

Anhand der Abfolge der Videofilme war es möglich, die Weg-Zeitkurven einzelner erkennbarer Punkte auf den Wurfkörpern zu ermitteln. Die nachfolgende Abbildungen zeigen die gewonnenen

Resultate. Es wurden jeweils mehrere Punkte „getracked“, um somit unstimmige Messungen, sog. Ausreisser oder auch Fehlmessungen besser zu erkennen. Die Punkte wurden während ihrer Sichtbarkeit im Video erfasst. Daher resultieren die zeitlich versetzten Anstiege und Enden der Kurven. Der Beginn fällt mit dem Eintritt ins Bild, das Linienende mit der Verdeckung durch aufgeworfenes Deckmaterial zusammen. Der geradlinig erscheinende Anstieg zu Beginn ist in der Realität Teil einer Parabel. Jedoch ist die Geschwindigkeit der Wurfkörper im abgebildete Zeitraum zu hoch, als dass man eine Krümmung der Flugbahn mit bloßem Auge erkennen kann.

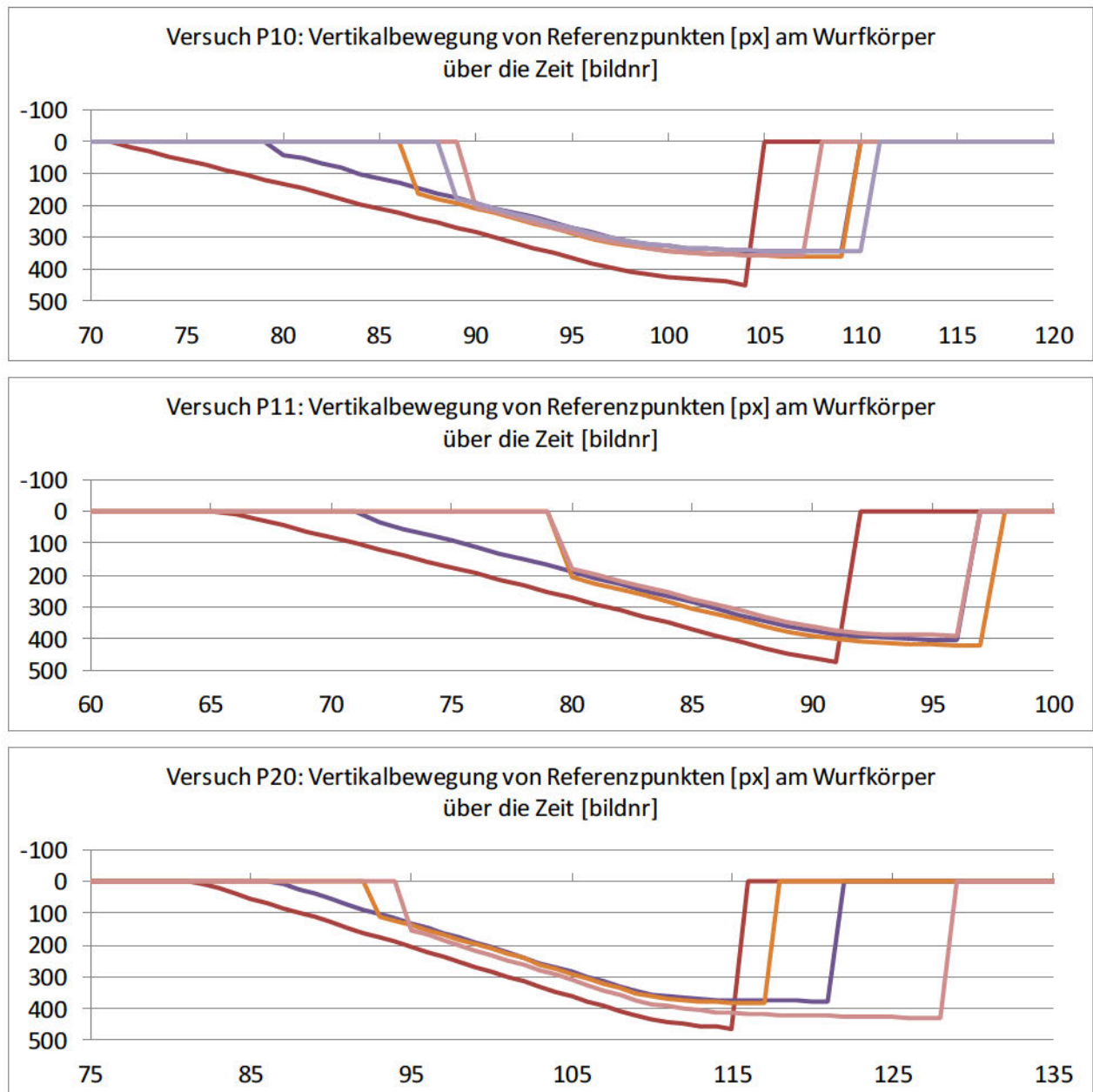


Abbildung 33: Vertikalbewegung des Wurfkörpers in Pixeln bei den Versuchen P10, P11 & P20 .



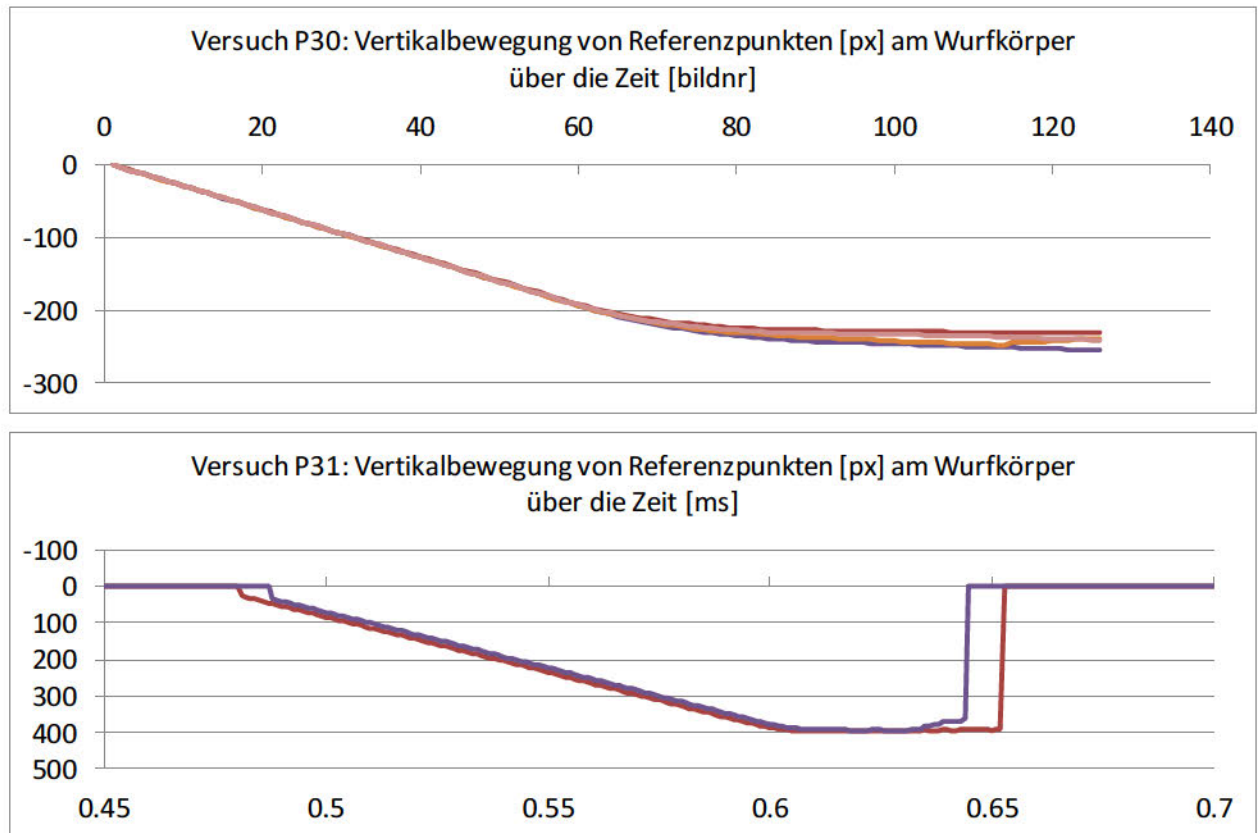


Abbildung 34: Vertikalbewegung des Wurfkörpers in Pixeln bei den Versuchen P30 & P31.

## 6 Datenverarbeitung

### 6.1 Beschleunigungsverlauf

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, weisen die Beschleunigungsmessungen sowohl in den Wurfkörpern als auch am Galeriedach charakteristische Schwingungen auf, welche u.U. auch verantwortlich für sehr kurzzeitige und sehr hohe Beschleunigungsspitzen sind. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Frequenzen, welche aus den Beschleunigungsmessungen ersichtlich waren. Diese Frequenzen wurden so ermittelt, dass über einen gewissen Zeitraum hinweg die visuell beobachteten Maxima gezählt und anschliessend durch die Dauer des beobachteten Zeitraums dividiert wurden. Alternativ können diese Frequenzen auch im Frequenzgangspektrum einer Fourier Analyse des Messsignals ermittelt werden (siehe nachfolgende Abbildung).

Tabelle 10: Beobachtete Schwingungsfrequenzen der Beschleunigungsmessungen.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Messfrequenz Sensoren	Hz	2000	10000	10000	10000	10000
Eigenfrequenz	Sensorinstallation oben	Hz	126	90	92	
	Sensorinstallation unten	Hz		95		867
	Platte	Hz				200

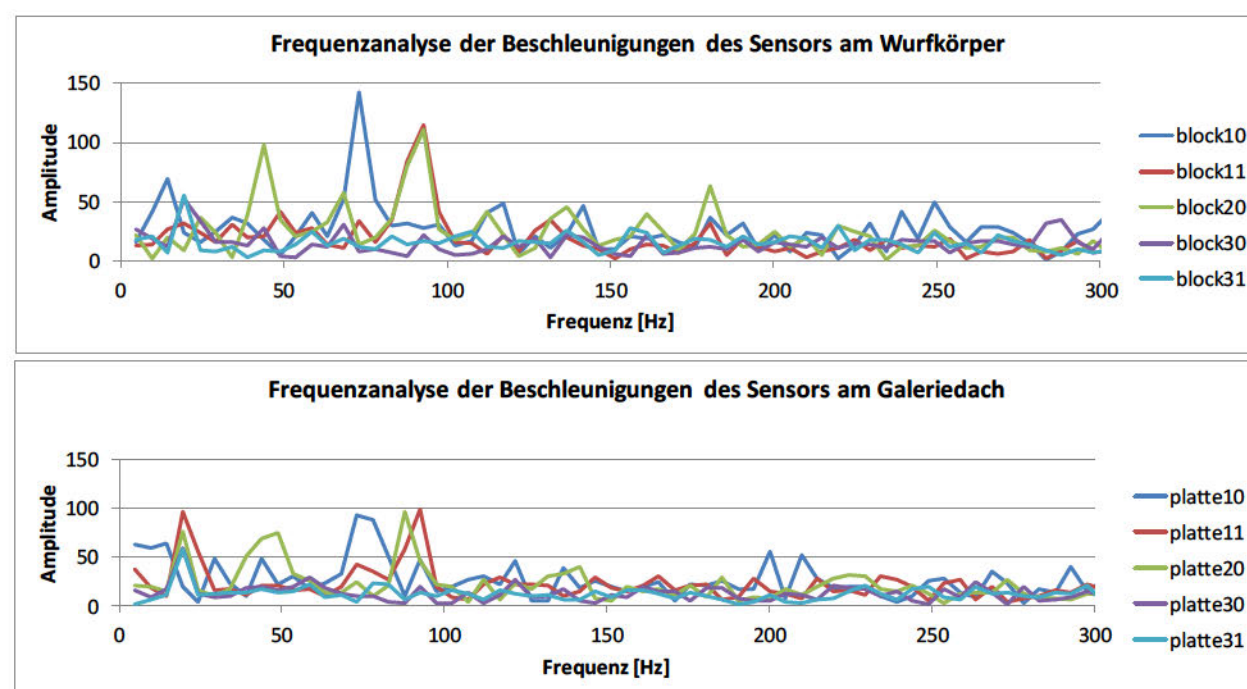


Abbildung 35: Frequenz-Amplituden-Analyse der gemessenen Beschleunigungssignale.



Für eine Beurteilung der Beschleunigungssituation wurden auf die Messreihen zwei verschiedene Filter angewendet. Zum einen war dies ein Tiefpassfilter, welcher die Sensor- und Befestigungsbedingten Signalschwankungen eliminiert. Die andere Variante war die Verwendung eines gleitenden Mittels, welches vor allem die sensorbedingten Schwankungen dämpfte. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Beschleunigungsverläufe des Versuchs P10. Die anschließende Tabelle zeigt die gewählte Anzahl Messwerte für die Bestimmung des gleitenden Mittels.

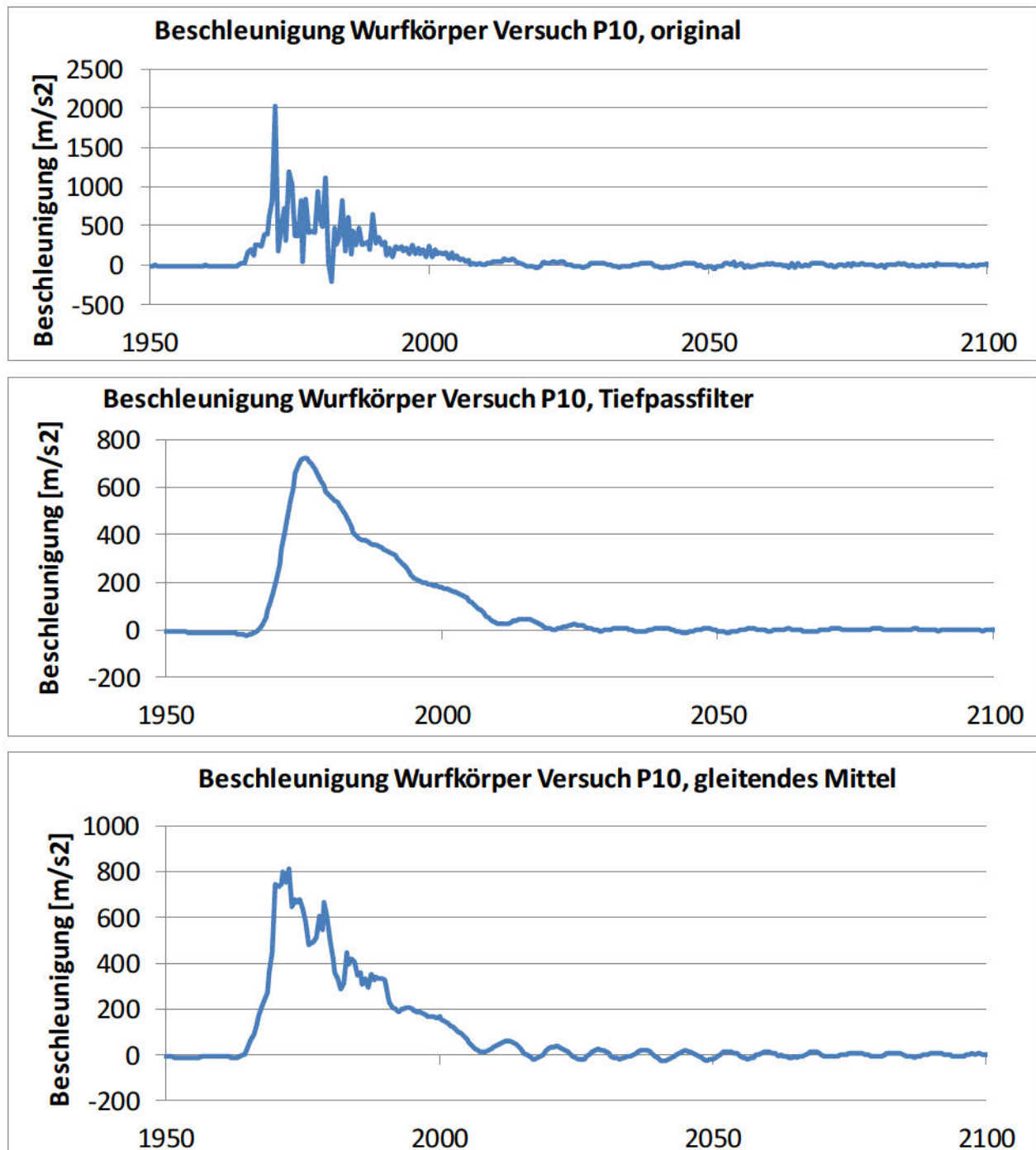
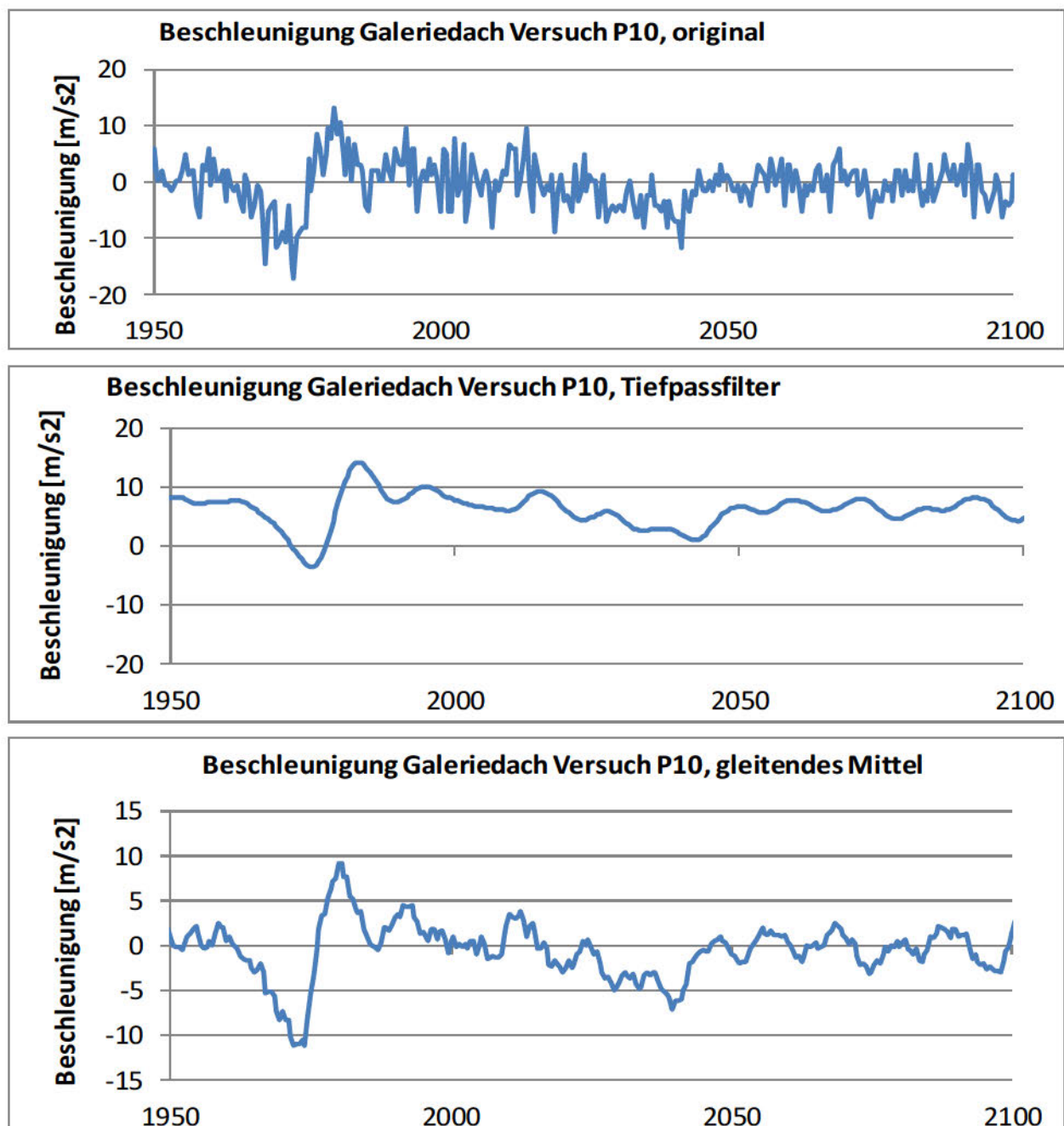


Abbildung 36: Beschleunigungskurve des Wurfkörpers während des Einschlags in Versuch P10, ungefiltert, nach Anwendung eines Tiefpassfilters, nach Anwendung eines gleitenden Mittels über je 5 Messwerte.

Tabelle 11: Anzahl Messwerte zur Bestimmung der gleitenden Beschleunigungsmittel.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Anzahl Messwerte für gleitendes Mittel	Wurfkörper	5	25	5	10	10
	Platte	5	25	25	10	10
Zeitraum für gleitendes Mittel	Wurfkörper	ms	2.5	0.5	1	1
	Platte	ms	2.5	2.5	1	1





*Abbildung 37: Beschleunigungskurve des Galeriedachs während des Einschlags in Versuch P10, ungefiltert, nach Anwendung eines Tiefpassfilters, nach Anwendung eines gleitenden Mittels über je 5 Messwerte.*

Der Tiefpassfilter erreicht eine sehr gute Glättung des Beschleunigungssignals. Die Glättung der Kurve durch die Anwendung des gleitenden Mittels hängt davon ab, wie viele Werte man in die Glättung mit einbezieht. Im abgebildeten Fall waren dies jeweils 5 Werte. Ziel war es, sehr kurzzeitige Spitzen kleiner als 1ms zu eliminieren, hingegen die maximalen effektiven Beschleunigungen nicht zu stark zu verfälschen. Der Tiefpassfilter hat vor allem bei der Messung in der Betonplatte einen grossen Einfluss auf die maximale Beschleunigung (siehe nächste Unterkapitel).

## 6.2 Integration der Beschleunigungsdaten der Wurfkörper

Die Beschleunigungsdaten von Wurfkörper und Galeriedach können ein- bzw. zweimal über die Zeit integriert werden, um so den Geschwindigkeit- und Wegverlauf über die Zeit zu erhalten. Im Rahmen dieser Integration kann der Offset des Beschleunigungssensors noch verbessert werden, indem die folgenden Bedingungen möglichst gut erfüllt werden:

- Durchschnittlicher Ruhewert =  $0 \text{ m/s}^2$
- Durchschnittlicher Wert während Freifall =  $-g$
- Geschwindigkeit bei Ruhelage vor und nach Versuch konstant =  $0 \text{ m/s}$
- Wegkurve bei Ruhelage vor und nach Versuch konstant (nur, wenn Sensor horizontal)

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die erhaltene Wurfkörperkinetik für den gesamten Fallprozess (ungefilterte Beschleunigungen) und im Detail für den Aufprall mit der Wegkurve in Zentimetern.

