



Jakob Staber, BSc

Umbau und Erprobung einer zyklischen Triaxialzelle

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.akad. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Dipl.-Ing. Michael Havinga
Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Havinga Michael, Frau Dipl.-Ing. Morales-Calderon Odalys Del Carmen und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

Graz, am

(Ort), am (Datum)

(Unterschrift des Studenten)

Kurzfassung

Die gegenständliche Masterarbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Herstellung und Kalibrierung einer dynamischen Triaxialmaschine, welche für konsolidierte undrainierte CU Versuche adaptiert wurde. Der Großteil der Arbeit besteht aus einer Bedienungsanleitung und einer Versuchsbeschreibung. Die Triaxialmaschine besteht aus einem alten Ödometer, auf dem eine Triaxialzelle aufgebaut wurde. Die dynamische Beanspruchung erfolgt über zwei Stahlplatten, welche mit einem elektrischen Motor in Bewegung gebracht werden. Es werden drei unterschiedliche Unwuchtstellungen erforscht, welche unterschiedliche dynamische Kräfte erzeugen. Des Weiteren sind drei unterschiedliche Laststufen definiert, welche der Proband nutzen kann. Als Versuchsmaterial zur Kalibrierung werden Prüfkörper aus Holz, extrudiertes Polystyrol XPS und Sand verwendet. Die ersten Versuche sind an Probenzylinder aus Holz durchgeführt, um die möglichen Frequenzen der Maschine bestimmen zu können. Während der Versuchsdurchführung traten neben der gewollten Hauptschwingung auch Subschwingungen auf, welche ergründet werden mussten. Aufbauend auf diesen Resultaten wurden weitere Versuche, mit einem weicheren Werkstoff nämlich XPS, durchgeführt. Die Ergebnisplots zeigen auch, dass bei einem geringeren Steifemodul die Subschwingungen in der Probe nicht verschwinden. Um die Herkunft der Subschwingungen verstehen zu können, wurden zwei Beschleunigungssensoren an der Triaxialmaschine angebracht. Nachdem die Subschwingungen anhand von Versuchen und Diagrammen belegt worden sind, widmet sich die weitere Arbeit dem Einbau bzw. der Erprobung von Sandkörpern. In diesem Zusammenhang werden die Einstellungen am Triaxialschaltpult für das Sättigen und das Konsolidieren der Probe erläutert. Darauf aufbauend wurden mehrere Testläufe mit Sand durchgeführt. Am Ende der Masterarbeit wurden Fourier Analysen für sämtliche Versuche erstellt, um die vorhandenen Subschwingungen im System mathematisch zu bestimmen.

Abstract

The following master thesis treats of the construction phase and calibration of a cyclic dynamic triaxial machine. For later analysis the machine shall have the settings for a consolidated undrained test. The main part of this master thesis contains a machine part manual and a description of the example preparations. The cyclic dynamic triaxial machine is made of an oedometer and a triaxial cell. The dynamic force is generated by an electric engine, which spins two metal plates. There are three different positions of imbalance and three different forces created. The examples for the calibrations are made of wood, XPS or sand. At the beginning of the test run the wooden samples are used to assign machine-related frequencies. During those tests there are measurable oscillations. There is the main oscillation which runs with the former set frequency. Beside this main oscillation there are also secondary oscillations measurable. To distinguish those secondary oscillations two acceleration transducers are installed on the triaxial machine. After the research of the primary oscillations and the secondary oscillations the further master thesis intents about the preparation of sand examples. Therefore all necessary setups for the consolidation and for the saturation are demonstrated. The end of the master thesis occupies with a mathematical preparation of all tests. In those calculations the main and the secondary oscillations are calculated.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Dynamische Triaxialmaschine - Bestand	2
3	Dynamische Triaxialmaschine	5
3.1	Genereller Aufbau	6
3.2	Boden der Triaxialzelle	8
3.3	Triaxialzelle	9
4	Messtechnik	10
4.1	Kraftmessdose	10
4.2	Wegaufnehmer	11
4.3	Porenwasserdruckmessgeber	12
5	Versuchsaufbau	14
6	Proben aus Holz	18
6.1	Test 16 – 18	19
6.2	Test 31 – 33	20
6.3	Test 46 – 48	21
6.4	Test 61 – 63	22
6.5	Test 76 – 78	23
6.6	Resultat der Versuche mit Holzproben	23
7	Proben aus XPS	24
7.1	Test 121 - 123	25
7.2	Test 133 - 135	26
8	Vergleich der Proben aus Holz mit Proben aus XPS	27
8.1	Test 16 - 18, Test 121 - 123	27
8.2	Test 22 - 24, Test 133 - 135	28
8.3	Resultat des Vergleiches	29
9	Beschleunigungssensoren	30
9.1	Messschema 1	30
9.1.1	Test 151	31

9.1.2	Test 160.....	32
9.2	Messschema 2.....	33
9.2.1	Test 163.....	34
9.2.2	Test 170.....	35
9.3	Resultat der Beschleunigungsmessungen.....	36
10	Proben aus Sand.....	37
10.1	Versuchsaufbau.....	37
10.2	Sättigung.....	39
10.3	Konsolidierung.....	41
10.4	Probe aus Sand Test 175.....	42
10.5	Probe aus Sand Test 176.....	49
11	Fourier Analyse.....	52
12	Resümee.....	53
13	Literatur.....	54
14	Anhang.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – alt, seitlich	2
Abb. 2	Ödometeraufbau aus den 90ziger Jahren	3
Abb. 3	Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – alt, vorne	3
Abb. 4	Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – alt, Detail Triaxialzelle	4
Abb. 5	Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – seitlich.....	5
Abb. 6	Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – vorne	6
Abb. 7	Detail des elektrischen Motors und der Unwucht.....	6
Abb. 8	Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – seitlich, untere Teil	7
Abb. 9	Aufgelegte Metallplatte.....	8
Abb. 10	Aufbau des Triaxialbodens	9
Abb. 11	Detail Kraftmessdose.....	9
Abb. 12	Messkraftverstärker Quantum MX 840 A	10
Abb. 13	Kalibrierungsdatei Kraftmessdose	11
Abb. 14	Kraftmessdose.....	11
Abb. 15	Kalibrierungsdatei Wegaufnehmer.....	12
Abb. 16	Detail Wegaufnehmer	12
Abb. 17	Kalibrierungsdatei PWD.....	13
Abb. 18	Porenwasserdruckmessgeber	13
Abb. 19	Unwucht Abstandhalter.....	14
Abb. 20	Einstellung der Unwuchtposition	15
Abb. 21	Ödometer Gewicht.....	16
Abb. 22	Prüfkörper aus Holz	18
Abb. 23	Test 16 - 18	19
Abb. 24	Test 31 - 33	20
Abb. 25	Test 46 - 48	21
Abb. 26	Test 61 - 63	22
Abb. 27	Test 76 - 78	23
Abb. 28	Prüfkörper aus XPS.....	24
Abb. 29	XPS Probe 121 bis 123 – Auswertung.....	25
Abb. 30	XPS Probe 133 bis 135 – Auswertung.....	26
Abb. 31	Holz Probe 16 bis 18 – Auswertung.....	27
Abb. 32	XPS Probe 121 bis 123 – Auswertung.....	28
Abb. 33	Holz Probe 22 bis 24 – Auswertung.....	28
Abb. 34	XPS Probe 133 bis 135 – Auswertung.....	29
Abb. 35	Beschleunigungssensor – Messschema 1	30