Das jeweils obere Diagramm zeigt zuerst den Wurfkörper in Ruhe bis zur Auslösung. Im freien Fall nimmt die Geschwindigkeit linear und die Wegkurve quadratisch zu, jeweils in den negativen Bereich. Die Beschleunigungsspitze zum Zeitpunkt des Aufpralls reduziert die Geschwindigkeit auf null. Wächst die Geschwindigkeit ins positive so steht dies für einen Rücksprung des Wurfkörpers.

Die Integration der Beschleunigungen von Versuch P10 zeigt nahezu perfekte Bewegungskurven. Die Verformungen der Platte sind vernachlässigbar.

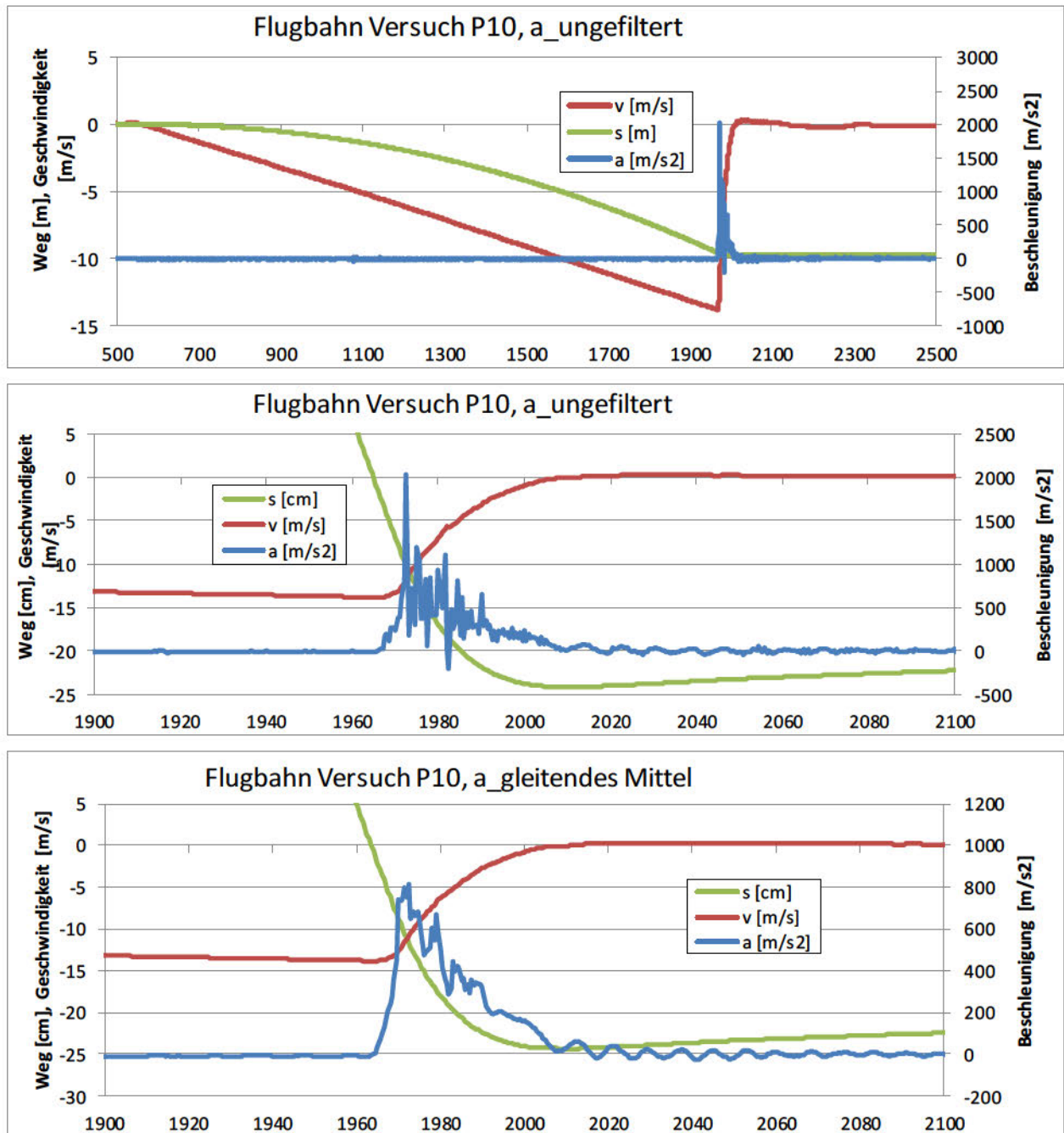


Abbildung 38: Kinetik über die Zeit in ms von Versuch P10: (oben) gesamter Versuch mit ungefilterten Beschleunigungsdaten, (mitte-unten) Detail Einschlag. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in m bzw. cm auf der linken Achse.



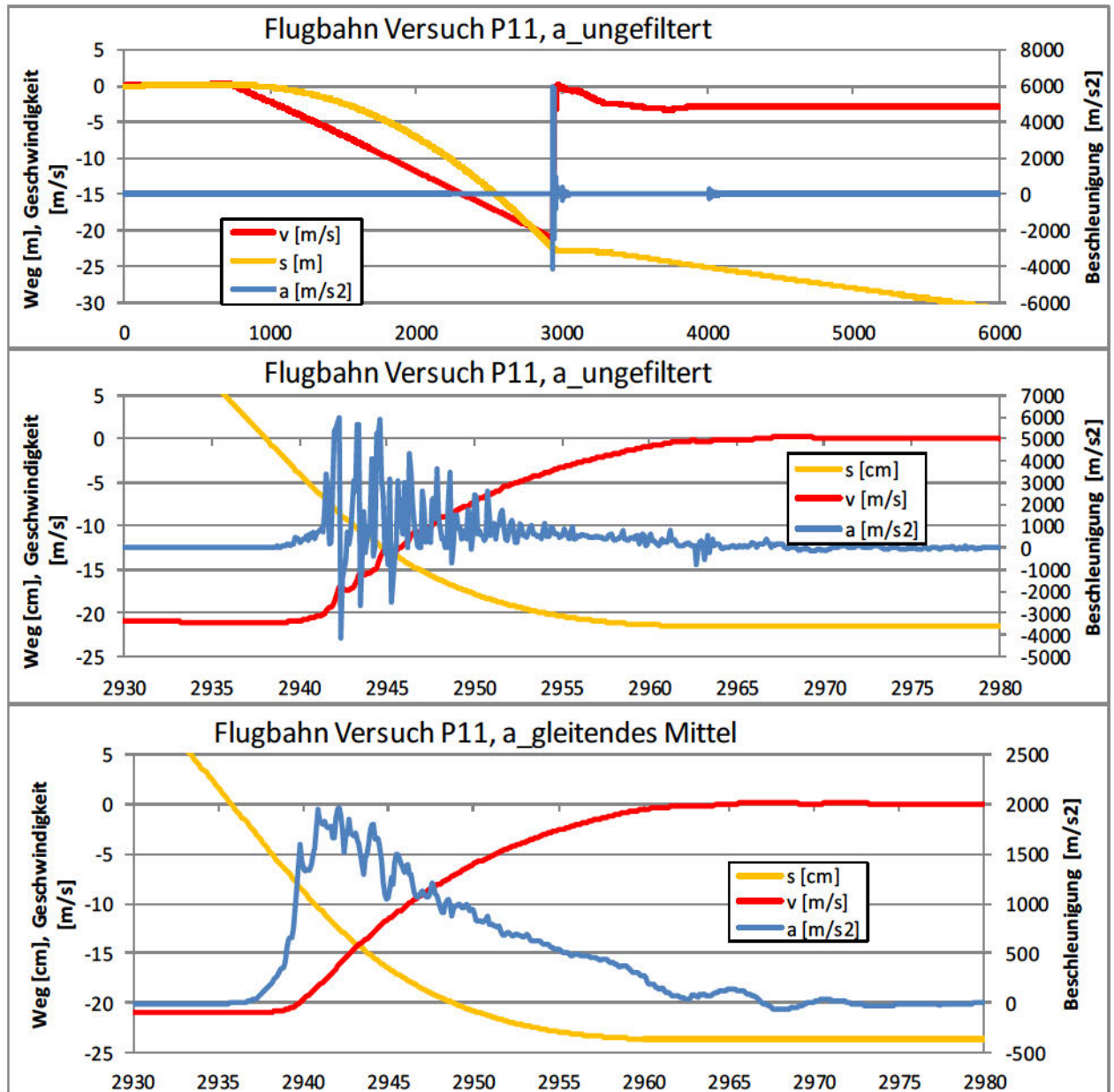


Abbildung 39: Kinetik über die Zeit in ms von Versuch P11: (oben) gesamter Versuch mit ungefilterten Beschleunigungsdaten, (mitte-unten) Detail Einschlag. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in m bzw. cm auf der linken Achse.

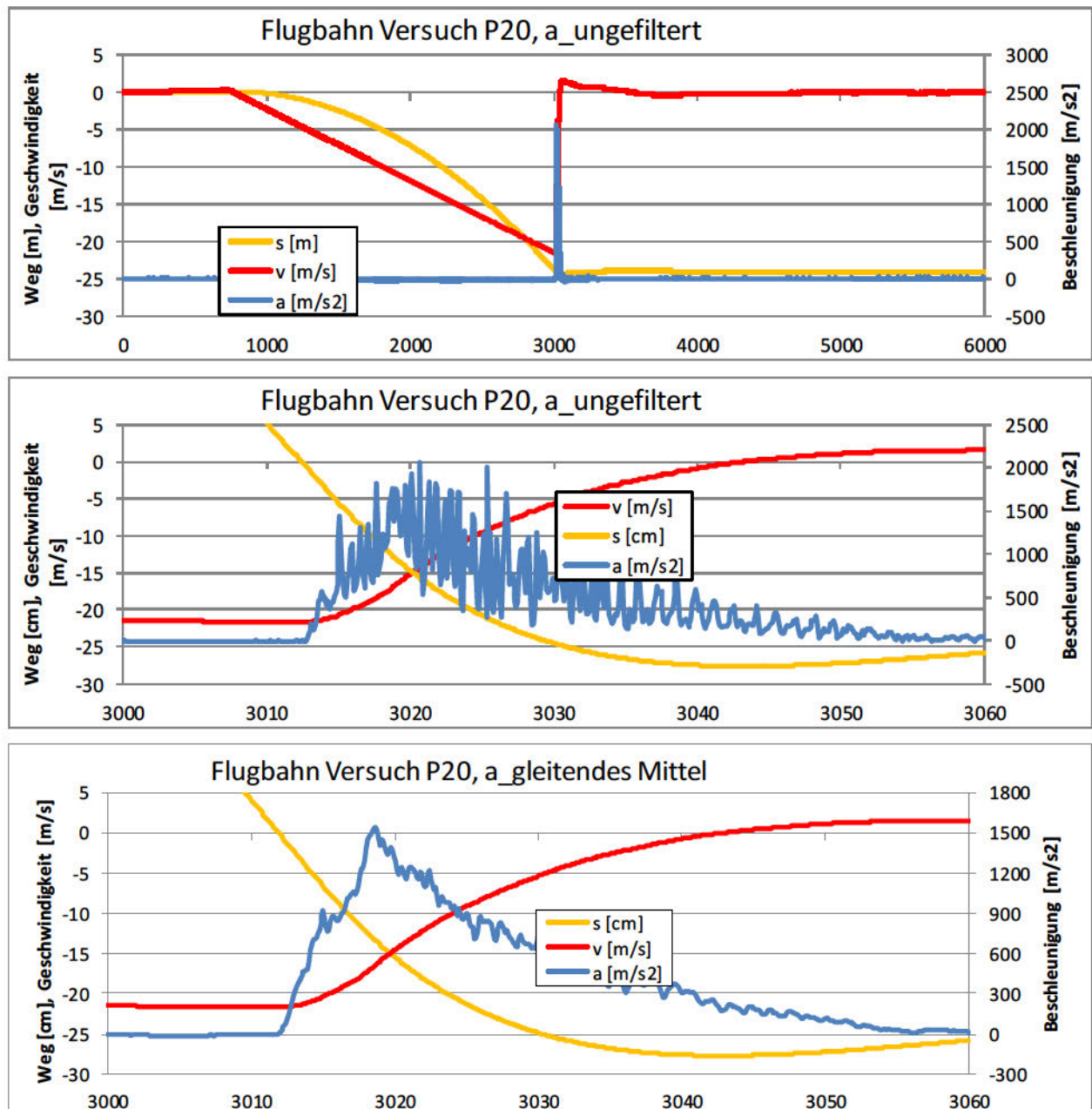


Abbildung 40: Kinetik über die Zeit in ms von Versuch P20: (oben) gesamter Versuch mit ungefilterten Beschleunigungsdaten, (mitte-unten) Detail Einschlag. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in m bzw. cm auf der linken Achse.



Die Bewegungskurve des Wurfkörpers in Versuch P30 kann während des Aufpralls mit den infolge des Seilstruppenaufpralls geglätteten Beschleunigungsdaten plausibel bestimmt werden.

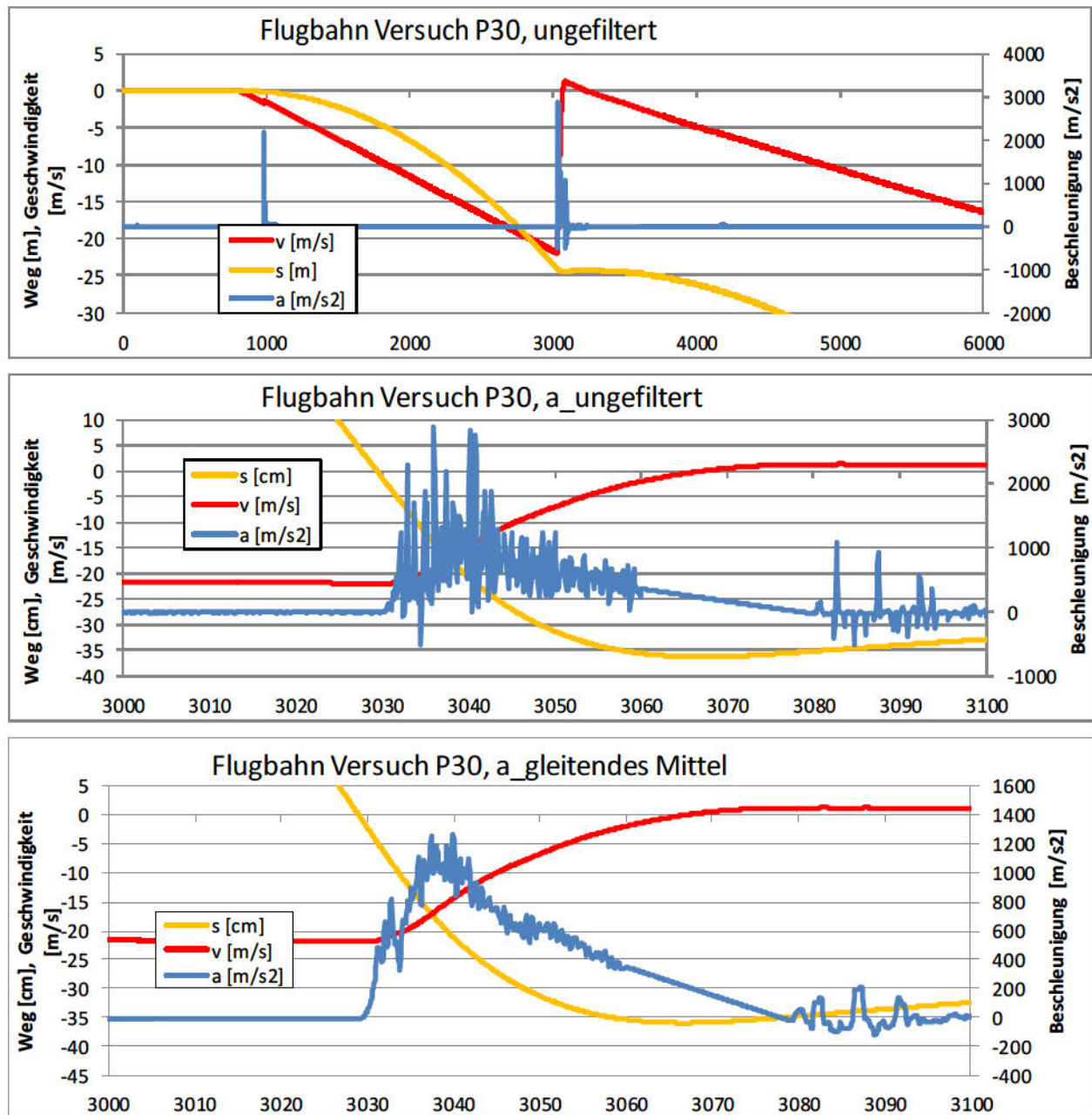


Abbildung 41: Kinetik über die Zeit in ms von Versuch P30: (oben) gesamter Versuch mit ungefilterten Beschleunigungsdaten, (mitte-unten) Detail Einschlag. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in m bzw. cm auf der linken Achse.

Die Bewegungskurve des Wurfkörpers in Versuch P31 kann während des Aufpralls nicht komplett bestimmt werden. Grund hierfür ist die Rotation des Wurfkörpers infolge der anfänglichen Schief-lage beim Aufprall.

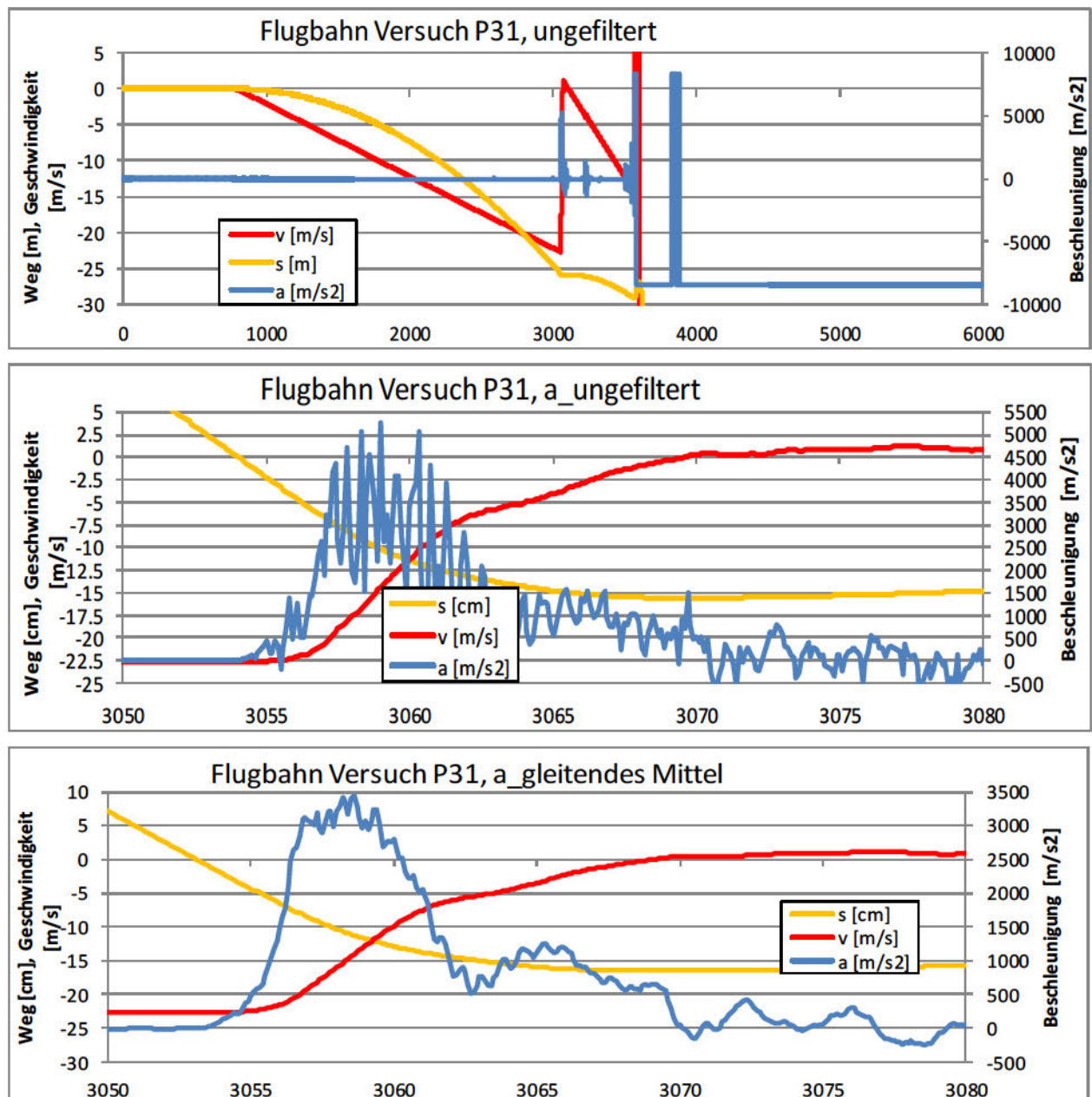


Abbildung 42: Kinetik über die Zeit in ms von Versuch P31: (oben) gesamter Versuch mit ungefilterten Beschleunigungsdaten, (mitte-unten) Detail Einschlag. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in m bzw. cm auf der linken Achse.

### 6.3 Integration der Beschleunigungsdaten am Galeriedach

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Kinetik des Galeriedaches im Bereich des jeweils montierten Beschleunigungssensors. Im Versuch P10 war die Belastung der Platte so gering, dass diese in der Grössenordnung des Sensorrauschen zu liegen kommt. Dadurch wirken die über die Zeit integrierten Kurven für Geschwindigkeitsverlauf und Durchbiegung sehr unruhig.

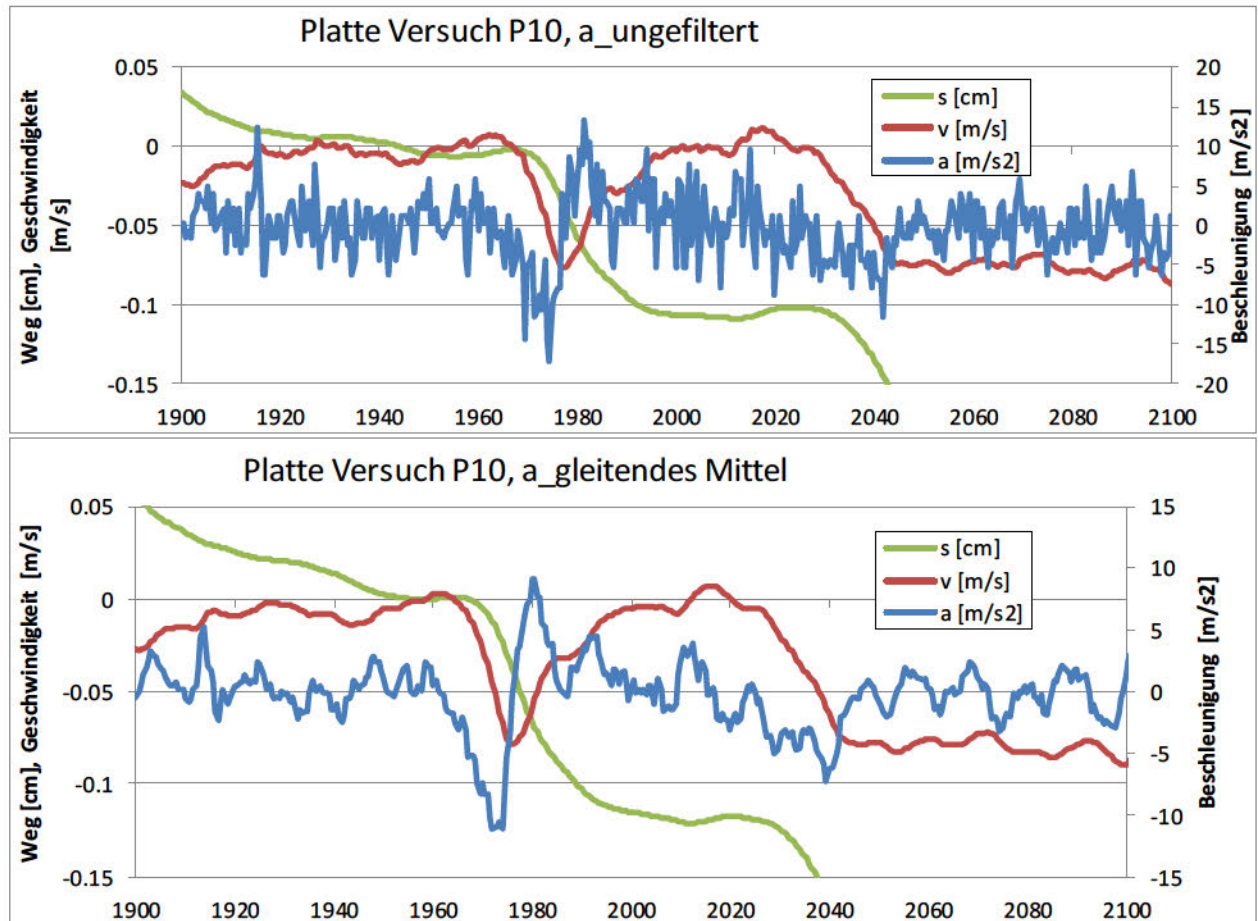


Abbildung 43: Kinetik der Galerieplatte über die Zeit in ms von Versuch P10: mit Basis (oben) ungefilterten Beschleunigungen, (unten) gleitendem Mittel der Beschleunigungen. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in cm auf der linken Achse.



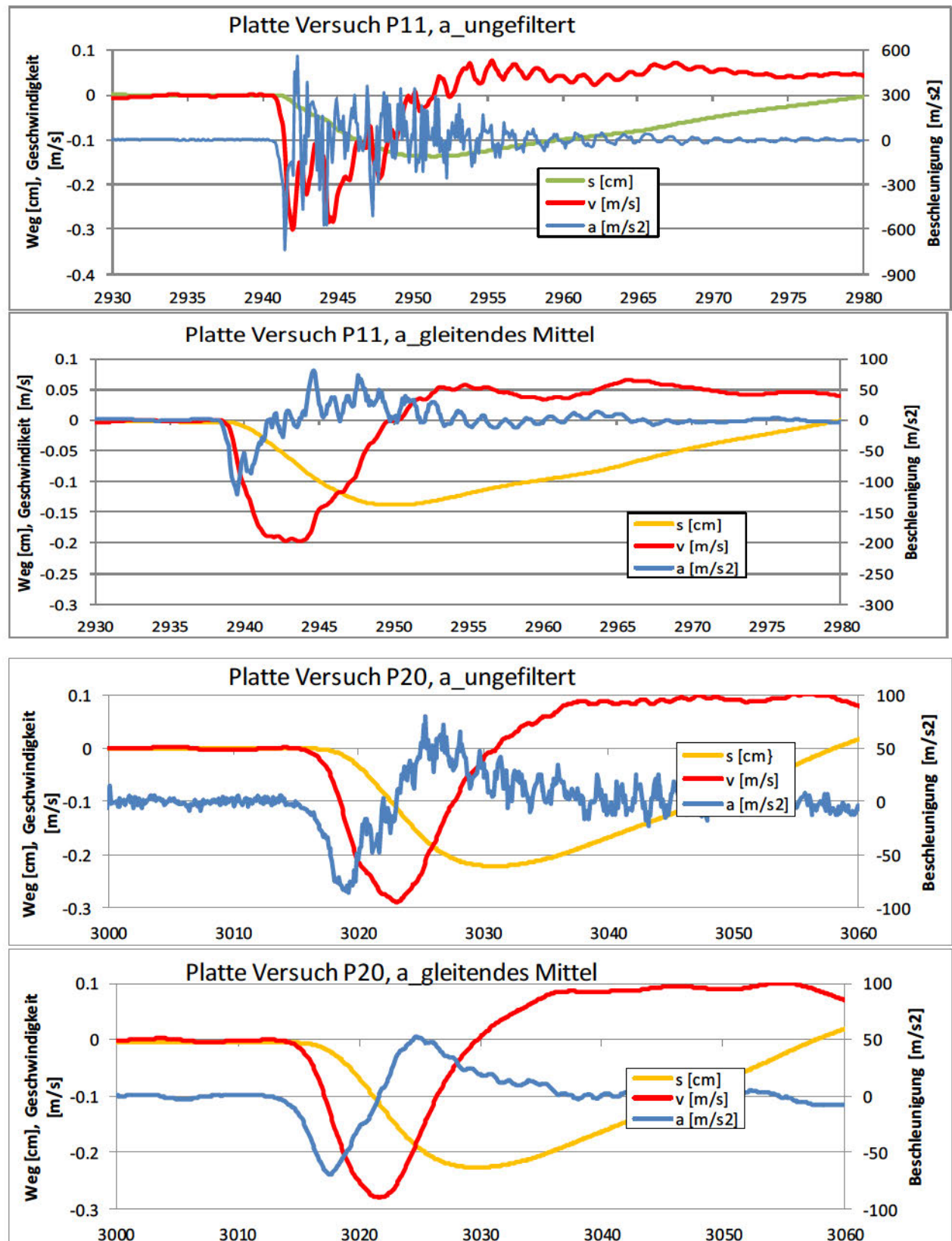


Abbildung 44: Kinetik der Galerieplatte über die Zeit in ms der Versuche P11 & P20: mit Basis (oben) ungefilterten Beschleunigungen, (unten) gleitendem Mittel der Beschleunigungen. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in cm auf der linken Achse.

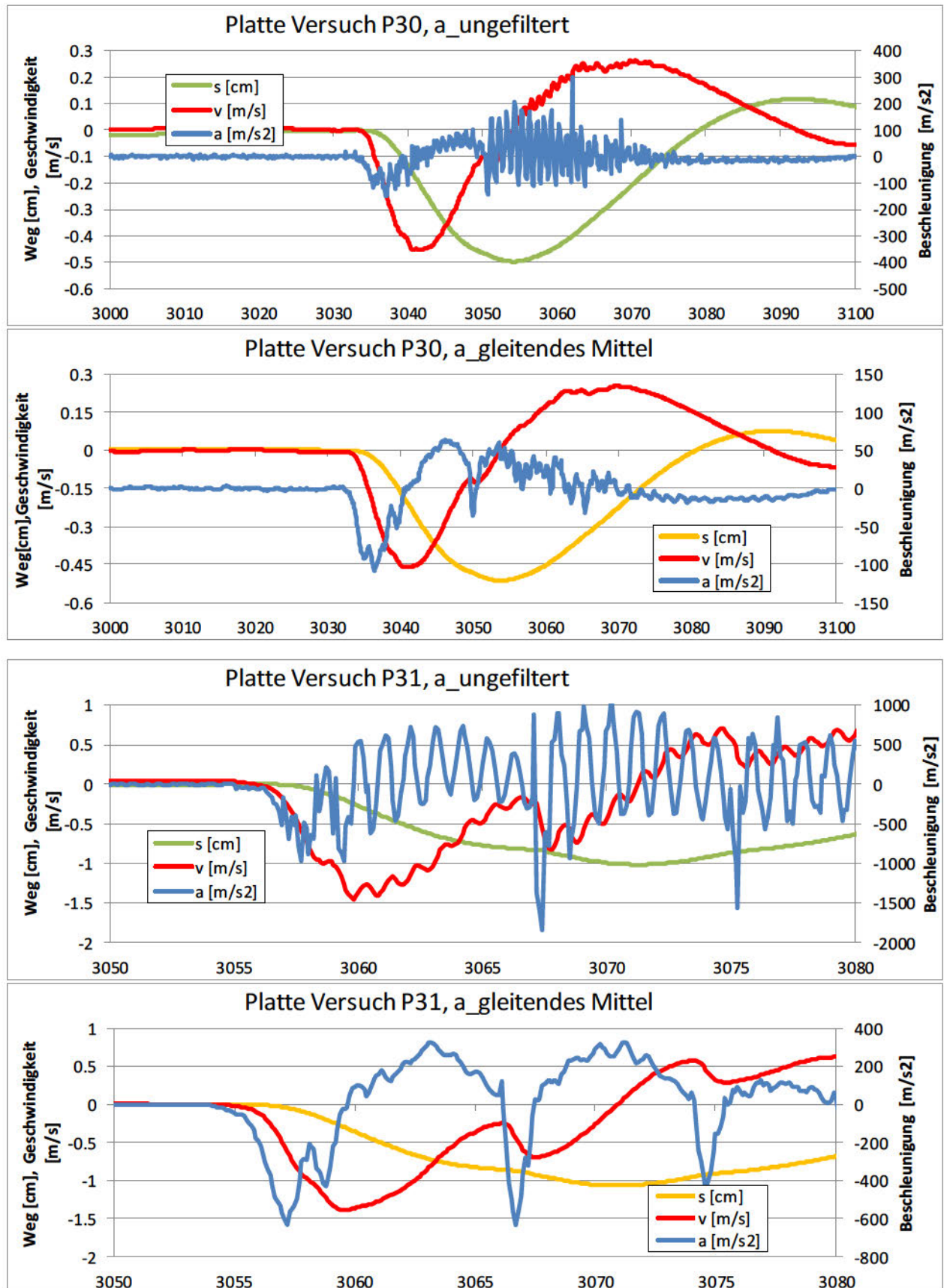


Abbildung 45: Kinetik der Galerieplatte über die Zeit in ms der Versuch P30 & P31: mit Basis (oben) ungefilterten Beschleunigungen, (unten) gleitendem Mittel der Beschleunigungen. Die Beschleunigungen auf der rechten Achse, Geschwindigkeit in m/s und Weg in cm auf der linken Achse.



## 6.4 Videoaufzeichnungen

Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsvideos ergibt die Weg-Zeit-Kurven der fallenden Wurfkörper mit der Wegeinheit „Pixel“ bzw. „Bildpunkte“. Diese Pixel können in Meter umgerechnet werden. Hierfür wurden die Vorderseiten der und die Aufdrucke auf den Wurfkörper/n sowohl in der Realität [m] als auch im Video [px] gemessen. Aus mehreren solchen Messungen konnte dann ein gemittelter Bildmassstab für die Bildebene „Vorderseite Wurfkörper“ ermittelt werden.

Tabelle 12: Bildmassstäbe der Videoaufzeichnungen.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Bildmassstab	px/m	274.69	221.44	169.41	151.04	141.28

Die Verschiebungen der einzelnen verfolgten Bildpunkte werden für jeden Zeitschritt gemittelt und damit erhält man die Bewegungskurve des Wurfkörpers über die Zeit.

## 6.5 Ableitung der Videobewegungskurven

Basierend auf den Bewegungskurven und den obigen Bildmassstäben lassen sich die Geschwindigkeitsverläufe und Beschleunigungen der Wurfkörper mittels einfacher bzw. doppelter Ableitung nach der Zeit bestimmen. Im Vergleich zur Beschleunigungsmessung unterliegen die Videoauswertungen jedoch grösseren Ungenauigkeiten. Zum Beispiel bewegt sich der Wurfkörper zum Zeitpunkt der Umkehrung der Bewegungsrichtung beim Aufprall kaum, ist also im Video praktisch stillstehend und liefert somit falsche Beschleunigungswerte. Zum anderen verwehrt das aufgeworfene Deckmaterial die Sicht auf den Wurfkörper und erschwert dessen Erfassung für die Videoauswertung. Die Videoaufnahmen wurden durch den Einschlag auf das Dach nicht verwickelt, obwohl der Stoss am Boden auch im Bereich der Kamera deutlich spürbar war.

Für die Ableitung nach der Zeit wurden die Wegkurven verschiedener Bildpunkte für jedes Kamerabild gemittelt. Die Differenzenbildung von Pixeln bzw. Bildpositionen und der Zeit erfolgte zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung jeweils immer über zwei Zeitschritte bzw. Bilder. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die gewonnenen Bewegungskurven für den Versuch P30. Der Weg- und Geschwindigkeitsverlauf wird zusätzlich noch durch eine Regressionsparabel bzw. –gerade angegeben. Diese dienen zur Überprüfung der Güte der Auswertung sowie zur späteren Angabe der Einschlaggeschwindigkeit.



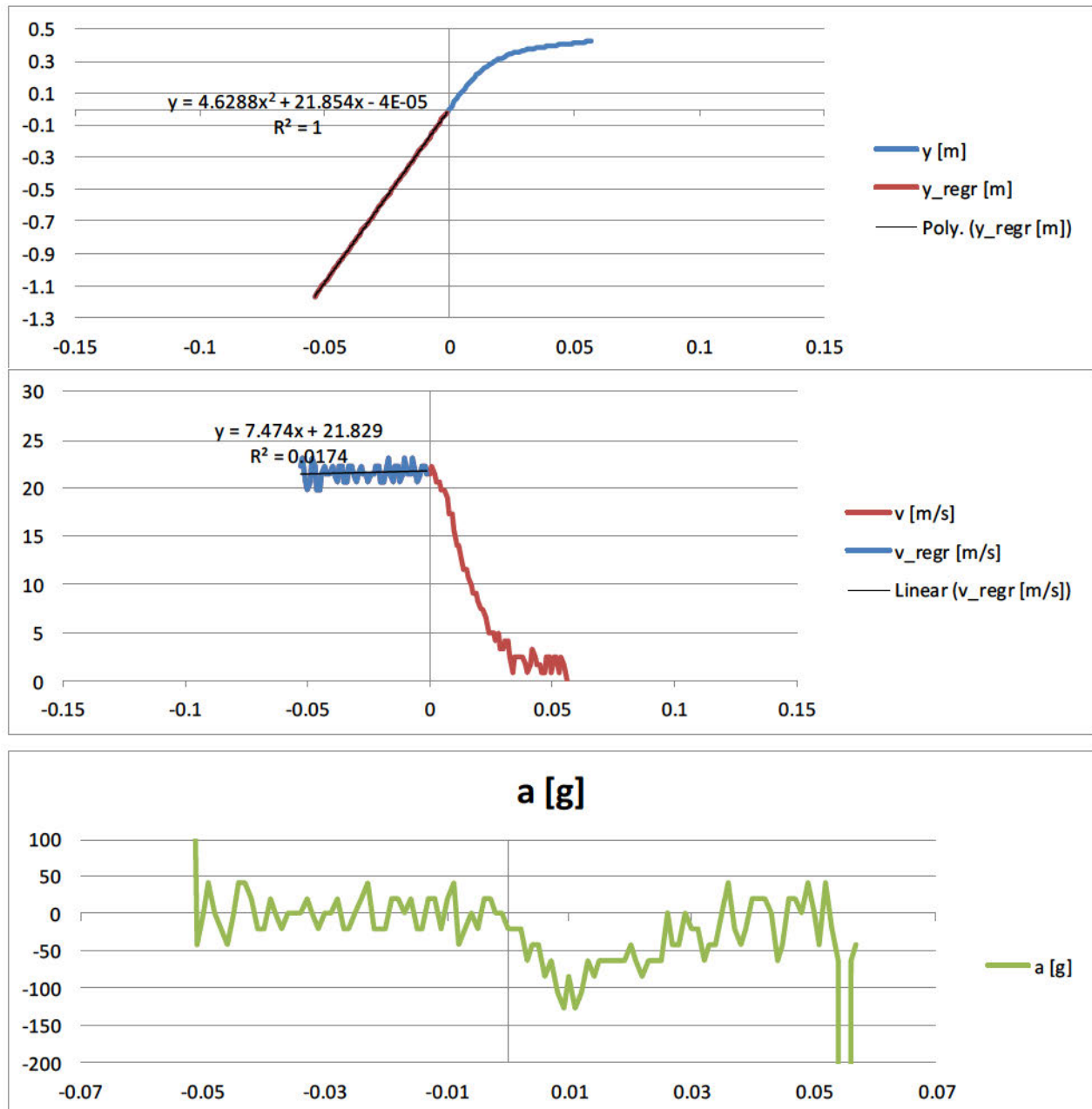


Abbildung 46: Kinetik über die Zeit in Sekunden von Versuch P31: (oben) Wegkurve mit Regressionsparabel, (mitte) Geschwindigkeitsverlauf mit Regressionsgerade und (unten) Beschleunigungsverlauf.

In Abb. 46 wird die ermittelte Wegkurve vor dem Einschlag zusätzlich durch eine Ausgleichsparabel beschrieben. Im Falle eines freien Falls müsste der quadratische Term gleich  $4.905 = \frac{1}{2}g$  sein. D.h., die in Tabelle 12 angegebenen Bildmassstäbe liessen sich unter Umständen noch verbessern, vorausgesetzt, es wurden während des freien Falls genügend Bilder mit guter Auflösung aufgezeichnet. Ist die Einschlaggeschwindigkeit zu hoch und das aufgezeichnete Intervall vor dem Einschlag ist zu kurz, ist die quadratische Regression wie hier kein zuverlässiger Indikator für den perfekten Bildmassstab.

## 6.6 Vergleich der Messungen

Sowohl die Beschleunigungsmessungen als auch die Videoaufzeichnungen liefern die Weg- und Geschwindigkeitskurven über die Zeit. Die Güte der einzelnen Messungen lässt sich dadurch direkt vergleichen und evaluieren. Die nachfolgenden Abbildungen vergleichen die durch zweimalige Integration über die Zeit gewonnene Wegkurven eines jeden Versuchs mit derjenigen, welche direkt jeweils aus den Videoaufzeichnungen gewonnen wurden. Für einen besseren Vergleich, wurden die Kurven der Beschleunigungsmessung im Diagramm so verschoben, dass sie möglichst gut mit derjenigen der Videoaufzeichnung übereinstimmen. Die Verschiebungsparameter sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 13: Zeit- und Distanzabgleich der Wegkurven zum Vergleich von Beschleunigungs- und Videomessung.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Zeitversatz	s	-1.971	-2.94	-3.0165	-3.03	-3.054
Lageversatz	m	9.627	22.575	24.156	24.036	25.794
Geschwindigkeitsversatz	m/s	0	0	0	0	0

Auf Basis dieser Verschiebungen können nun die Geschwindigkeitsverläufe miteinander verglichen werden, welche einerseits aus der einmaligen Zeitintegration der Beschleunigungsmessung und andererseits aus der einmaligen Ableitung der Videowegkurve nach der Zeit gewonnen wurden. Eine weitere Justage zur Überlagerung der beiden Kurven wurde nicht durchgeführt.

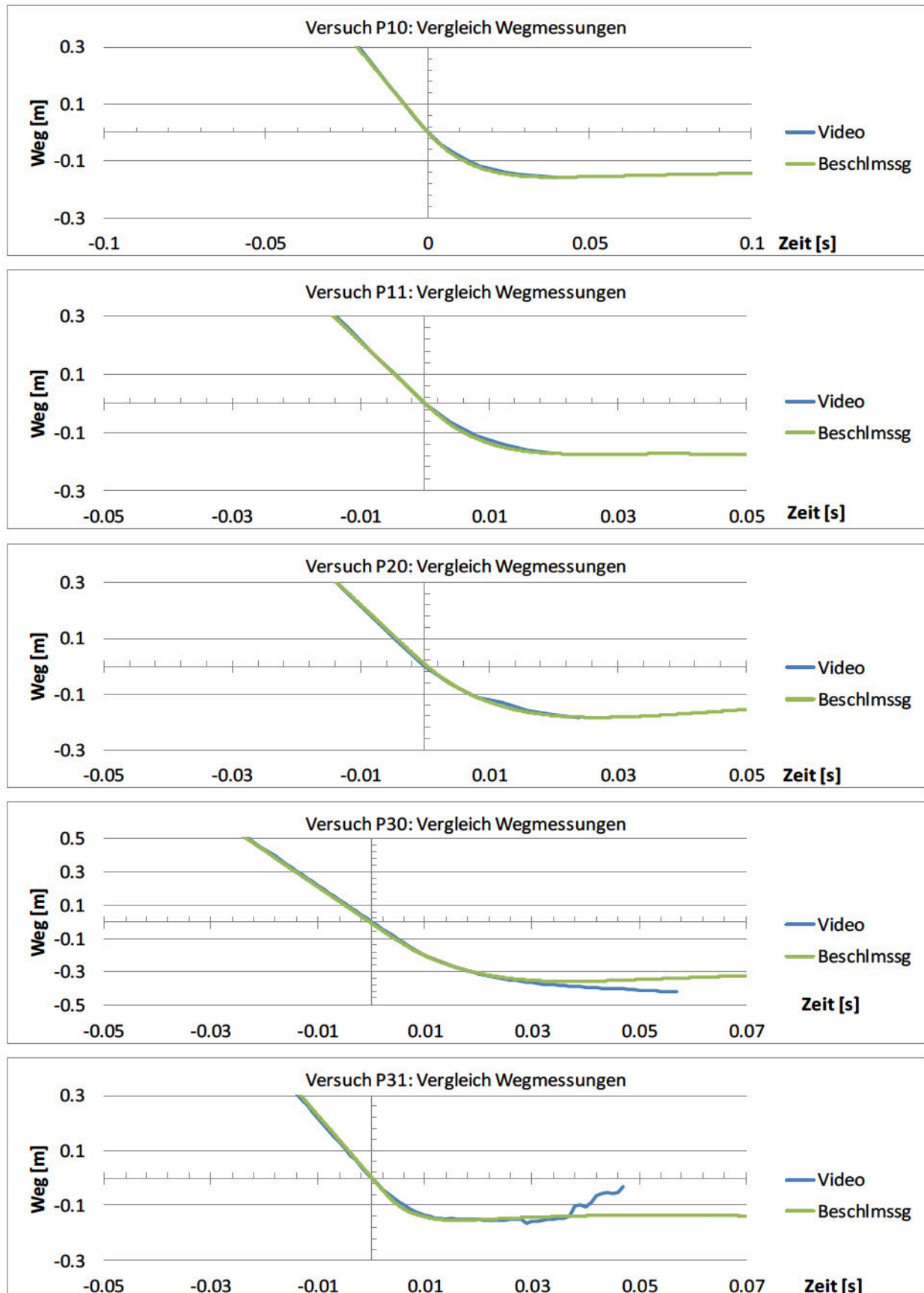


Abbildung 47: Vergleich der Wegkurven während des Aufpralls, gewonnen aus Beschleunigungsmessung und Auswertung der Videoaufnahmen.