Abb. 36	Beschleunigungssensor – Auswertung Test 151, Messschema 1.....	32
Abb. 37	Beschleunigungssensor – Auswertung Test 160, Messschema 1.....	33
Abb. 38	Beschleunigungssensor – Messschema 2.....	33
Abb. 39	Beschleunigungssensor – Auswertung Test 163, Messschema 2.....	35
Abb. 40	Beschleunigungssensor – Auswertung Test 170, Messschema 2.....	35
Abb. 41	Versuchssand mit 15% Wassergehalt.....	37
Abb. 42	Einbau der Probe aus Sand.....	38
Abb. 43	Ballons.....	39
Abb. 44	Triaxialschaltpult WILLE LT 1000	40
Abb. 45	Schemaskizze des Aufbaues.....	41
Abb. 46	Sättigung – Test 175.....	43
Abb. 47	Konsolidierung – Test 175	44
Abb. 48	Hebelsarm des Ödometers nach Steigerung σ_1 auf 400kPa	45
Abb. 49	Spannung Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 2 Minuten.....	45
Abb. 50	Weg Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 2 Minuten	46
Abb. 51	Spannung Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 27 Minuten.....	46
Abb. 52	Weg Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 27 Minuten	47
Abb. 53	Poren Druck Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 27 Minuten	47
Abb. 54	Poren Druck Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung über 1 Minute.....	48
Abb. 55	Stellschraube ersetzt durch Holzklötz	48
Abb. 56	Probe 175.....	49
Abb. 57	Sättigung – Test 176.....	50
Abb. 58	Konsolidierung – Test 176	51
Abb. 59	Fourier Analyse Kraft Frequenz, Test 16 - 18.....	52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Schaltbelegung des Adapter Steckers.....	13
Tab. 2	Elektrischer Motor – Stufe zu Hz	15
Tab. 3	Frequenzen Test 16 - 18	19
Tab. 4	Frequenzen Test 16 - 18	20
Tab. 5	Frequenzen Test 46 - 48	21
Tab. 6	Frequenzen Test 61 - 63	22
Tab. 7	Frequenzen Test 76 - 78	23
Tab. 8	Beschleunigungssensor Messschema 1, Testreihe	31
Tab. 9	Beschleunigungssensor Messschema 2, Testreihe	34
Tab. 10	Sättigung - Probe 175.....	42
Tab. 11	Sättigung - Probe 176.....	49

1 Einleitung

Ziel dieser Masterarbeit ist es eine Triaxialmaschine aus verschiedensten Bestandteilen zusammen zu bauen um dynamische Triaxialversuche durchzuführen. Die verwendeten Einzelkomponenten wurden von Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Helfried Breyman und vom Labor von Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität in Graz zur Verfügung gestellt. In den Versuchsreihen wurden drei unterschiedliche Materialien verwendet: Holz, XPS und Sand. Der Versuchszylinder aus Holz wurde für die Kalibrierung der Maschine benutzt, da der Einbau der Probe rasch erfolgte und dieser die aufgebrachte Kraft standhielt. Die Proben aus dem Material XPS wurden für die Analyse der auftretenden Subschwingungen verwendet. Zum Abschluss der Versuche wurden Testzylinder aus Sand hergestellt, um den Sättigungs- und Konsolidierungsablauf erproben zu können. Ein Versuchsprotokoll zu sämtlichen durchgeführten Tests inklusive der Ergebnisplots können dem Anhang entnommen werden. Aufbauend auf diese Masterarbeit soll an der Versuchseinrichtung die dynamische Beanspruchung von Proben aus Sand und von feinkörnigen Böden erforscht werden, um die Einflüsse dynamischer Einwirkungen wie z.B. durch ein Erdbeben oder den Einbau einer Spundwand nachvollziehen zu können. Hierbei sind vor allem die auftretenden Frequenzen, die Spannungen und Höhe der Amplituden maßgebliche Faktoren, um beispielsweise eine mögliche Verflüssigung des Bodens herbeiführen zu können. Um dieses Erscheinungsbild nachvollziehen zu können, wurde im Labor für Bodenmechanik und Grundbau eine dynamische Triaxialmaschine gebaut, um das Verhalten von lakustrine, weicher Feinsedimente bei dynamischer Beanspruchung zu erforschen.