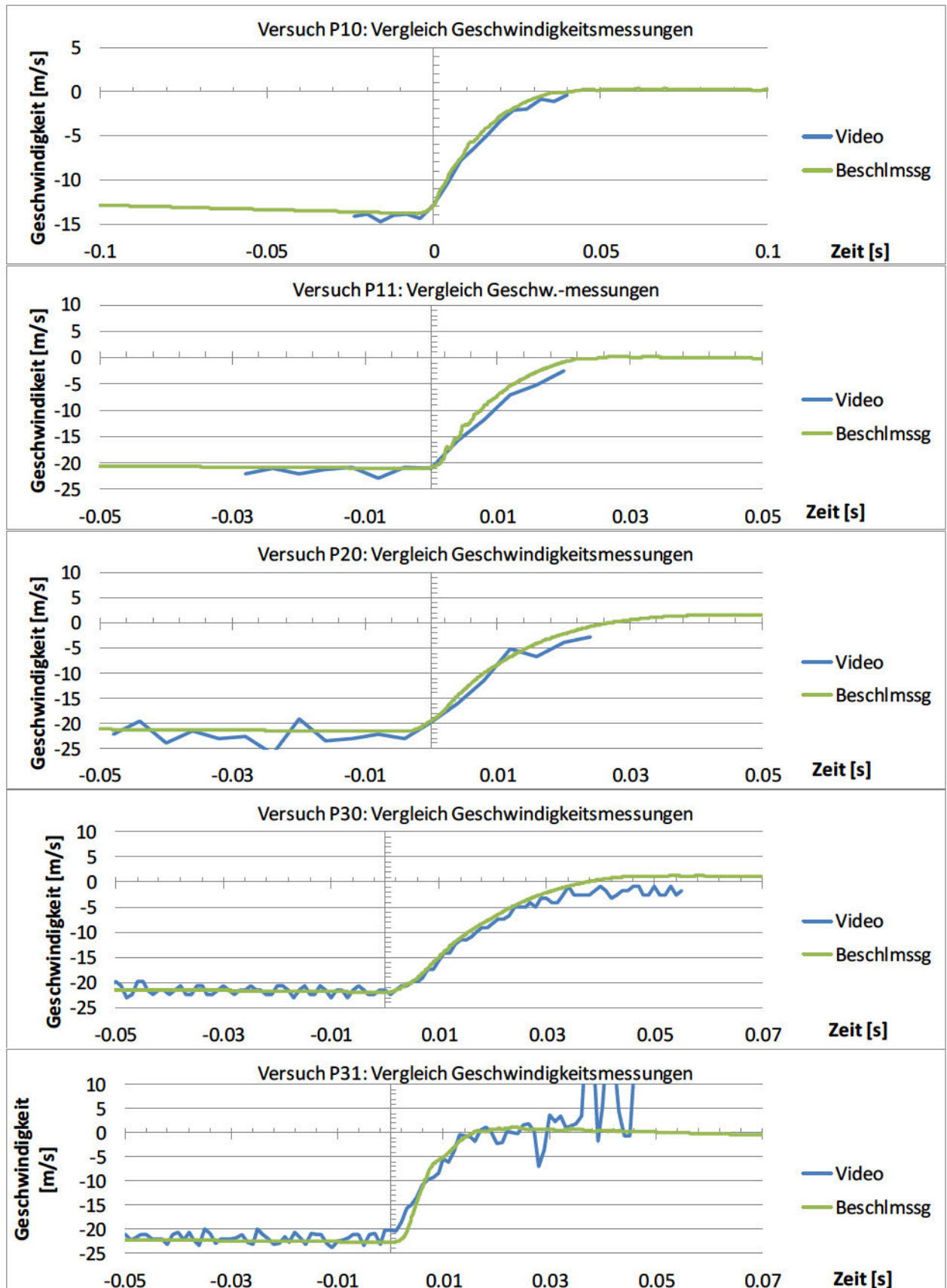


Abbildung 48: Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe während des Aufpralls, gewonnen aus Beschleunigungsmessung und Auswertung der Videoaufnahmen.

## 7 Abgeleitete Ergebnisse

### 7.1 Maximale Beschleunigungsspitzen

Die nachfolgende Tabelle zeigt die sich bei den verschiedenen Versuchen ergebenden maximalen Beschleunigungen.

Tabelle 14: Maximale Beschleunigungsspitzen während der Einschläge.

Test Nr.			P10	P11	P20	P30	P31
Maximale Beschleunigung der Wurfkörper	ungefiltert	$g (= 9.81 \text{ m/s}^2)$	207	608	210	295	536
	gleitendes Mittel	$g$	83	201	157	128	352
	Tiefpassfilter	$g$	73	260	156	116	340
	aus Video	$g$	68	133	160	112	192
Maximale Beschleunigung des Galeriedaches	Ungefiltert	$g$	-17	-75	-9	-16	-98
	gleitendes Mittel	$g$	-11	-12	-7	-12	-65
	Tiefpassfilter	$g$	-2	-26	-1	-12	-61

### 7.2 Fallzeiten

Mit Hilfe der Beschleunigungsmessung lassen sich die Zeitpunkte der Auslösung und des Einschlags auf rund eine halbe Millisekunde genau bestimmen.

Tabelle 15: Gemessene Fallzeiten aus Beschleunigungsmessung in den Wurfkörpern.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Fallzeit	s	1.4085	2.214	2.302	2.229	2.283

### 7.3 Fallhöhen

Die effektive Fallhöhe der Wurfkörper auf die Galerie wurde auf vier verschiedene Arten ermittelt. Direkt gemessen werden konnte sie mit Hilfe des eingesetzten Tachymeters. Des Weiteren wurde sie über die Fallzeit in Abhängigkeit der Erdbeschleunigung ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) ermittelt. In Fällen, in denen die Beschleunigungen gut über die Zeit integriert werden konnten, kann die Fallhöhe auch auf diesem Wege ermittelt werden. Zuletzt kann infolge des Freifalls auch aus der Einschlaggeschwindigkeit  $v$ , welche aus der Videomessung ermittelt wurde, via  $h = v^2 / 2g$  auf die Fallhöhe  $h$  geschlossen werden. Die verschiedenen Bestimmungen der Fallhöhen variieren im Mittel um  $\pm 40 \text{ cm}$ . Die letztendlich als relevant gewählte Fallhöhe wird auf 10 cm angegeben.

Tabelle 16: Gemessene und effektiv gewählte Fallhöhen.

Test Nr.			P10	P11	P20	P30	P31
Fallhöhe	geplant	m	10	25	25	25	25
	aus Fallzeit	m	9.73	24.04	25.99	24.37	25.57
	aus Beschleunigungsintegration	m	9.45	22.55	(24.21)	24.05	25.80
	aus Einschlaggeschwindigkeit	m	9.57	23.34	26.03	24.44	25.12
	aus Vermessung	m	9.89	24.2		24.46	
	gewählt	m	9.7	23.5	26.0	24.3	25.5

## 7.4 Einschlaggeschwindigkeit

Die Einschlaggeschwindigkeit der Wurfkörper auf die Galerie konnte auf drei verschiedene Arten ermittelt werden. Einerseits ergibt sie sich aus der gemessenen Fallzeit in Abhängigkeit der Erdbeschleunigung ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) über  $v = g \cdot t$ . Auch eine einmalige Integration der gemessenen Beschleunigungen über die Zeit liefert die Einschlaggeschwindigkeit, ebenso wie die zeitliche Ableitung der durch die Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichneten Wegkurve. Die Auswertung durch die Videoanalyse war aufgrund der Wetterbedingungen (Schnee) am Versuchstag und der Schräglage der Wurfkörper im freien Fall nur bedingt möglich.

Tabelle 17: Einschlaggeschwindigkeit der Wurfkörper.

Test Nr.			P10	P11	P20	P30	P31
Einschlaggeschwindigkeit	aus Fallzeit	m/s	-13.82	-21.72	-22.58	-21.87	-22.40
	aus Beschleunigungsintegration	m/s	-13.84	-21.0	-21.6	-21.9	-22.4
	aus Video	m/s	-13.7	-20.9/-21.4/-22.3	-22.6	-21.8	21.8
	gewählt	m/s	-13.8	-21.5	-22.6	-21.9	-22.1

## 7.5 Abbremszeiten

Die Abbremszeiten wurden mit Hilfe der Beschleunigungsmessung und der daraus resultierenden Weg- und Geschwindigkeitsverläufe bestimmt. Sie beschreiben die Zeitdauer zwischen dem ersten Kontakt von Wurfkörper und Galeriedach bis zu dem Moment, wenn die Vertikalgeschwindigkeit  $v$  gleich Null wird.



Tabelle 18: Abbremszeiten &amp; Zeitpunkt der maximalen Verzögerung.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Bremszeit	s	0.0555	0.029	0.031	0.037	0.016
Zeitpunkt der maximalen Verzögerung	s	0.0155	0.005	0.009	0.007	0.005

## 7.6 Bremsweg und Endlage

Die Bremswege der Wurfkörper beim Einschlag bezeichnen die Distanz vom ersten Kontakt mit der Eindeckung bis zur maximalen Eindrückung. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Block und Galeriedach ist zu diesem Zeitpunkt dann null. Die Bremswege wurden sowohl mit Hilfe der Beschleunigungsmessung als auch mit Hilfe der Videoaufzeichnungen gewonnen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die erhaltenen Resultate. Die Abweichung der beiden Messungen zueinander beträgt zwischen 1 cm und bis zu 8 cm.

Die Tabelle beschreibt des Weiteren die Position der Wurfkörper nach Abschluss der Versuche bezogen auf das jeweils ursprüngliche Niveau der Deckschicht. Die Dicke der Eindeckung wurde vor den Versuchen mit Hilfe des Schreitbaggers auf etwa 40 cm eingestellt. Beim Versuch P11 bezieht sich die Endlage auf das Eindeckungsniveau von vor Versuch P10. Einen Widerspruch gibt es beim Versuch P20, bei welchem die Endlage fast das Doppelte des Bremsweges betrifft. Dieser Diskrepanz ist bisher noch nicht erklärt.

Tabelle 19: Bremswege und Eindrückungen.

Test Nr.			P10	P11	(P20)	P30	P31
Bremsweg	aus Beschleunigungsintegration	m	0.24	0.23	0.28	0.36	0.16
	aus Video	m	0.16	0.19	0.20	0.42	0.17
Eindrückung / Endlage	aus Feldmessung	m	-0.2	-0.4	-0.37		
	aus Vermessung	m	-0.19	-0.24	-0.35	-0.3	

## 7.7 Rücksprung

Ein deutlicher Rücksprung des Wurfkörpers, welcher auf eine elastische Reaktion von Eindeckung und Galeriedach Rückschlüsse erlauben würde, konnte anhand der Videoaufzeichnungen nicht erkannt werden. Die Auswertung der Beschleunigungsmessung am Wurfkörper ergab

jeweils Richtgrößen für Rücksprunghöhe und maximale Rücksprunggeschwindigkeit. Betrachtet man jedoch die Videoaufzeichnungen, so erscheinen diese Rücksprünge auch nur als ein Resultat der Blockrotation, welche sich ergibt, weil sich die Blockunterseite beim Aufprall nicht planparallel zur Aufpralloberfläche befand.

*Tabelle 20: Rücksprung der Wurfkörper nach dem Aufprall.*

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Rücksprunghöhe	m	0.02	0.02	0.2	0.1	0.02
Rücksprunggeschwindigkeit	m/s	0.3	0.2	1.60	1.3	1.20

## **7.8 Rotation**

Auf Grund der leicht exzentrischen Aufhängung der Wurfkörper an der Seilstruppe, trafen diese nicht planparallel auf die Deckschicht bzw. das Galeriedach auf, sondern eine Ecke der Wurfkörperunterseite bekam zuerst Kontakt mit der Aufprallfläche und versetzte den Wurfkörper jeweils in eine Rotation. Die Rotation selbst wurde während der Versuche nicht gemessen, sondern war im Wesentlichen nur aus den Videoaufzeichnungen erkennbar. Die Einschläge in das Deckmaterial waren weich genug, dass diese Rotation im Moment des Abbremsens wieder gestoppt wurde. Allein bei Versuch P31 war sie so gross, dass der Wurfkörper nach dem Erstaufprall in der Luft um 180° gedreht wurde. Die Stärke der Rotation begründet sich darin, dass beim Versuch P31 keine Eindeckung mehr auf dem Galeriedach vorhanden war und somit der Aufschlag der ersten Wurfkörperecke auf das Betondach sehr stark ausfiel und so die Rotation stärker ausprägte. Die 180°-Rotation war ungefähr nach 0.422s abgeschlossen (geschätzt aus dem Signal der Beschleunigungsmessung). Die Rotationsgeschwindigkeit betrug damit ungefähr  $\omega = 426^\circ/\text{s}$  bzw.  $7.4\text{rad/s}$ . Das Massenträgheitsmoment  $J$  des Wurfkörpers 3200 wurde im Rahmen dieses Berichts abgeschätzt, dass es ungefähr zwischen demjenigen eines Würfels ( $J = 1/6ma^2 = 592\text{ kgm}^2$ ) und demjenigen einer Kugel ( $J = 2/5mr^2 = 394\text{ kgm}^2$ ) zu liegen kommt. Aus der Drehgeschwindigkeit und dem Massenträgheitsmoment ergibt sich damit eine in der Rotation gespeicherte Energie von  $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \omega^2 = 10.8 - 16.2\text{ kJ}$ . Dies entspricht also bis zu 2 % der Einschlagenergie.

## **7.9 Eindeckung**

Vor und nach den Versuchen wurde die Elastizität der Eindeckung mit Hilfe eines leichten Fallgewichtgeräts ermittelt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die bei diesen Werten gewonnenen Daten. Bei einer Fallhöhe von 25 m zeigten sich bei den Versuchen P20 und P30 deutliche



Einschlagkrater. Die Tabelle zeigt deren Durchmesser und schätzt das Volumen des ausgeworfenen Materials. Der Materialauswurf der Eindeckung infolge des Einschlags des Wurfkörpers flog horizontal geschätzt weiter als 15 m.

Tabelle 21: Gemessene Werte der Eindeckung.

Test Nr.			P10	P11	P20	P30	P31
Bodenhärte	vor	MN/m <sup>2</sup>	6.7 - 12.4	16.3 - 23.5	10.7	5.0 - 13.4	
	nach	MN/m <sup>2</sup>	16.3 - 23.5	27.0	38.8		
Einschlagkrater	Durchmesser	m			1.9	2.8	
Materialauswurf		m <sup>3</sup>			0.3	0.8	

### 7.10 Einschlagenergien und -impulse

Die Einschlagenergie der Wurfkörper kann entweder aus der ermittelten Fallhöhe oder der Einschlaggeschwindigkeit bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle stellt die Ergebnisse der zwei Ansätze einander gegenüber. Die ermittelten Energien unterscheiden sich im Allgemeinen nicht - ausser um 2% bei Versuch P31. Die Impulse der Wurfkörper im Moment des Einschlags ermitteln sich aus deren Einschlaggeschwindigkeit.

Tabelle 22: Kinetische Energie der Wurfkörper beim Einschlag.

Test Nr.				P10	P11	P20	P30	P31
Kinetische Energie	aus Geschwindigkeit		kJ	76	185	406	777	791
	aus Fallhöhe		kJ	76	185	406	773	810
	Gewählt		kJ	76	185	406	775	801
Impuls			kNs	-11	-17	-36	-71	-72

### 7.11 Reaktion der Betonplatte

Die Betonplatte des Galeriedaches wurde bei jedem Test spürbar erschüttert. Beschleunigungsspitzen konnten jeweils gemessen werden und die Zeitintegration der Beschleunigungsmessung lieferte kleine Verformungen (siehe untenstehende Tabelle). Schäden konnten in den Versuchen P10 bis P30 keine festgestellt werden. Im Versuch P31 gab es kleine Abplatzungen des Betons auf der Unterseite des Galeriedaches und es bildeten sich Risse, welche ungefähr sternförmig



zur Einschlagstelle verlaufen. Diese Schäden werden in den nachfolgenden Abbildungen gezeigt. Die Abplatzungen hatten eine Grösse von ungefähr bis zu 15 x 5 cm. Die Zeitintegration der Beschleunigungsmessungen liefert eine maximale Geschwindigkeit der Betonplatte im Bereich des dortigen Beschleunigungssensor wie in den nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 23: Bewegung des Galeriedaches.

Test Nr.		P10	P11	P20	P30	P31
Maximale Plattengeschwindigkeit	m/s	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-1.42
Maximale Durchbiegung	mm	-1	-1	-2	-5	-11



Abbildung 49: Abplatzungen infolge Versuch P31.



Abbildung 50: Rissbild an Unterseite des Galeriedachs infolge Versuch P31 (schwarz = vor dem Versuch, rot = nach dem Versuch).

## 7.12 Bremswirkung der Galerieverbauung

Anhand der Verzögerung des Wurfkörpers beim Einschlag und seiner Masse lässt sich die effektiv auf den Wurfkörper wirkende Bremskraft über die Zeit ermitteln. Die vorhandene dynamische Beschleunigung wird dabei noch um ein  $g$  erhöht, um das Eigengewicht korrekt mit zu berücksichtigen. Da auch die Wegkurve des Wurfkörpers über die Zeit bekannt ist, kann die Bremskraft direkt über den Bremsweg aufgetragen werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen diesen Verlauf für die Versuche P10 – P31.

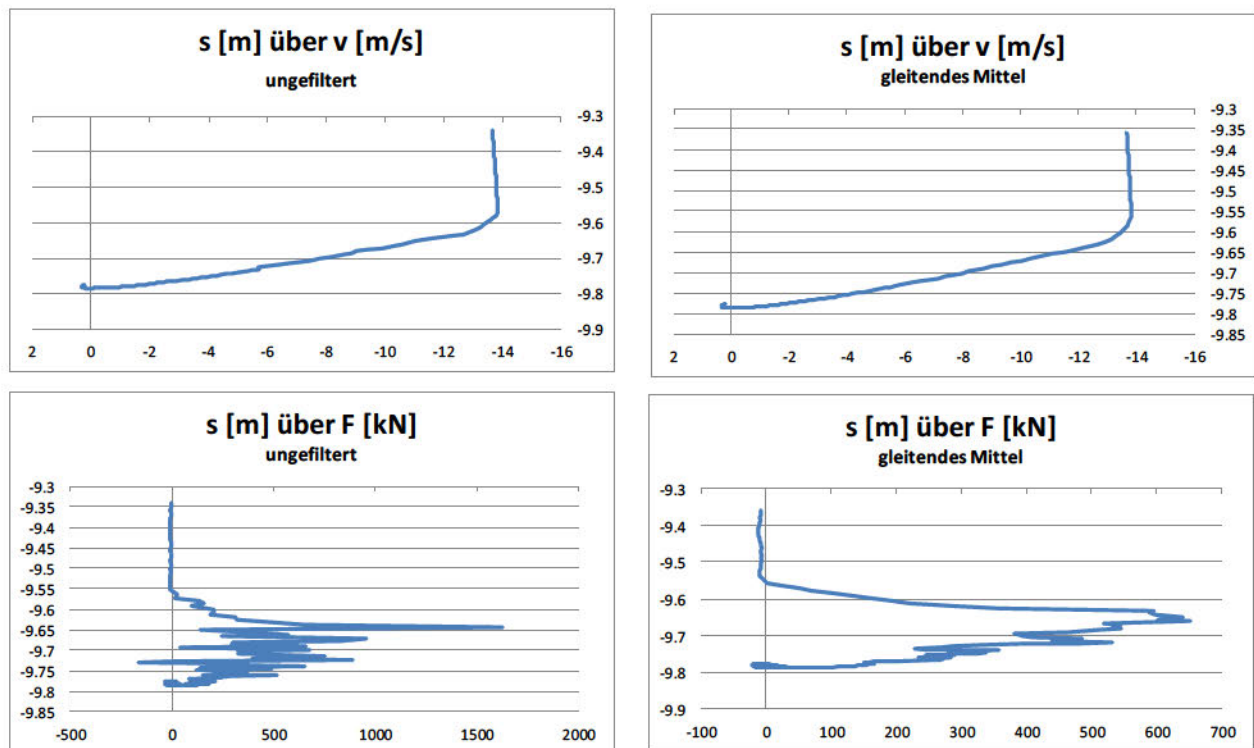


Abbildung 51: Geschwindigkeits- und Bremskraftverlauf während Versuch P10.



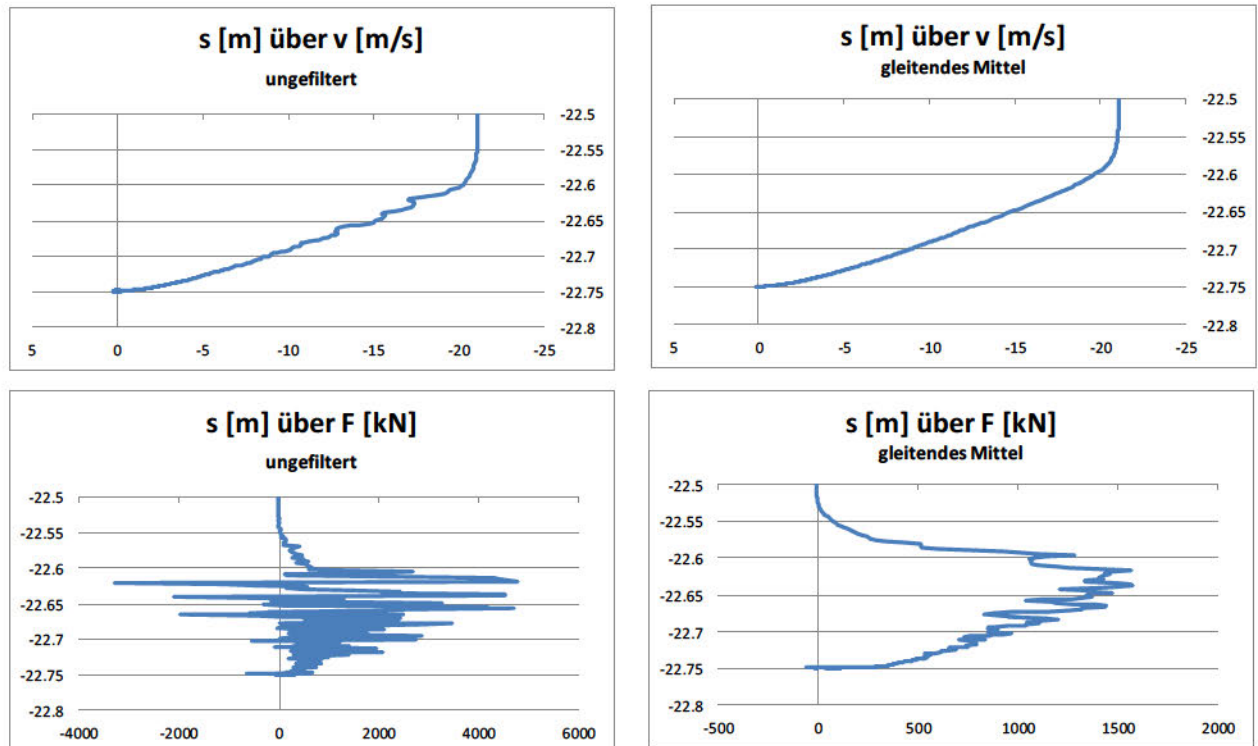


Abbildung 52: Geschwindigkeits- und Bremskraftverlauf während Versuch P11.

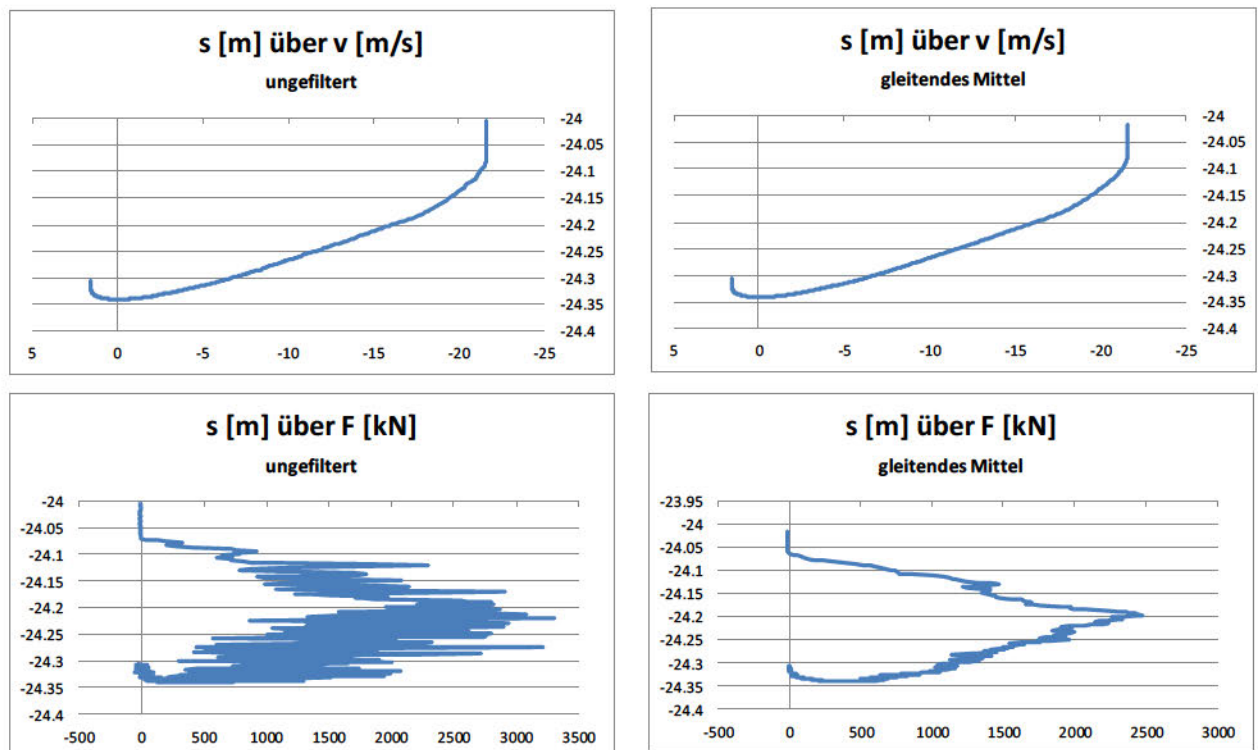


Abbildung 53: Geschwindigkeits- und Bremskraftverlauf während Versuch P20.

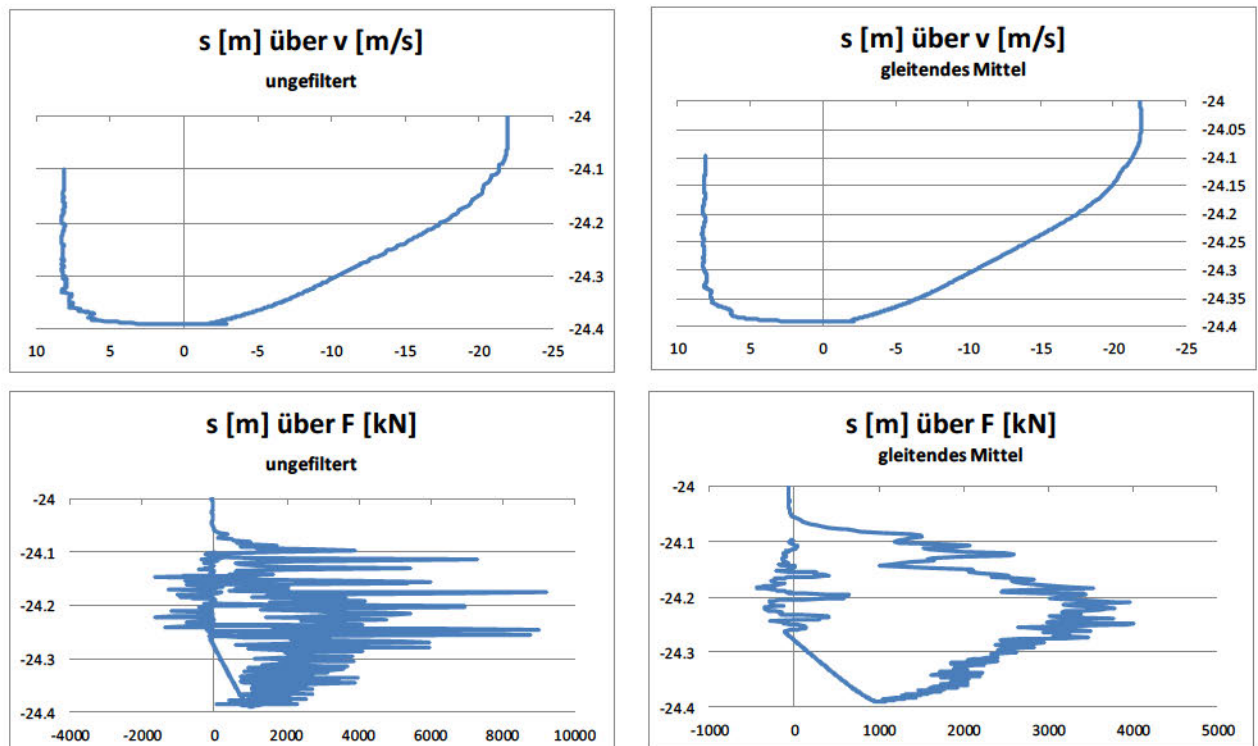


Abbildung 54: Geschwindigkeits- und Bremskraftverlauf während Versuch P30.

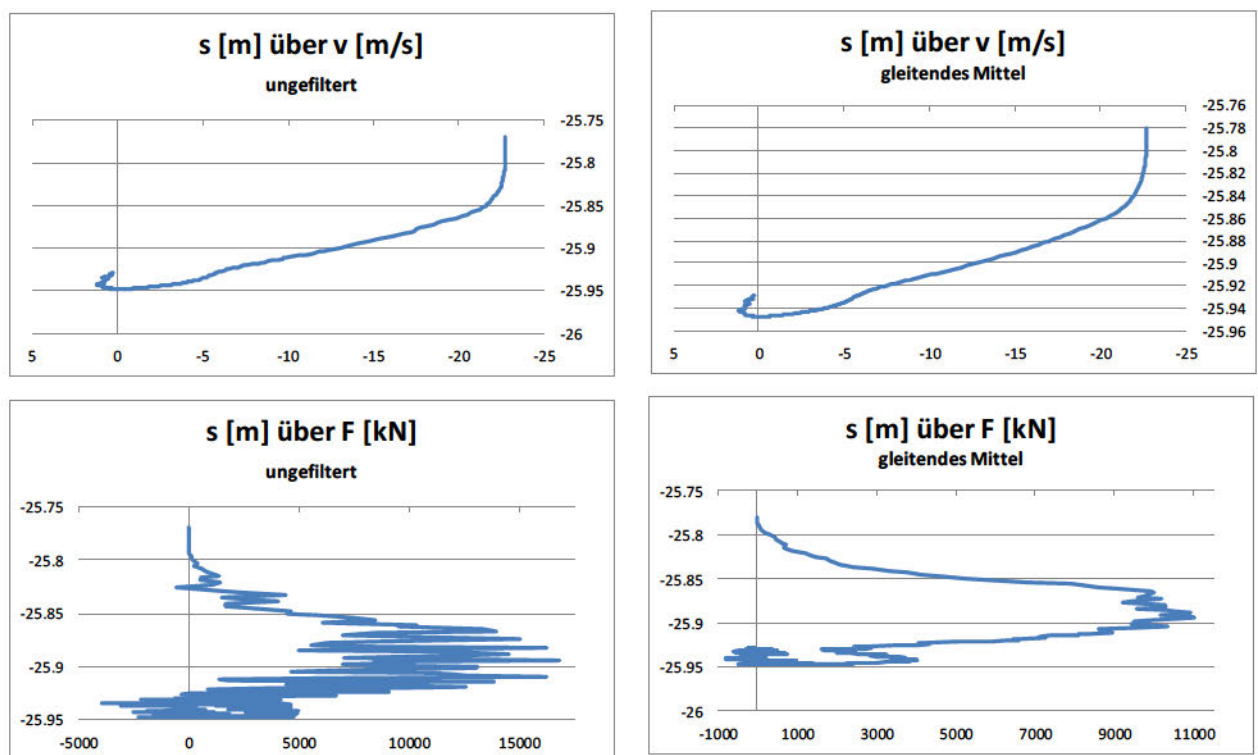


Abbildung 55: Geschwindigkeits- und Bremskraftverlauf während Versuch P31.

## 8 Analytisches Modell

Schellenberg 2008<sup>3</sup> präsentiert ein Verfahren, mit welchem sich Verlauf, maximale Bremskräfte und die Reaktion der Schutzgalerie bestimmen lassen. Kern der vorgestellten Anwendung ist eine explizite Zeitintegration zur Ermittlung des Abbremsprozesses mit Hilfe eines mehrteiligen Masse-Feder-Modells. Insgesamt drei Massenpunkte stehen für Wurfkörper, Eindeckung und Galeriedach. Federelemente zwischen diesen Massen beschreiben die Interaktion zwischen den Massen.

### 8.1 Prognose Analytisches Modell

Im Anhang finden sich die Berechnungen, wie sie für die für durchgeführten Versuche gewonnen wurden. In diese Berechnungen flossen noch keine zusätzlichen in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse mit ein.

### 8.2 Vergleich mit Versuchsdaten

Obige Prognosen lassen sich mit den gemessenen Verzögerungen der Wurfkörper vergleichen. Die nachfolgende Tabelle stellt die Werte einander gegenüber.

---

<sup>3</sup> Schellenberg, K. (2008) On the design of rockfall protection galleries. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften AG



Tabelle 24: Vergleich einzelner Ergebnisse aus analytischem Modell und den Versuchen.

Test Nr.			P10	P11	P20	P30	P31
Zeit bis maximale Blockverzögerung	Modell	ms	12	7	15	20	8
	Versuch	ms	15	5	9	7	5
Einschlagdauer	Modell	ms	22	12	25	31	12
	Versuch	ms	56	27	43	47	16
Einschlaggeschwindigkeit	Modell	m/s	14.01	22.1	22.1	22.14	22.14
	Versuch	m/s	-13.8	-21.5	-22.6	-21.9	-22.1
Maximale Blockverzögerung	Modell	g	195	578	258	213	731
	Gemessen	g	207	608	210	295	536
	gefiltert	g	78	231	157	122	346
Bremsweg Wurfkörper	Modell	m	0.11	0.10	0.23	0.31	0.14
	Versuch	m	0.24	0.23	0.28	0.36	0.16
	(Video)	m	0.16	0.19	0.2	0.42	0.17
Maximale Plattenbeschleunigung	Modell	g	4.5	5.8	6.5	8.6	51
	gemessen	g	-17	-75	-9	-16	-98
	gefiltert	g	-6.5	-19	-4	-12	-63
Maximale Plattengeschwindigkeit	Modell	m/s	0.41	0.81	1.17	2.23	3.33
	Versuch	m/s	-0.1	-0.3	-0.3	-0.5	-1.4
Plattenverformung	Modell	mm	8	102	25	60	78
	Versuch	mm	-1	-1	-1	-5	-10

Für eine mögliche Verbindung zwischen Modell und Versuchsergebnissen zeigt die nachfolgende Abbildung die Beziehung zwischen den maximalen (nur kurzzeitigen) Beschleunigungsspitzen jeweils für die gemessenen und die geglätteten Beschleunigungsspitzen. Die Umrechnung von Modell auf Versuch könnte mit einem linearen Faktor erfolgen. Die gezeigten Regressionsgeraden ergeben einen Umrechnungsfaktor von der Modellprognose auf die maximal gemessenen

Spitzen von 1.4. Die Umrechnung der geglätteten Beschleunigungsmaxima würde mit einem Faktor von 2.4 erfolgen. Letztere Umrechnung hätte einen etwas besseren  $R^2$  Wert von 0.93 im Vergleich zu 0.83 bei den gemessenen Spitzen zur Folge. Diese Linearisierung ist nur begrenzt zu empfehlen, da die Anzahl der Messpunkte bei nur fünf Versuche nicht besonders hoch ist. So liessen sich zum Beispiel auch die geglätteten Beschleunigungsmaxima mit Hilfe einer Parabel annähern bei einen etwas höheren  $R^2$  von 0.94.

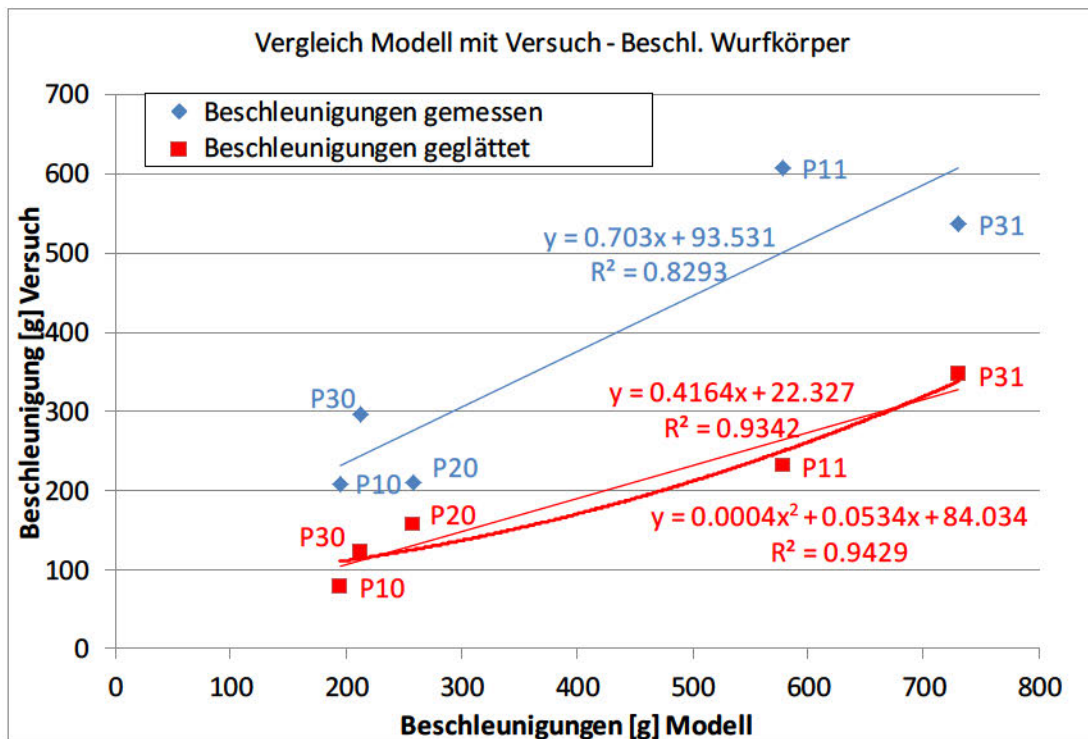


Abbildung 56: Korrelation zwischen maximalen Beschleunigungen im analytischen Modell und in den Versuchen.

## 9 Zusammenfassung und abschliessende Bemerkungen

Der vorliegende Versuchsbericht behandelt eine Serie von Steinschlagtests auf eine Lawinengalerieverbauung aus Stahlbeton. Zum Einsatz kamen annähernd würfelförmige Wurfkörper mit einer Masse zwischen 800 und 3200 kg. Insgesamt fünf Versuche wurden durchgeführt, wobei drei hiervon auf einen zuvor unbelasteten Bereich des Galeriedaches fielen. Zwei Blöcke erzeugten eine Folgebelastung auf dieselbe Stelle der Erstbelastung. Die eingebrachten kinetischen Energien lagen zwischen 76 und 810 kJ.

Der gewählte Versuchsaufbau hat sich als funktionsfähig und brauchbar erwiesen. Auch die notwendige Sicherheit war jederzeit gewährleistet. Limitierender Faktor für den Lasteintrag ist im Wesentlichen die Kapazität des eingesetzten Mobilkrans. Die Galerieverbauung zeigte sich als so widerstandsfähig, dass mit den aufgebrachten Energien keine grösseren Schäden erzeugt werden konnten. Eine Erhöhung der Energie wäre mit grösseren Fallhöhen und reduzierten Eindeckungsmächtigkeiten denkbar.

Die gewonnenen Daten waren von guter, d.h. analysier- und auswertbarer Qualität. Die Beschleunigung des Galeriedaches ist besser erfassbar, wenn dort (u.U. mehrere) Beschleunigungssensoren mit einem kleineren Messbereich als der aktuell verwendete (500g) eingesetzt werden. Ein zusätzlicher Rotationssensor am Wurfkörper würde im Falle der beobachteten Rotation mehr Informationen liefern, welche bei der Beschreibung des Abbremsprozesses Verwendung finden könnten. Auf der anderen Seite liessen sich diese Rotationen aber vermutlich vermeiden, wenn die Wurfkörper möglichst planparallel zur Aufprallfläche aufgehängt werden. Dies erfordert allenfalls neue/zusätzliche Aufhängepunkte an den Wurfkörpern.

Die bei den durchgeführten Versuchen gemachten Erfahrungen schufen neben den gewonnenen Daten auch die Grundlage für eine effiziente Vorbereitung anderer/ähnlicher Versuche mit Hilfe der erstellten entsprechenden Checklisten, Abläufe und einer umfangreichen Materialliste.