2 Dynamische Triaxialmaschine - Bestand

Im Vorfeld wurde der Technischen Universität Graz eine dynamische Triaxialmaschine zur Verfügung gestellt. Aufgrund der gewählten Spezifikationen für die anstehenden Versuchsreihen ist der vorhandene Maschinenaufbau nicht für die geplante Anwendung konzipiert. Die Bestandsmaschine ist für den Gebrauch von Wasser in der Triaxialzelle ungeeignet, da im Boden der Triaxialzelle ein Stempel integriert ist, welcher mit der unten liegenden Kraftmessdose in Verbindung steht. Der komplexe Aufbau dieses Rolllagers ist wasserdurchlässig und im Zuge der Versuche würde ein Wasserverlust und in weiterer Folge ein Druckverlust entstehen. Der Aufbau der Bestandsmaschine sieht wie folgt aus:

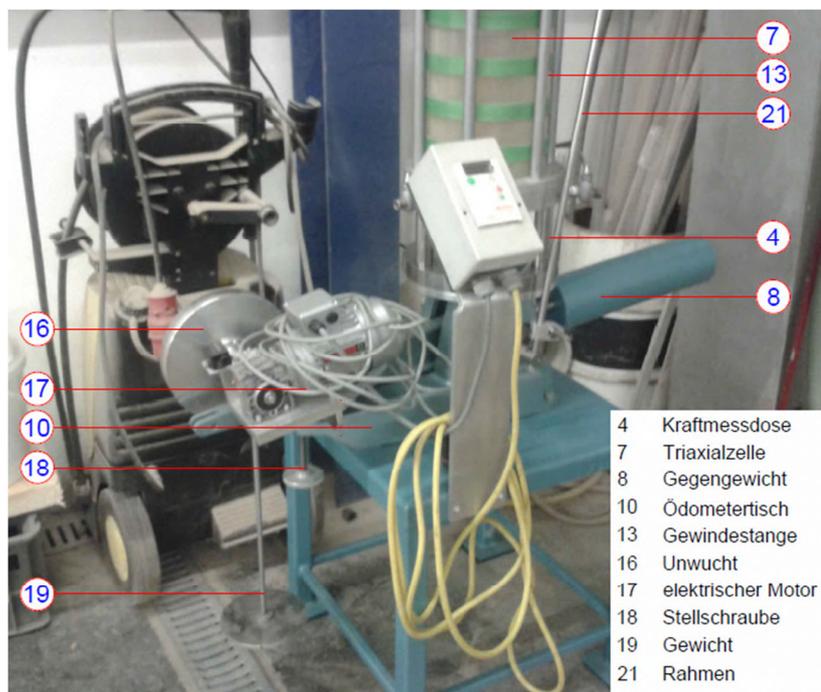


Abb. 1 Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – alt, seitlich

Der untere blau gefärbte Teil stammt von einem alten Ödometer aus den 90ziger Jahren siehe Abb. 1. Die Bestandteile Nr.: 8, 10, 18 und 19 gehören diesen ursprünglichen Versuch an. Am linken Hebelsarm wurde ein elektrischer Motor Nr.: 17 befestigt, welcher anhand zweier Stahlplatten Nr.: 16 eine dynamische Belastung erzeugt. Die endgültige Beanspruchung der Probe entsteht durch den Bauteil Nr.: 19. Auf die unten liegende Metallplatte, welche anhand einer Stange mit dem Ödometerteil verbunden ist, können Gewichtsscheiben gelegt werden, welche die notwendige Vertikalspannung σ_1 auf den Prüfkörper gewährleistet. Anhand des steifen Rahmes Nr.: 21, welcher außerhalb der Triaxialzelle verläuft, wird die aufgetragene Last auf den Druckstempel der Triaxialzelle übertragen. Um die exakte Spannung σ_1 an der Probe

einstellen zu können, wurde am rechten Teil des Ödometers ein Gegengewicht Nr.: 8 angebracht. Ein starrer Arm verbindet die Gewichtsscheiben auf der linken Seite mit dem Gegengewicht auf der rechten Seite. Dadurch kann die resultierende Spannung σ_1 auf den Prüfkörper variiert werden. Das Gegengewicht befindet sich auf einer Gewindestange und kann durch Rotationsbewegungen um die eigene Achse gedreht werden. Dadurch wird die Lage der Resultierenden verändert.

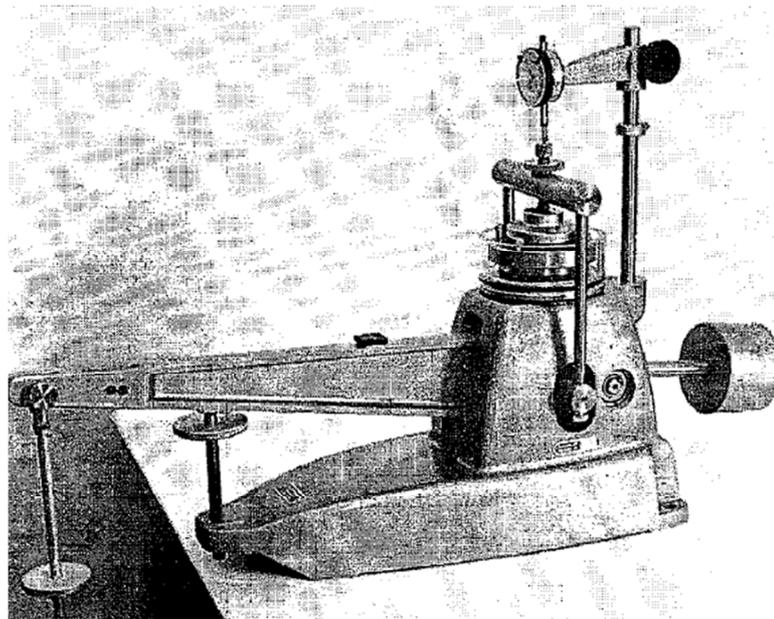


Abb. 2 Ödometeraufbau aus den 90ziger Jahren



Abb. 3 Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – alt, vorne

Der Triaxialaufbau setzt sich aus dem Boden der Triaxialzelle Nr.: 23 und einer Triaxialzelle Nr.: 7 zusammen. Beide Bestandteile können anhand der sechs Gewindestangen mit einander verbunden werden. Dadurch wird die Zelle luft- und wasserdicht, da die auf dem Boden der Triaxialzelle befindliche Dichtung zusammengedrückt wird. Um den Rahmen in seiner Lage halten zu können wurden zwei Halterungen angefertigt, siehe Nr.: 20.

Die Kraftmessdose befindet sich im Zwischenraum von Boden der Triaxialzelle und der Metallplatte, welcher durch vier Stahlsäulen geschaffen wird. Anhand eines Rolllagers mit integriertem Stempel wird die Vertikalspannung σ_1 auf das Messinstrument übertragen.