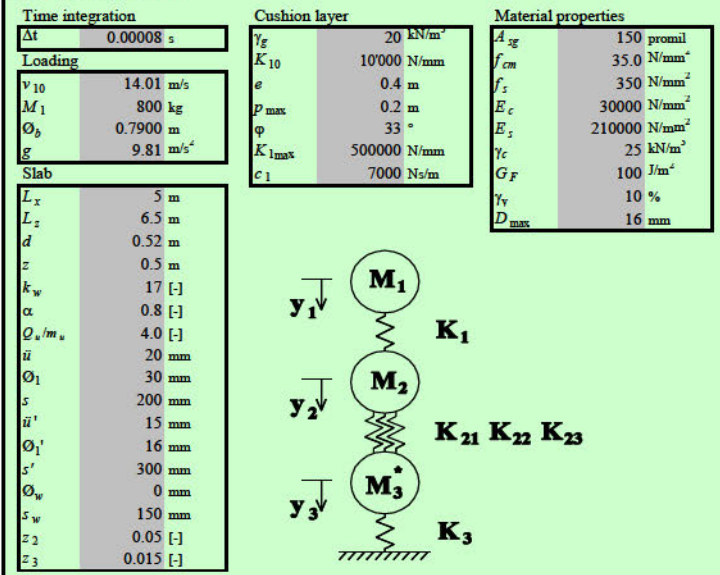
## **Anhang 1: Ergebnisse analytisches Modell**

## Analytical model (System of multiple degrees of freedom)

78512.0

Pardé P10

## INPUT PARAMETERS



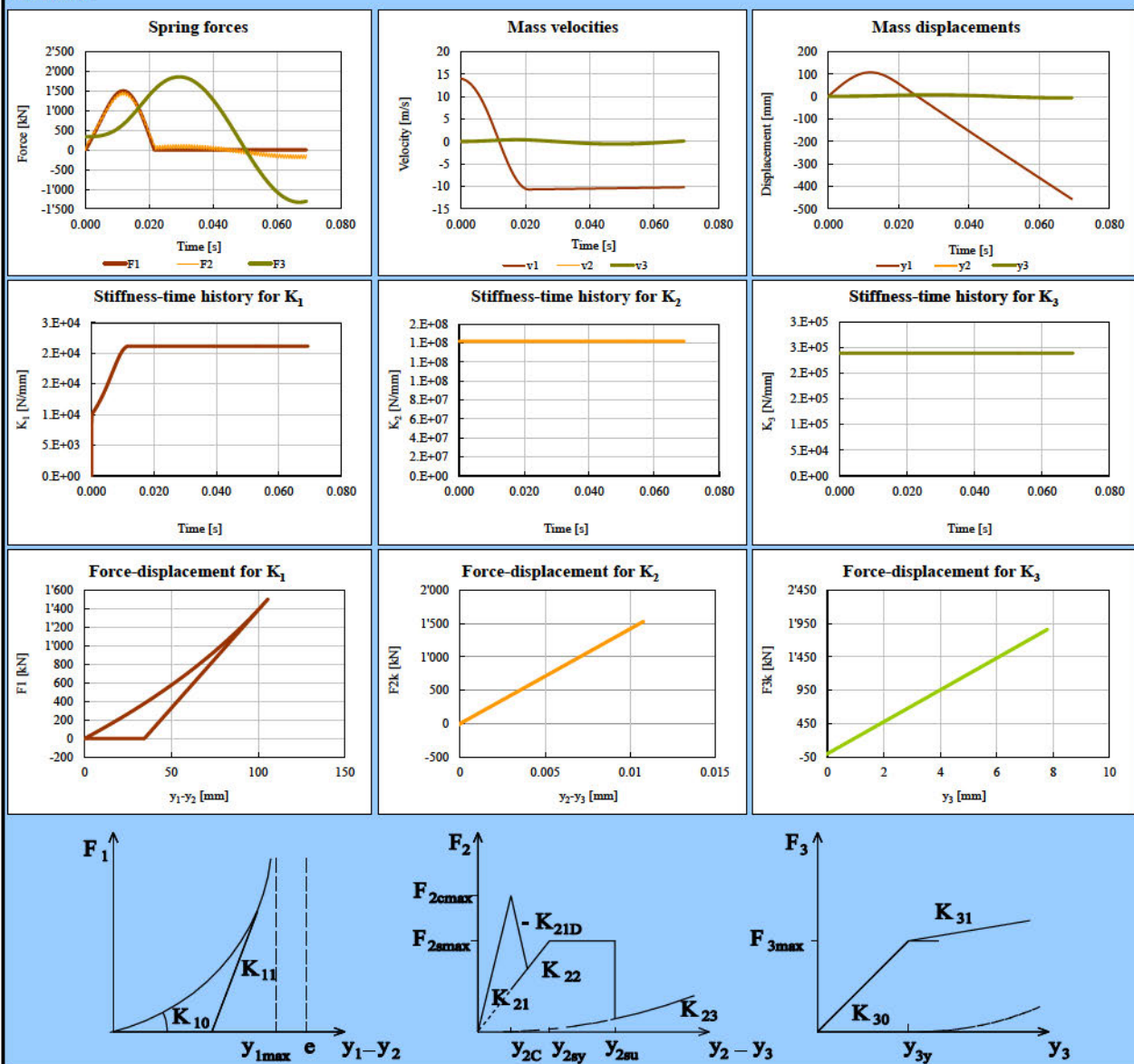
## Intermediate values

$h$	10.00 m
$A$	0.4902 m <sup>2</sup>
$\phi_{sl}$	1.007 m
$M_2$	2'827 kg
$M_{2p}$	2319 kg
$M_3$	42'250 kg
$M_3^*$	31'481 kg
$\rho_w$	0 [-]
$A_{rw}$	0 mm <sup>2</sup>
$y_{2c}$	0.053499 mm
$y_{2cy}$	0.83333 mm
$y_{2max}$	75 mm
$F_{2y}$	0 N
$F_{3y}$	2'328'860 N
$F_{3u}$	3'050'722 N
$f_{cm}$	3.21 N/mm <sup>2</sup>
$K_{21}$	142'048'458 N/mm
$K_{22}$	0 N/mm
$K_{30}$	239'034 N/mm
$c_2$	10085 Ns/m
$c_3$	2602 Ns/m
$T_2$	0.0280 s
$T_3$	2.2802 s
$F_{contact}$	51'466 kN
$n$	21 [-]

## RESULTS

Maximum spring values	
$F_{1,max}$	1503 kN
$F_{2,max}$	1473 kN
$F_{3,max}$	1861 kN
$y_{1,max}$	108.2 mm
$(y_1-y_2)_{max}$	105.5 mm
$(y_2-y_3)_{max}$	0.011 mm
$y_{3,max}$	7.8 mm
$v_{1,max}$	14.01 m/s
$v_{2,max}$	0.42 m/s
$v_{3,max}$	0.41 m/s
Duration	
$t(F_{1,max})$	11.6 ms
$t(F_{2,max})$	11.6 ms
$t(F_{3,max})$	29.2 ms
$TF_1$	21.6 ms
$TF_3$	50.2 ms
Relative values	
$(y_1-y_2)/p_{max}$	52.7 %
$y_2-y_3/y_{2c}$	20.2 %
$y_2-y_3/y_{2y}$	1.3 %
$y_2-y_3/y_{2max}$	0.0 %
$F_{1max}/F_{maxcm}$	2.9 %
$F_{3max}/F_{3y}$	79.9 %
$F_{3max}/F_{3u}$	61.0 %

## DIAGRAMS

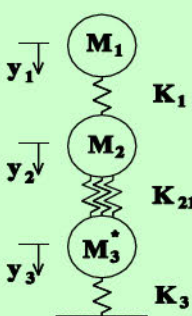


# Analytical model (System of multiple degrees of freedom)

Pardé P11

196071.8

## INPUT PARAMETERS

<b>Time integration</b>		<b>Cushion layer</b>		<b>Material properties</b>	
$\Delta t$	0.00008 s	$\gamma_g$	20 kN/m <sup>2</sup>	$A_{zg}$	150 promil
<b>Loading</b>		$K_{10}$	26000 N/mm	$f_{cm}$	35.0 N/mm <sup>2</sup>
$v_{10}$	22.14 m/s	$e$	0.2 m	$f_s$	350 N/mm <sup>2</sup>
$M_1$	800 kg	$p_{max}$	0.14 m	$E_c$	30000 N/mm <sup>2</sup>
$\phi_b$	0.7900 m	$\varphi$	33 °	$E_s$	210000 N/mm <sup>2</sup>
$g$	9.81 m/s <sup>2</sup>	$K_{1max}$	500000 N/mm	$\gamma_c$	25 kN/m <sup>2</sup>
<b>Slab</b>		$c_1$	7000 Ns/m	$G_F$	100 J/m <sup>2</sup>
$L_x$	5 m			$\gamma_f$	10 %
$L_z$	6.5 m			$D_{max}$	16 mm
$d$	0.52 m				
$z$	0.5 m				
$k_w$	17 [-]				
$\alpha$	0.8 [-]				
$Q_u/m_u$	4.0 [-]				
$\bar{u}$	20 mm				
$\phi_1$	30 mm				
$s$	200 mm				
$\bar{u}'$	15 mm				
$\phi_1'$	16 mm				
$s'$	300 mm				
$\phi_w$	0 mm				
$s_w$	150 mm				
$z_2$	0.05 [-]				
$z_3$	0.015 [-]				

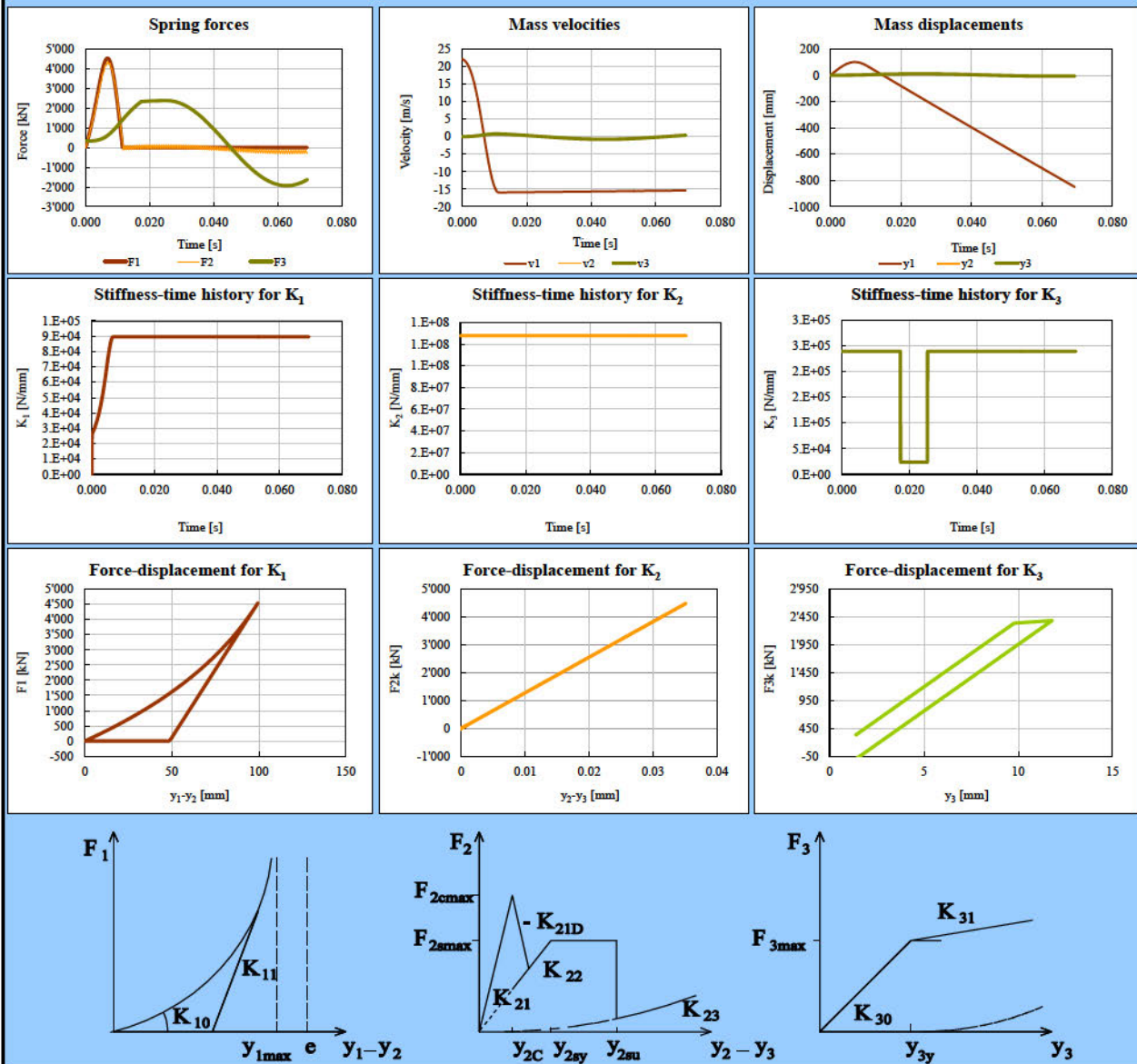
## Intermediate values

$h$	24.98 m
$A$	0.4902 m <sup>2</sup>
$\phi_{sl}$	0.855 m
$M_2$	2'088 kg
$M_{2p}$	1875 kg
$M_3$	42'250 kg
$M_3^*$	31'925 kg
$\rho_w$	0 [-]
$A_{rw}$	0 mm <sup>2</sup>
$y_{2c}$	0.053499 mm
$y_{2cy}$	0.83333 mm
$y_{2max}$	75 mm
$F_{2y}$	0 N
$F_{3y}$	2'328'860 N
$F_{3u}$	3'050'722 N
$f_{cm}$	3.21 N/mm <sup>2</sup>
$K_{21}$	127'720'211 N/mm
$K_{22}$	0 N/mm
$K_{30}$	239'034 N/mm
$c_2$	8218 Ns/m
$c_3$	2621 Ns/m
$T_2$	0.0254 s
$T_3$	2.2962 s
$F_{contact}$	51'466 kN
$n$	21 [-]

## RESULTS

<b>Maximum spring values</b>	
$F_{1,max}$	4537 kN
$F_{2,max}$	4352 kN
$F_{3,max}$	2386 kN
$y_{1,max}$	102.0 mm
$(y_1-y_2)_{max}$	99.3 mm
$(y_2-y_3)_{max}$	0.035 mm
$y_{3,max}$	11.8 mm
$v_{1,max}$	22.14 m/s
$v_{2,max}$	0.81 m/s
$v_{3,max}$	0.81 m/s
<b>Duration</b>	
$t(F_{1,max})$	6.8 ms
$t(F_{2,max})$	6.8 ms
$t(F_{3,max})$	24.4 ms
$TF_1$	11.5 ms
$TF_3$	45.4 ms
<b>Relative values</b>	
$(y_1-y_2)/p_{max}$	71.0 %
$y_2-y_3/y_{2c}$	65.6 %
$y_2-y_3/y_{2y}$	4.2 %
$y_2-y_3/y_{2max}$	0.0 %
$F_{1max}/F_{max,cm}$	8.8 %
$F_{3max}/F_{3y}$	102.5 %
$F_{3max}/F_{3u}$	78.2 %

## DIAGRAMS



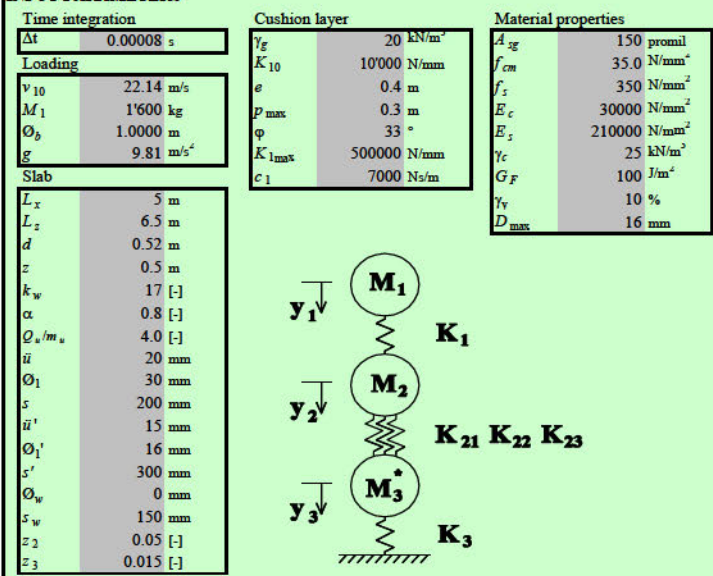


## Analytical model (System of multiple degrees of freedom)

Pardé P20

392143.7

## INPUT PARAMETERS



## Intermediate values

$h$	24.98 m
$A$	0.7854 m <sup>2</sup>
$\phi_{sl}$	1.109 m
$M_2$	3'340 kg
$M_{2p}$	2642 kg
$M_3$	42'250 kg
$M_{3*}$	31'158 kg
$\rho_w$	0 [-]
$A_{rw}$	0 mm <sup>2</sup>
$y_{2c}$	0.053499 mm
$y_{2cy}$	0.83333 mm
$y_{2max}$	75 mm
$F_{2y}$	0 N
$F_{3y}$	2'328'860 N
$F_{3u}$	3'050'722 N
$f_{cm}$	3.21 N/mm <sup>2</sup>
$K_{21}$	151'606'013 N/mm
$K_{22}$	0 N/mm
$K_{30}$	239'034 N/mm
$c_2$	11326 Ns/m
$c_3$	2589 Ns/m
$T_2$	0.0295 s
$T_3$	2.2685 s
$F_{contact}$	82'464 kN
$n$	21 [-]

## RESULTS

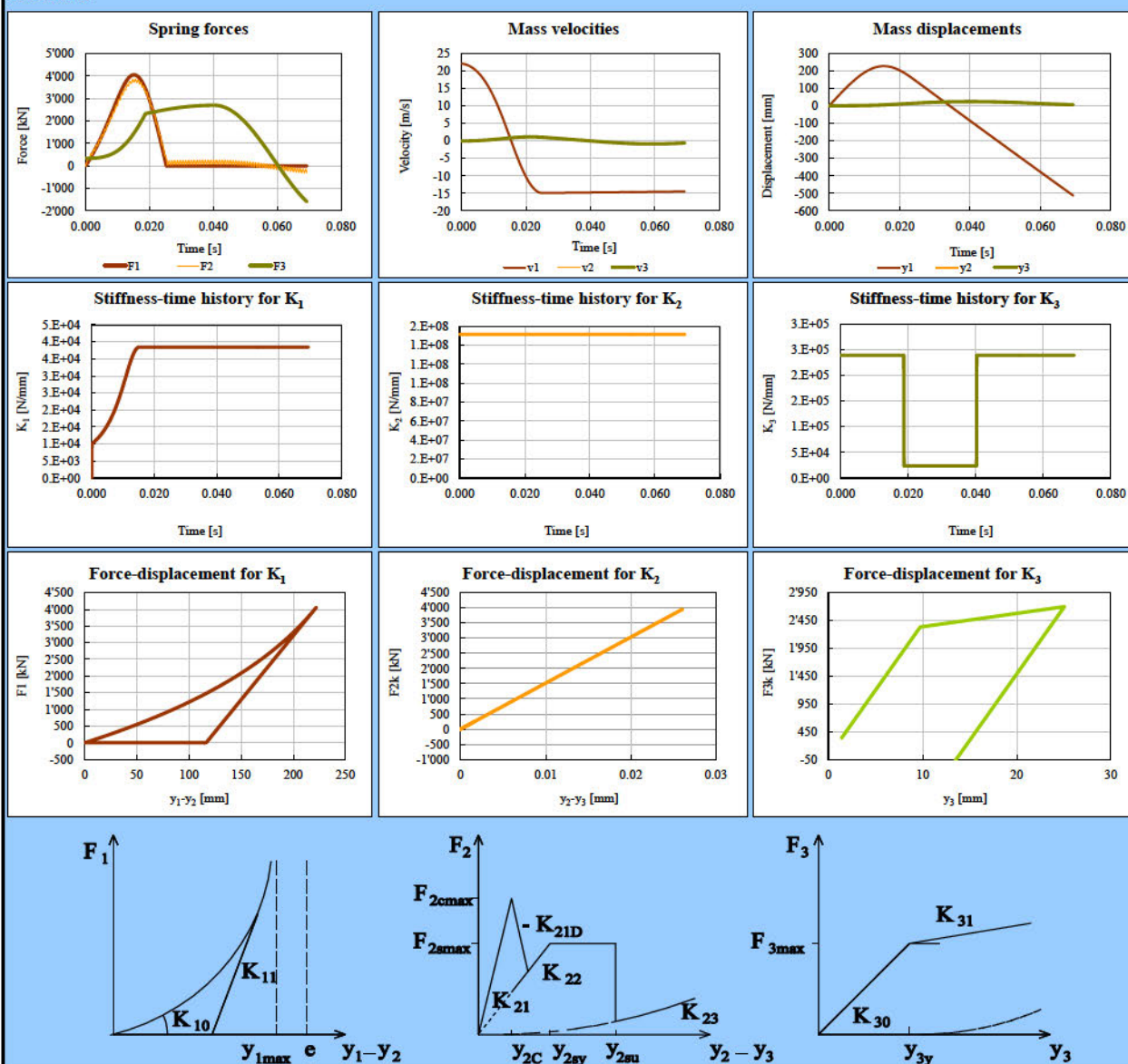
Maximum spring values	
$F_{1,max}$	4054 kN
$F_{2,max}$	3868 kN
$F_{3,max}$	2699 kN
$y_{1,max}$	228.2 mm
$(y_1-y_2)_{max}$	221.9 mm
$(y_2-y_3)_{max}$	0.026 mm
$y_{2,max}$	25.1 mm
$y_{3,max}$	1.17 m/s
$v_{1,max}$	22.14 m/s
$v_{2,max}$	1.17 m/s
$v_{3,max}$	1.17 m/s

Duration	
$t(F_{1,max})$	15.1 ms
$t(F_{2,max})$	15.6 ms
$t(F_{3,max})$	40.2 ms
$TF_1$	25.4 ms
$TF_3$	60.4 ms

## Relative values

$(y_1-y_2)/p_{max}$	74.0 %
$y_2-y_3/y_{2c}$	48.7 %
$y_2-y_3/y_{2y}$	3.1 %
$y_2-y_3/y_{2max}$	0.0 %
$F_{1max}/F_{max,cm}$	4.9 %
$F_{3max}/F_{3y}$	115.9 %
$F_{3max}/F_{3u}$	88.5 %