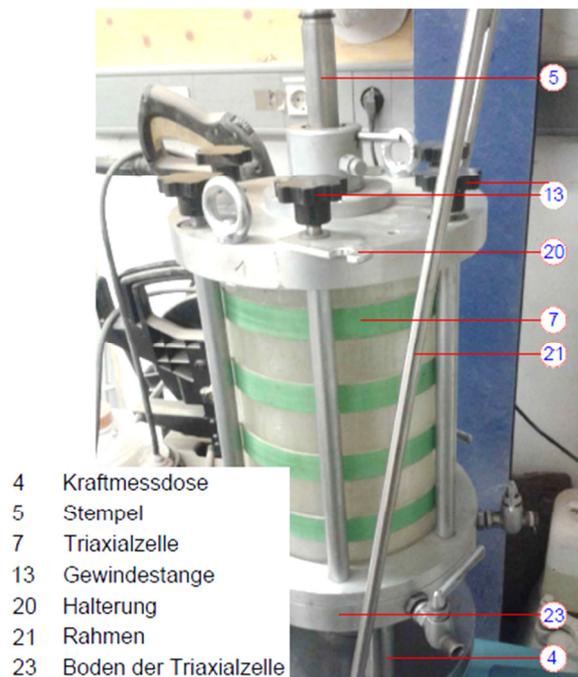


Abb. 4 Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – alt, Detail Triaxialzelle

3 Dynamische Triaxialmaschine

Mit Hilfe der dynamischen Triaxialmaschine sollen an Bodenproben zukünftig CU Versuche durchgeführt werden. Die Bestandsmaschine wurde für dieses Vorhaben adaptiert und dementsprechend umgebaut.

In den Abb. 5 und Abb. 6 wird ein grober Überblick über die Maschine gegeben. In den nächsten Kapiteln werden die einzelnen Elemente genauer beschrieben und jeweils auf ihre Wirkungsweise eingegangen.

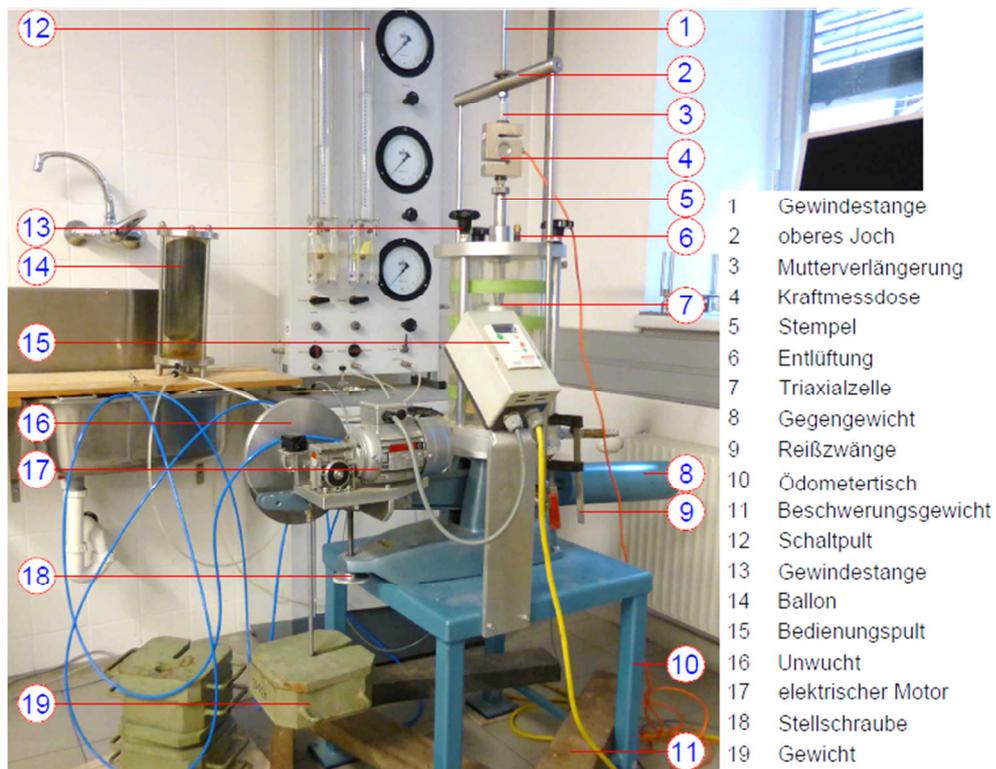


Abb. 5 Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – seitlich

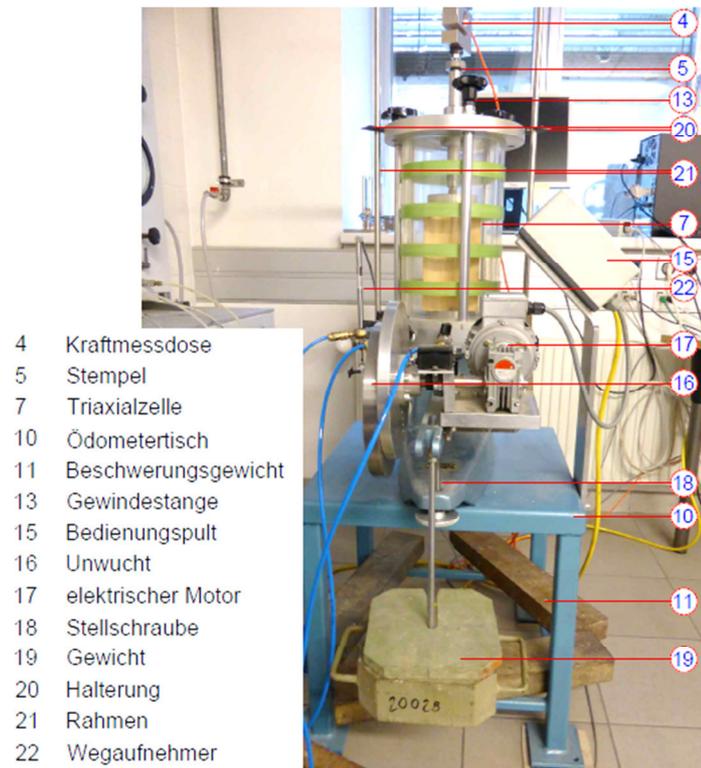


Abb. 6 Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – vorne

3.1 Genereller Aufbau

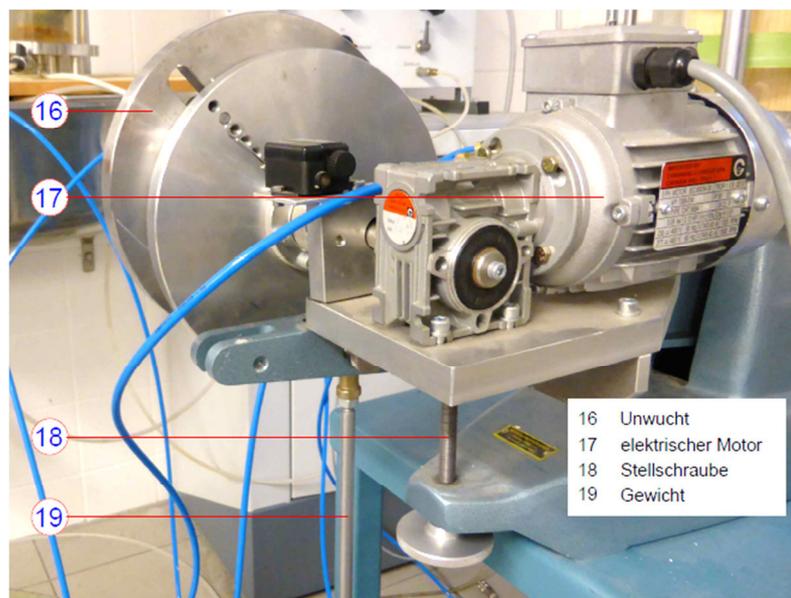


Abb. 7 Detail des elektrischen Motors und der Unwucht

Eine dieser Metallplatten Nr.: 16 ist stets zentrisch gelagert und mit dem Motorantrieb verbunden. Die zweite kreisförmige Metallplatte kann in ihrer Lage verschoben werden. Im Zuge der Versuche wurden drei unterschiedliche Unwuchtpositionen unter Zuhilfenahme von Abstandshaltern, bestehend aus Holz, definiert. Anhand zweier