## DIAGRAMS

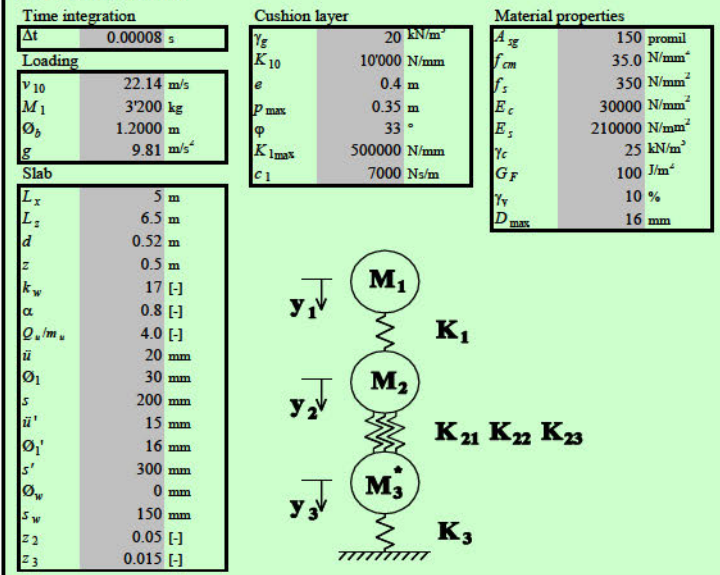


## Analytical model (System of multiple degrees of freedom)

Pardé P30

784287.4

## INPUT PARAMETERS



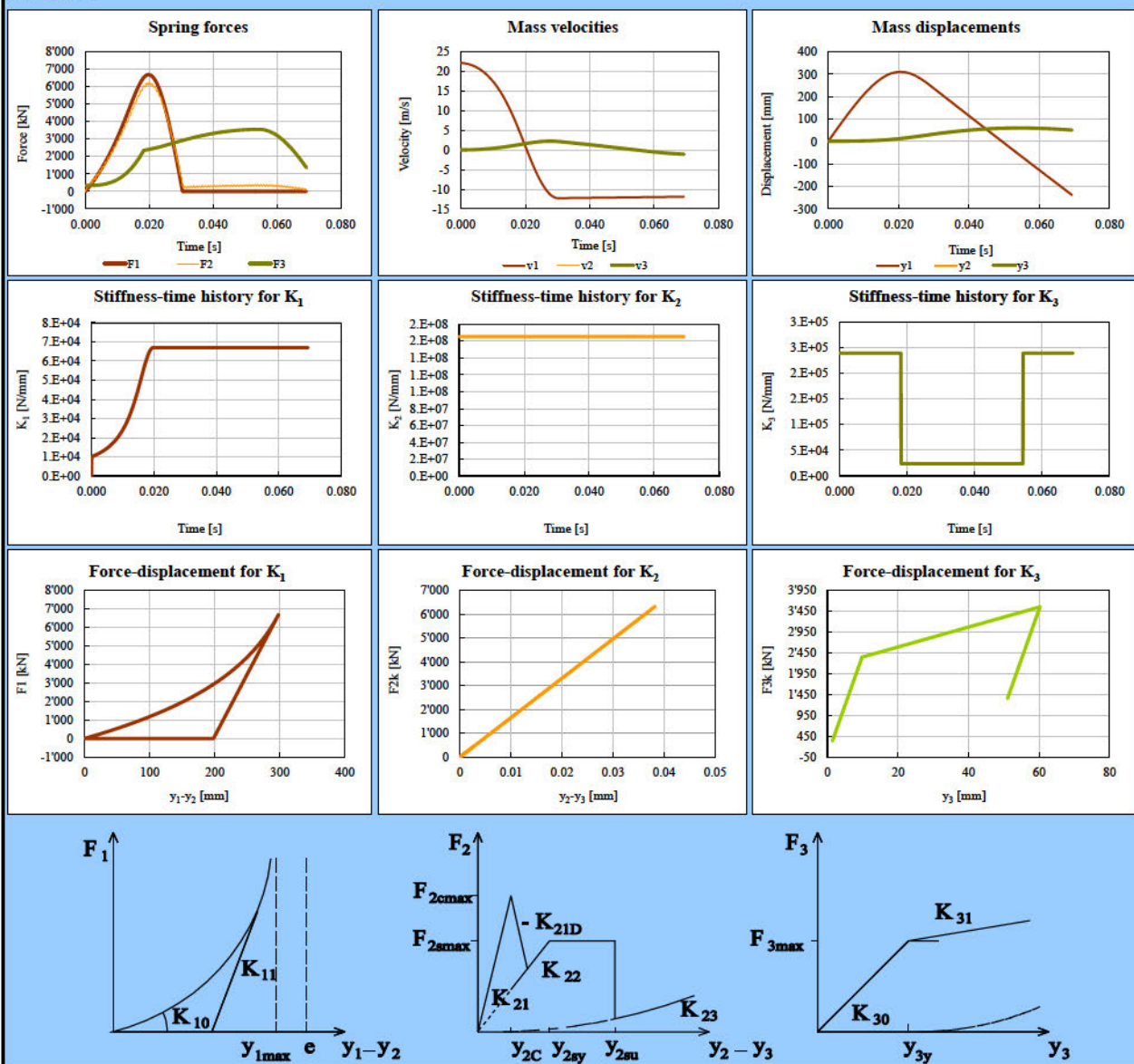
## Intermediate values

$h$	24.98 m
$A$	1.1309 m <sup>2</sup>
$\phi_{sl}$	1.254 m
$M_2$	4'088 kg
$M_{2p}$	3142 kg
$M_3$	42'250 kg
$M_{3*}$	30'658 kg
$\rho_w$	0 [-]
$A_{rw}$	0 mm <sup>2</sup>
$y_{2c}$	0.053499 mm
$y_{2cy}$	0.83333 mm
$y_{2max}$	75 mm
$F_{2y}$	0 N
$F_{3y}$	2'328'860 N
$F_{3u}$	3'050'722 N
$f_{cm}$	3.21 N/mm <sup>2</sup>
$K_{21}$	169'338'321 N/mm
$K_{22}$	0 N/mm
$K_{30}$	239'034 N/mm
$c_2$	13085 Ns/m
$c_3$	2568 Ns/m
$T_2$	0.0312 s
$T_3$	2.2502 s
$F_{contact}$	118'749 kN
$n$	21 [-]

## RESULTS

<b>Maximum spring values</b>	
$F_{1,max}$	6684 kN
$F_{2,max}$	6243 kN
$F_{3,max}$	3553 kN
$y_{1,max}$	310.4 mm
$(y_1-y_2)_{max}$	297.7 mm
$(y_2-y_3)_{max}$	0.038 mm
$y_{3,max}$	60.2 mm
$v_{1,max}$	22.14 m/s
$v_{2,max}$	2.23 m/s
$v_{3,max}$	2.23 m/s
<b>Duration</b>	
$t(F_{1,max})$	19.8 ms
$t(F_{2,max})$	20.0 ms
$t(F_{3,max})$	54.4 ms
$TF_1$	30.5 ms
$TF_3$	#NV ms
<b>Relative values</b>	
$(y_1-y_2)/p_{max}$	85.1 %
$y_2-y_3/y_{2c}$	71.4 %
$y_2-y_3/y_{2y}$	4.6 %
$y_2-y_3/y_{2max}$	0.1 %
$F_{1max}/F_{cm0.5m}$	5.6 %
$F_{3max}/F_{3y}$	152.6 %
$F_{3max}/F_{3u}$	116.5 %

## DIAGRAMS



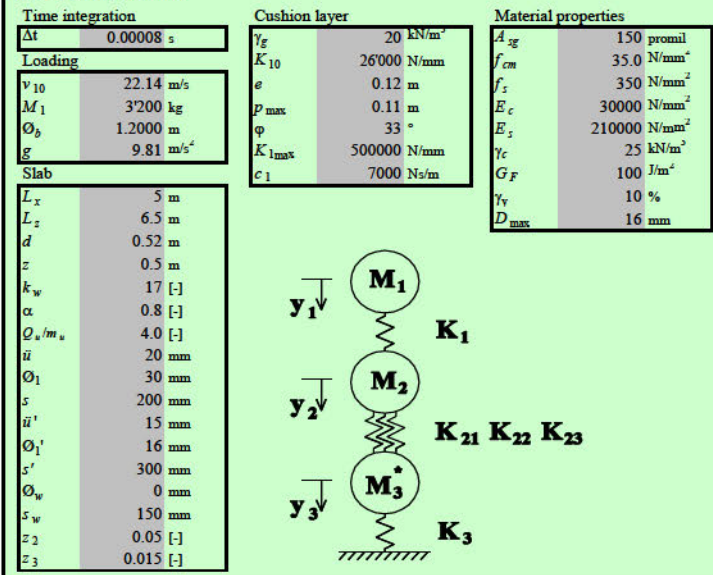


## Analytical model (System of multiple degrees of freedom)

784287.4

Pardé P31

## INPUT PARAMETERS



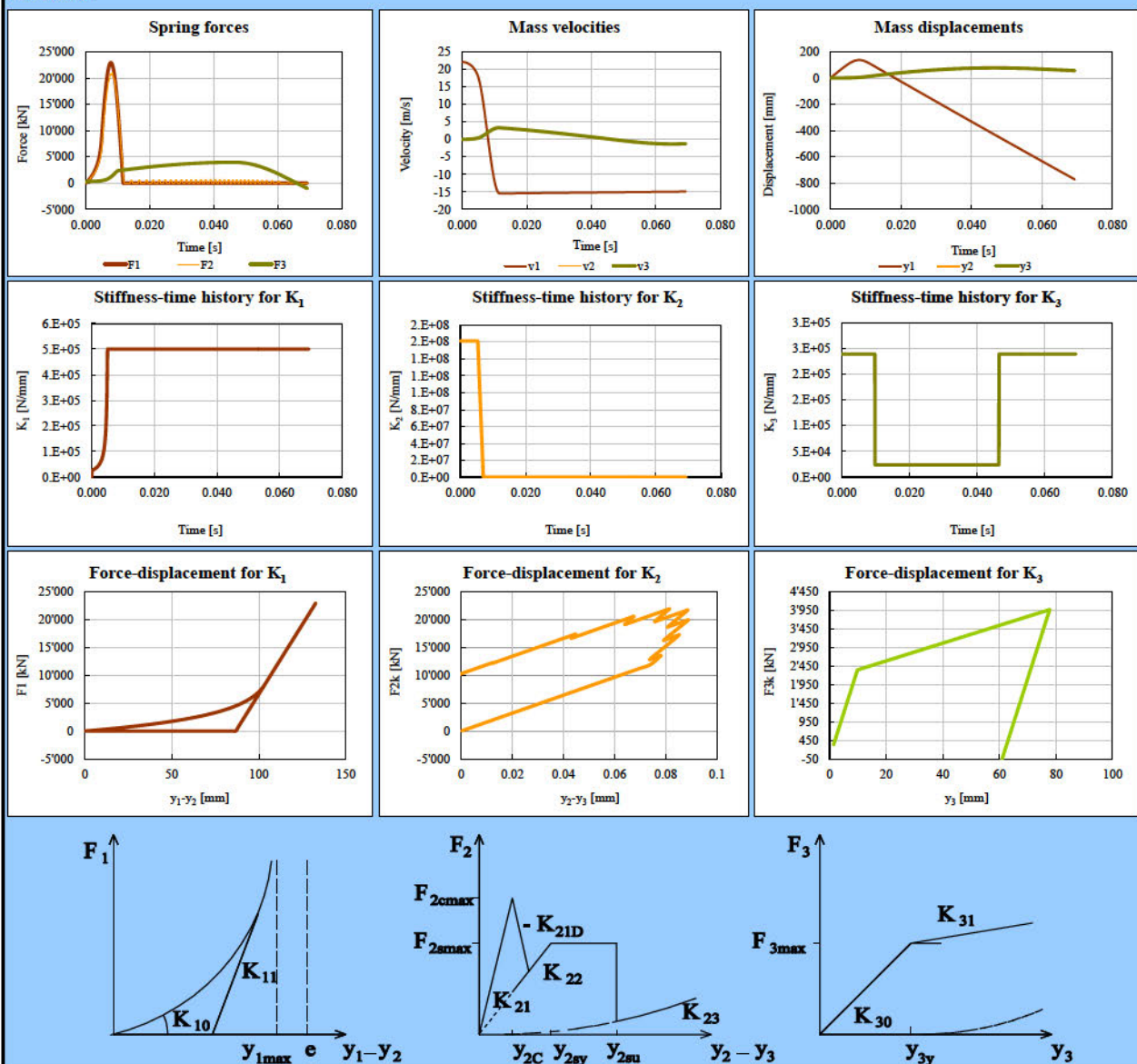
## Intermediate values

$h$	24.98 m
$A$	1.1309 m <sup>2</sup>
$\phi_{sl}$	1.211 m
$M_2$	3'262 kg
$M_{2p}$	2989 kg
$M_3$	42'250 kg
$M_{3*}$	30'811 kg
$\rho_w$	0 [-]
$A_{rw}$	0 mm <sup>2</sup>
$y_{2c}$	0.053499 mm
$y_{2cy}$	0.83333 mm
$y_{2max}$	75 mm
$F_{2y}$	0 N
$F_{3y}$	2'328'860 N
$F_{3u}$	3'050'722 N
$f_{cm}$	3.21 N/mm <sup>2</sup>
$K_{21}$	161'244'536 N/mm
$K_{22}$	0 N/mm
$K_{30}$	239'034 N/mm
$c_2$	11543 Ns/m
$c_3$	2575 Ns/m
$T_2$	0.0283 s
$T_3$	2.2558 s
$F_{contact}$	118'749 kN
$n$	21 [-]

## RESULTS

Maximum spring values	
$F_{1max}$	22941 kN
$F_{2max}$	21018 kN
$F_{3max}$	3972 kN
$y_{1max}$	137.8 mm
$(y_1-y_2)_{max}$	132.6 mm
$(y_2-y_3)_{max}$	0.089 mm
$y_{3max}$	77.8 mm
$v_{1max}$	22.14 m/s
$v_{2max}$	3.29 m/s
$v_{3max}$	3.33 m/s
Duration	
$t(F_{1max})$	7.8 ms
$t(F_{2max})$	8.3 ms
$t(F_{3max})$	46.0 ms
$TF_1$	11.8 ms
$TF_3$	66.0 ms
Relative values	
$(y_1-y_2)/p_{max}$	120.5 %
$y_2-y_3/y_{2c}$	166.1 %
$y_2-y_3/y_{2y}$	10.7 %
$y_2-y_3/y_{2max}$	0.1 %
$F_{1max}/F_{max1cm}$	19.3 %
$F_{3max}/F_{3y}$	170.6 %
$F_{3max}/F_{3u}$	130.2 %

## DIAGRAMS





## **Anhang 2: Zusammenstellung Versuchsergebnisse**

# Test results Parde 1

Test Nr			P10	P11	P20	P30	P31
Masse	geplant	kg	800	800	1600	3200	3200
	ist	kg	800	800	1590	3240	3240
Fallhöhe	geplant		10	25	25	25	25
	aus Fallzeit	m	9.73	24.04	25.99	24.37	25.57
	aus Beschleunigungsintegration	m	9.45	22.55	24.21	24.05	25.80
	aus Video	m	9.57	23.34	26.03	24.44	25.12
	aus Vermessung	m	9.89	24.2		24.46	
	gewählt	m	9.7	23.5	26.0	24.3	25.5
	Spanne	m	0.2	0.8	0.9	0.2	0.3
Bildmassstab Video		px/m	274.69	221.44	169.41	151.04	141.28
Schrägstellung Stein	aus Video	°	7	7	14	10	10
Einschlaggeschwindigkeit	aus Fallzeit	m/s	-13.82	-21.72	-22.58	-21.87	-22.40
	aus Beschleunigungsintegration	m/s	-13.84	-21.0	-21.6	-21.9	-22.4
	aus Video	m/s	-13.7	-20.9/-21.4/-22.3	-22.6	-21.8	-21.8
	gewählt	m/s	-13.8	-21.5	-22.6	-21.9	-22.1
Energie	aus Geschwindigkeit	kJ	76	185	406	777	791
	aus Fallhöhe	kJ	76	185	406	773	810
Impuls		kNs	-11	-17	-36	-71	-72
Lage bei Auslösung	aus Beschleunigungsintegration	m			0.15		0.00
Lage bei Einschlag	aus Beschleunigungsintegration	m			-24.06	-24.05	-25.80
Maximale Auslenkung	aus Beschleunigungsintegration	m			-24.26	-24.39	-25.95
Maximale Rücksprunglage	aus Beschleunigungsintegration	m			-23.99		-25.93
Bodenhärte	vor	MN/m2	6.7-12.4	16.3-23.5	10.7	5.0-13.4	
	nach	MN/m2	16.3-23.5	27.0	38.8		
Endlage	aus Beschleunigungsintegration	m			-24.23		---
	aus Feldmessung	m	-0.2	-0.4	-.35-.39		
	aus Vermessung	m	-0.19	-0.24	-0.35	-0.3	
Bremsweg	ungefiltert	m	0.24	0.22	0.28	0.36	0.16
	gleitendes Mittel	m	0.24	0.24	0.28	0.36	0.17
	Tiefpassfilter	m	0.17	0.23	0.36	0.36	0.12
	gewählt	m	0.24	0.23	0.28	0.36	0.16
	aus Video	m	0.16	0.19	0.20	0.42	0.17
Rücksprunggeschwindigkeit	aus Beschleunigungsintegration	m/s	0.3	0.2	1.60	1.3	1.20
Rücksprunghöhe	aus Beschleunigungsintegration	m	0.02	0.02	0.2	0.1	0.02
Anzahl Werte für gleitendes Mittel	Wurfkörper		5	25	10	10	10
	Platte		5	25	25	10	10
Maximale Steinverzögerung	ungefiltert	g (=9.81m/s2)	207	608	210	295	536
	gleitendes Mittel	g (=9.81m/s2)	83	201	157	128	352
	Tiefpassfilter	g (=9.81m/s2)	73	260	156	116	340
	aus Video	g (=9.81m/s2)	68	133	160	112	192
Maximale Plattenbeschleunigung	ungefiltert	g (=9.81m/s2)	-17	-75	-9	-16	-98
	gleitendes Mittel	g (=9.81m/s2)	-11	-12	-7	-12	-65
	Tiefpassfilter	g (=9.81m/s2)	-2	-26	-1	-12	-61
Maximale Plattengeschwindigkeit	ungefiltert	m/s	-0.1	-0.3	-0.3	-0.5	-1.5
	gleitendes Mittel	m/s	-0.1	-0.2	-0.3	-0.5	-1.4
	Tiefpassfilter	m/s	-0.1	-0.3	-0.3	-0.5	-1.4
Durchbiegung Platte	ungefiltert	mm	-1	-1	-2	-5	-10
	gleitendes Mittel	mm	-1	-1	-2	-5	-11
	Tiefpassfilter	mm	-1	-1	-2	-8	-11
	gewählt	mm	-1	-1	-2	-5	-11

<b>Zeitmessung aus Beschleunigungsmessung</b>							
Messfrequenz Sensoren		Hz	2000	10000	10000	10000	10000
Eigenfrequenz	Sensorinstallation oben	Hz	126	90	92		
	Sensorinstallation unten	Hz			95		867
	Platte	Hz					200
Auslösung bei		s	0.5485	0.723	0.71	0.801	0.771
Einschlag bei		s	1.957	2.937	3.012	3.03	3.054
Trigger bei		s	2	3	3	3	3
Maximalbeschleunigung bei	absolut	s	1.9725	2.942	3.021	3.037	3.059
	relativ	s	0.0155	0.005	0.009	0.007	0.005
Geschwindigkeit = 0m/s bei		s	2.0125	2.966	3.043	3.067	3.07
Einschlagende	geschätzt	s	2.0130	2.964	3.055	3.079	3.081
Fallzeit		s	1.4085	2.214	2.302	2.229	2.283
Bremszeit		s	0.0555	0.029	0.031	0.037	0.016
Einschlagdauer		s	0.056	0.027	0.043	0.049	0.016
Maximale Plattenbeschleunigung bei	aus Beschleunigungsintegration	s			3.019		3.058
Maximale Plattengeschwindigkeit bei	aus Beschleunigungsintegration	s			3.022		3.06
180° Rotation abgeschlossen bei	aus Beschleunigungsmessung	s					3.476
<b>Zeitmessung aus Video</b>							
Bildrate		Hz	250	250	250	1000	1000
Zeit pro Bild		s	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001
Einschlag bei		s	0.388	0.356	0.356	0.57	0.597
Trigger bei		s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Einschlagdauer		s	0.04	0.028	0.024		
<b>Auswertung Vermessung</b>							
Distanz von Plattenmitte	Querrichtung	m		0.9	1	0.9	
	Längsrichtung	m		0	0.35	0.25	
Distanz von Beschleunigungssensor	Querrichtung	m		0.7	1	1	
	Längsrichtung	m		0.1	0.35	0.1	
	Höhe	m		0.61	0.83	0.7	
Dicke der Betonplatte	an Einschlagstelle	m		1.12	0.61	0.61	
<b>Anpassung von Wegkurven zwischen Beschleunigungsmessung und Videoauswertung</b>							
Zeitversatz		s	-1.97	-2.94	-3.02	-3.03	-3.05
Lageversatz		M	9.63	22.58	24.16	24.04	25.79



## Anhang 3: Druckprüfung Betonproben

Tiefbauamt Graubünden, Sektion Materialtechnologie

Bericht Nr.: 832.16 / 173 - 176

Sägenstrasse 76 A, 7000 Chur

Seite Nr.:

1 von 1

**Druckfestigkeitsprüfung und Rohdichtebestimmung** gemäss SN EN 12390-3 und -7**Prüfbericht**

Strassenzug: H19 Oberalpstrasse

Objekt: **Galerie Oberalp Parde 1** (KUBA Nr. A19 099)Bauteil: **Decke**

Auftraggeber: Tiefbauamt Graubünden, Abt. Kunstbauten, Sägenstrasse 78, 7000 Chur

Unternehmer:

Ing. Büro:

**Angaben gemäss Prüfauftrag**

Betonhersteller:

Gesteinskörnung:

Herstelldatum: **1940**

Prüflabor:

Kontrolle:

Transport mit: Fahrmischer

Transport durch:

Einbringart:

Betonbezeichnung:

 $D_{max}$  [mm]:

Konsistenz:

Typ / Sorte: Altbeton

TBA GR Nr.:

Zement:

kg/m<sup>3</sup>

Zusatzstoffe:

Zusatzmittel EP:

Weitere ZM:

**Grenzwerte laut KBB**

Serie A

Serie B

Serie C

Serie D

Serie E

Serie F

**Frischbetonkontrollen**

Zeit Probenahme:

Frischbeton: Verdichtungsmass  $c$  [J]Ausbreitmass  $f$  [mm]Rohdichte  $D$  [kg/m<sup>3</sup>]Luftgehalt  $A_c$  [%]

w/z-Wert [J]

Temperatur Luft [°C]

Temperatur Beton [°C]

Beton eingebracht:

**Probekörper**

Bezeichnung:

Herstellung vor oder nach Pumpe:

Lagerung auf Baustelle:

Bemerkungen zu den Frischbetonkontrollen:

Probeneingang: **14.04.2016**

Entgegennahme: nicht persönlich

Alter bei Eingang:

Probenlagerung im Labor in Abweichung zur SN EN 12390-2 bei  $20 \pm 2$  °C und  $> 50$  % relative Luftfeuchtigkeit (Umrechnungsfaktor = 1).**Prüfergebnisse****Bohrkerne**

Serie	Probekörper Nr.	Prüfdatum	Alter	Masse	Abmessungen (gemessen)			Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit		
					Breite, $\varnothing$ [mm]	Länge [mm]	Höhe [mm]		Höchstkraft [kN]	Einzelwert [MPa]	Serienmittel [MPa]
A	16 /	18.4.16	77								
	173			1896	99.6		99.6	2'444	378.9	48.6	
	174			1856	99.5		98.8	2'416	272.1	35.0	
	175			1888	99.5		99.3	2'446	348.9	44.9	
	176			1869	99.5		99.0	2'428	294.0	37.8	<b>41.6</b>

**Beurteilung**

nach SN EN 13791

Bewertung Druckfestigkeit Bauwerksbeton

 $f_{m(n),is} = 41.6$  MPa  $f_{is, niedrigst} = 35.0$  MPaDies entspricht der Druckfestigkeitsklasse **C30/37** (im Alter von 77 Jahren)

Oberflächenzustand des Probekörpers während der Prüfung: wie angeliefert (trocken)

Bruchtyp: gewöhnlich

Bemerkungen:

Verteiler:

Tiefbauamt Graubünden, Abt. Kunstbauten, R. Hess (reto.hess@tba.gr.ch)

Chur, 18. April 2016 Vi

Visum Bereichsleiter (Gion Hitz):

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die untersuchten Proben.

Ohne schriftliche Genehmigung des Prüflabors darf der Prüfbericht nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

# SN EN 13791: 2007; Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen

## 1. Anzahl Bohrkern

**NA zu SN EN 13791** (Norm basiert auf Prüfkörper  $\varnothing = h = 100$  mm)

Bei BK  $\varnothing = h = \sim 50$  mm muss Anzahl  $D_{\max} > \frac{1}{3} \text{ BK} = (\text{Anzahl}) \cdot 5$   
in Abhängigkeit zu  $D_{\max}$  erhöht werden  $D_{\max} \leq \frac{1}{3} \text{ BK} = (\text{Anzahl}) \cdot 3$

### EN 13791

- BK  $\varnothing = h = 100$  mm entspricht Würfel 150 mm
- Bewertung der Druckfestigkeit in einem Bereich erfordert  $\geq 3$  BK ( $\varnothing = h = 100$  mm)

$D_{\max}$	$\varnothing = h = 100$ mm	$\varnothing = h = 50$ mm
8 mm	3	$(3 \cdot 3) = 9$
16 mm	3	$(3 \cdot 3) = 9$
32 mm	3	$(3 \cdot 5) = 15$

Tabelle: Minimale Anzahl BK zur Bewertung der Druckfestigkeit

## 2. Bewertung Festigkeit

Ausgehend von  $\varnothing = h = 100$  mm

- Ansatz B: 3 bis 14 BK Bei BK  $\varnothing 50$  mm; ein Wert für Berechnung ist Mittel aus 3 Einzelwerten

$f_{ck, is}$ : charakteristische Druckfestigkeit Prüfbereich ist der kleinere der Werte

- $f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k$   $f_{m(n), is}$  = Mittelwert Prüfergebnisse

$k$  = Spanne abhängig von Anzahl  $n$  BK  $\varnothing = h = 100$  mm

$k$ : bei  $n$  3 bis 6 = **7**; bei  $n$  7 bis 9 = **6**; bei  $n$  10 bis 14 = **5**

oder

- $f_{ck, is} = f_{is, niedrigst} + 4$   $f_{is, niedrigst}$  = niedrigstes Prüfergebnis

## 3. Berechnung

$n$	$f_{is}$ [MPa]	Anzahl und Durchmesser BK i.O?	$f_{ck, is, \text{Würfel}}$	Klasse
1	48.6	Eingabefelder: Bei BK $\varnothing 50$ mm ist ein Wert jeweils das Mittel aus 3 BK	13	C12/15
2	35.0		17	C16/20
3	44.9		21	C20/25
4	37.8	$n = 4$ $k = 7$ $f_{is, \text{niedrigst}} = 35.0$ $f_{m(n), is} = 41.6$ $f_{ck, is} (f_{is, \text{niedrigst}} + 4) = 39.0$ $f_{ck, is} (f_{m(n), is} - k) = 34.6$ $f_{ck, is} \text{ massgebend} = 34.6$	26	C25/30
5			31	C30/37
6			38	C35/45
7			43	C40/50
8			47	C45/55
9			51	C50/60
10			57	C55/67
11			64	C60/75
12			72	C70/85
13			81	C80/95
14			89	C90/105
			98	C100/115

**Klasse = C30/37**



## **Anhang 4: Photodokumentation**

# Picture report for field test of PARDE I gallery



## Outline of structure for field test

Name: PARDE I gallery

Date: 08.04.2016 (Fri.)

Construction year: 1940's (The gallery will be demolished soon.)

Cushion material: Rock, stone, and cohesive soil

Cushion thickness: 400 mm

## Objective

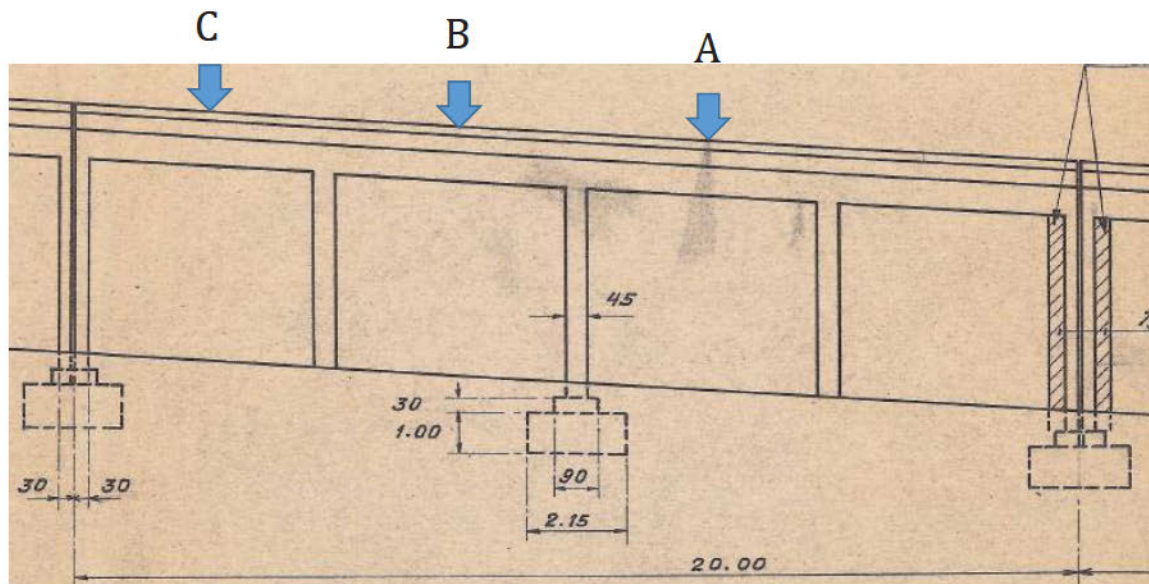
- Investigating the ultimate impact resistance of the gallery by means of weight-falling impact loading test
- Confirming the accuracy of Kris's predicting method by using test results

## Measuring item

- Acceleration of falling-weight
- Acceleration of bottom surface of roof slab
- Pictures for above/below roof slab (High speed camera)

**Test cases**

- Loading point A:  $M = 0.8 \text{ t}$ ,  $H = 10 \text{ m}$  and  $25 \text{ m}$
- Loading point B:  $M = 1.6 \text{ t}$ ,  $H = 25 \text{ m}$
- Loading point C:  $M = 3.2 \text{ t}$ ,  $H = 25 \text{ m}$  and  $25 \text{ m}$

**Condition of test preparation**

To prevent the collapse at pier side,  
timbers are located between the piers.



## Condition of test preparation



To prevent the collapse at pier side,  
timbers are located between the piers.

## Condition of test preparation



Location of crane truck

## Condition of test preparation



## Vehicle of WSL

## Condition of test preparation



## Computer for data storage



## Setting high-speed camera



## Condition of test preparation



## Setting accelerometer on the bottom surface of slab

## Condition of test preparation



## High-speed camera and computer for data storage

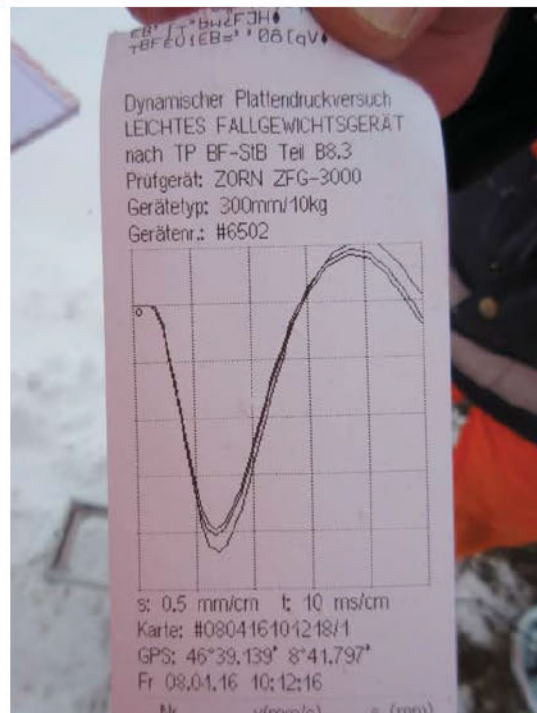


## Condition of test preparation



## Removing snow on the roof slab

## Condition of test preparation



## Conditions for soil test

## Condition of test preparation



## Setting accelerometer on the falling-weight

## Condition of test preparation



## Setting wireless accelerometer in the falling-weight



No. 1: 0.8 t, 10 m



Before loading



After loading

No. 1: 0.8 t, 10 m



After removing the falling-weight



No. 2: 0.8 t, 25 m



After removing the falling-weight

No. 4: 3.2 t, 25 m



Before removing the falling-weight

Many rocks and stones were broken.



No. 4: 3.2 t, 25 m



After removing the falling-weight

No. 5: 3.2 t, 25 m 2<sup>nd</sup> loading



After removing the falling-weight

No. 5: 3.2 t, 25 m 2<sup>nd</sup> loading



Top surface of roof slab could be seen.

No. 5: 3.2 t, 25 m 2<sup>nd</sup> loading



Crack pattern for bottom surface of roof slab



No. 5: 3.2 t, 25 m 2<sup>nd</sup> loading



Crack pattern for bottom surface of roof slab

Few cracks were observed.

### **Anhang 5: Numerische Simulation**

(Auszug aus Corominas, J., Moya, J., & Janeras, M. (Eds.) Proc. 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection ROCEXS, Cimne, 2017, pp. 173-176).

## PREDICTIONS AND CONCLUSIONS OF FE-SIMULATIONS FOR FULLSCALE IMPACT TEST ON PROTECTION GALLERY

Yusuke Kurihashi <sup>1</sup>, Masato Komuro <sup>1</sup>, Norimitsu Kishi <sup>2</sup>, Kristian Schellenberg <sup>3</sup>  
and Tomoki Kawarai <sup>1</sup>

In order to develop an appropriate prediction method for the impact resistant behavior of rockfall protection galleries, finite element simulations were conducted by means of LS-DYNA and compare with experimental results of full-scale impact loading tests. Readjustment of material properties for post analyses and a comparison of the impact forces with the results of an independent model as well as with both worldwide existing design guidelines give confidence for the application of the FE Model for the assessment of similar existing structures.

**Keywords:** rockfall protection gallery, full-scale impact test, FE-simulation, SMDF

### INTRODUCTION

Today, a large number of existing rockfall protection galleries need to rehabilitated and cost depend on whether the structures have to be strengthened or not. The assessment of existing structures by the current guidelines [1, 2] often results in recommendations for costly measures. Based on research results of the last 10 years [3, 4], some potential savings can be expected. The planned demolition of the protection gallery Parde on the Oberalp pass between Sedrun and Andermatt in Switzerland in 2016 allowed for carrying out falling weight tests accepting even severely damage to the structure. The test results were reported in detail [5] and have been valuable for improving the evaluation approach to predict impact resistant behavior of the gallery.

In order to investigate the applicability of Finite Element (FE)-simulations for predicting impact resistant behavior of rockfall protection gallery, test predictions were carried out by means of LS-DYNA[6]. After the test post analyses were conducted in order evaluate readjustments in the material properties. Additional comparison of impact forces with a System of Multiple Degrees of Freedom model (SMDF) and with the corresponding Japanese and Swiss design guidelines are presented.

### EXPERIMENTAL OVERVIEW

Gallery Parde (Fig. 1) was built in 1940 in order to protect the road from avalanches and was demolished in 2016 after having reached its design lifetime. Boulders of 800 to 3200 kg were hoisted up to heights up to 25 m by using track crane, then released and dropped to the central

---

<sup>1</sup> Muroran Institute of Technology, Muroran 050-8585, Japan, kuri@news3.ce.muroran-it.ac.jp

<sup>2</sup> National Institute of Technology, Kushiro College, Kushiro 084-0916, Japan, kishi@kushiro-ct.ac.jp

<sup>3</sup> Road Office of Grisons (TBA GR), Chur 7001, Switzerland, kristian.schellenberg@tba.gr.ch



point of the gallery. The impact force and the penetration depth of the boulder into the galleries cushion layer were measured. After the test, samples have been taken from the gallery, in order to evaluate the effective material properties, revealing an average concrete compressive strength of 41 MPa and a rebar yield strength of 290 MPa.



Fig. 1 Gallery Parde

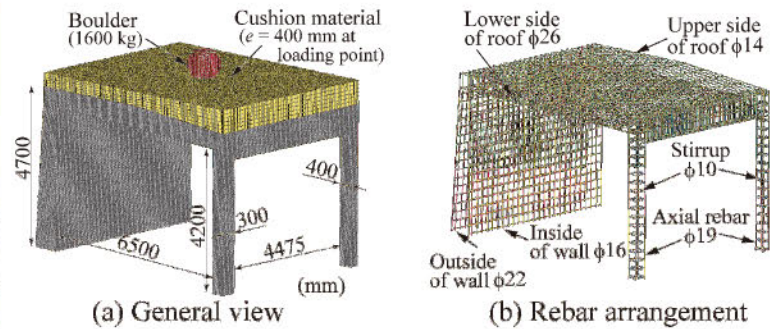


Fig. 2 General view and rebar arrangement for FE model

## DESCRIPTION OF FE MODEL

One-span of the gallery has been modelled with a standard mesh size of approx. 50 mm (see mesh geometry in Fig.2). The rebars were modelled using beam elements with two nodes. For the concrete and cushion material eight-node solid elements were used. Contact surface elements were defined to take into account the interaction between the cushion layer and surface of roof slab, allowing to cope for contact, detachment, and sliding of two adjacent elements. The bottom surface of side wall and of the columns were completely fixed with the ground. In the analysis for the prediction of the test (hereinafter pre-analysis), the cushion material was assumed as compacted gravel. These analyses were conducted for the impact of the 1600 kg boulder and falling from 25 m height.

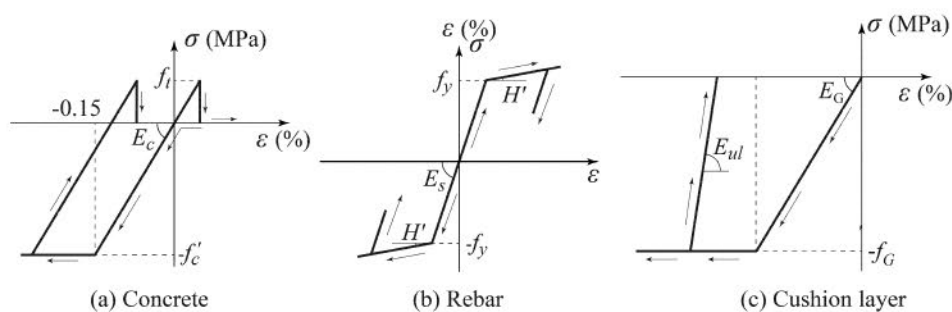


Fig. 3 Stress-strain relations

For the material properties (stress-strain relationship) of concrete, a perfect elastic-plastic bilinear model is adopted by using Drucker-Prager's yield criterion (Fig. 3a). Concrete yielding was assumed at a strain of  $1500\mu$ . For tension, a linear model is used with a cut off at 10% of the compressive strength. For the rebar a bilinear isotropic hardening rule as shown in Fig. 3b is used. The plastic hardening coefficient  $H'$  is 1% of the Young's modulus  $E_s$  ( $= 206$  GPa). For the cushion layer, a bilinear model is applied using a crushable foam model with tension cut-off (Fig. 3c). The elastic modulus was assumed as 200 MPa [7] in pre-analysis.



## COMPARISON BETWEEN ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS

Figure 4 compares the time histories of the impact force, the penetration depth, and the deflection of roof slab. It can be observed that impact force estimated from the pre-analysis is approx. double than the experimental result. The impact time duration estimated in the analysis is with 10 ms about 30% of test results and the penetration depth estimated from analytical results is also approx. one-third of the penetration obtained from the experimental results (see Fig. 4b). Therefore, the assumed cushion layer in the pre-analysis was significantly overestimated.

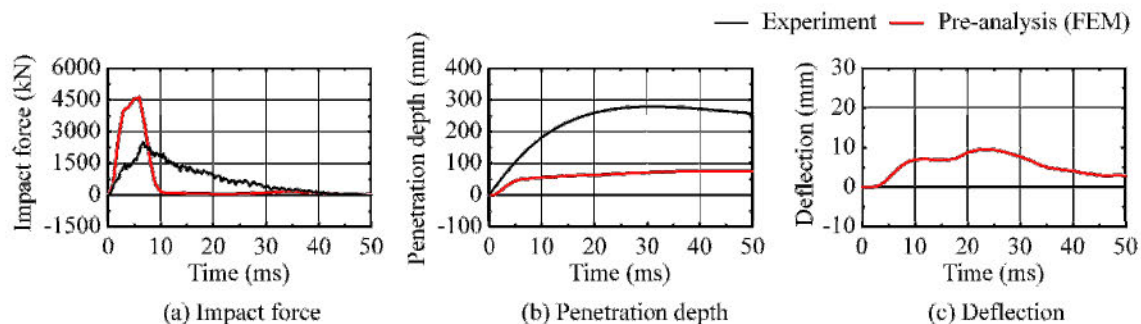


Fig. 4 Comparison between pre-analytical and experimental results for time histories

The post-analysis was carried out by adjusting the stiffness of the cushion layer until impact force and penetration depth related to the test results. The elastic modulus of cushion layer was changed from 200 to 8.8 MPa.

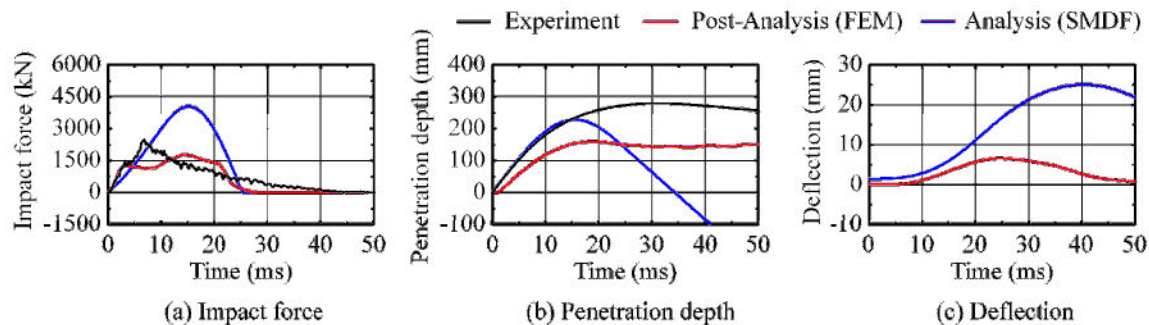


Fig. 5 Comparison between post-analytical and experimental results for time histories

Figure 5 shows the time histories for post-analysis as well as for the SMDF-model proposed by Schellenberg [4], where the parameters are described in the test report [5]. The impact duration time for all cases are almost similar and the maximum impact force by FEM is significantly smaller than the case of pre-analysis. The maximum impact force estimated by the SMDF-model is two times larger than the test result. Both, penetration depth and deflection evaluated by SMDF are larger than those by post-analysis of FE-simulation, concluding that also that SMDF was conservatively estimating the actual impact resistant capacity.

The results of pro-analysis of FE-simulation showed fine bending cracks in the bottom surface of the roof slab. At the test site, however, no cracks were observed after impact test of this case. This means that FE simulation gives conservative evaluation.

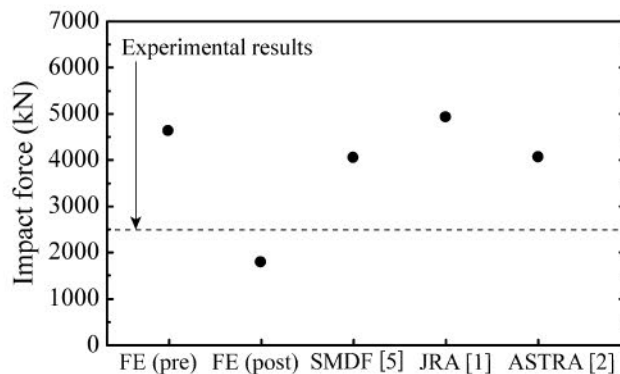


Fig. 6 Predicted impact force

Figure 6 shows a summary of the impact forces by pre-/post-analysis of FE-simulation, SMDF [5], and evaluated by the design guidelines of Japan Road Association (JRA) [1], and Switzerland (ASTRA) [2], comparing them with experimental result. For the design guideline of JRA, Lamé's constant of the cushion layer was taken as  $8,000 \text{ kN/m}^2$  and from the ASTRA guideline, soil modulus was set as  $10,000 \text{ kN/m}^2$ . The evaluated impact forces by pre-analysis of FE simulation, SMDF, guidelines of JRA and ASTRA are greater than actual impact force. Also, impact force estimated from JRA is the biggest among those values.

## CONCLUSIONS

- 1) In the case of the pre-analysis of FE-simulation, the impact force is two times larger than that of experimental results, because the cushion layer was assumed as compacted gravel overestimating its stiffness.
- 2) In the case of post-analysis, elastic modulus of cushion layer was reduced until the impact force wave is in good agreement with experimental results.
- 3) Evaluated impact forces by pre-analysis of FE simulation, SMDF, guidelines of JRA and ASTRA are greater than experimental results of impact force. This means those evaluation method give conservative values.

## REFERENCES

- [1] JAPAN ROAD ASSOCIATION (2000) Manual for anti-impact structures against falling rocks (in Japanese).
- [2] ASTRA (2008). Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien, Richtlinie, Bundesamt für Strassen, Baudirektion SBB, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- [3] KISHI N, OKADA S, KONNO H (2009) Numerical Impact Response Analysis of Rockfall Protection Galleries, Structural Engineering International, 19(3), 313-320.
- [4] VOGEL T, SCHELLENBERG K, GHADIMI KHASRAGHY S (2015) Dynamic structural capacity of reinforced concrete slabs due to rockfall: AGB-Report 673, pp 249.
- [5] VOLKWEIN A. (2016) Durchführung und Auswertung von Steinschlagversuchen auf eine Stahlbetongalerie. Testing report, WSL, Switzerland.
- [6] HALLQUIST J O (2017) LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation.
- [7] HIRATA T, KOMURO M, YAMAGUCHI S, KISHI N (2015) Numerical simulation on impact resistant behavior of full-scale RC rock protection gallery with gravel cushion, Proceedings of JCI Annual convention, 37(2), 601-606 (In Japanese).