Fixierungsschrauben wird die exzentrische Metallplatte an die zentrische Metallplatte angeschraubt und sorgt für eine dynamische Beanspruchung der Probe. Die vorher definierte Spannung σ_1 für die Versuche wird anhand von Gewichtscheiben auf der Elektromotorseite sichergestellt. Aufgrund der starren Verbindung beider Massen kann die gewünschte Spannung auf die Probe aufgebracht werden. Durch das Herausdrehen der Stellschraube, Nr.: 18, verliert der starre Balken den Kontakt an der Gewichtsseite und die Belastung wirkt auf den Prüfkörper ein. Ist die Stellschraube maximal eingedreht, sodass das Gewicht am höchsten Punkt liegt, so wird der größtmögliche Weg in der Probe hergestellt. Ohne die Stellschraube kann keine Belastung auf den Prüfzylinder erfolgen.

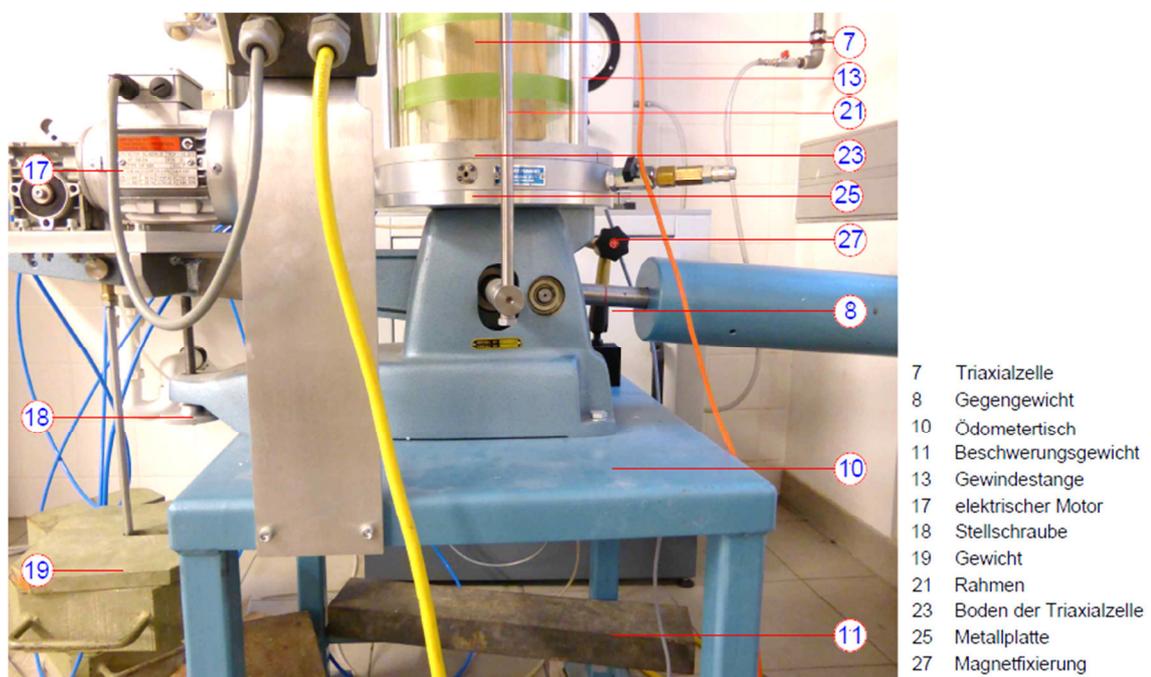


Abb. 8 Dynamischer Triaxial Versuchsaufbau – seitlich, untere Teil

Im Inneren der Triaxialzelle befindet sich die Probe, welche auf einem Metallsockel verweilt. Durch diesen Metallsockel und den Aufbau des Bodens der Triaxialzelle wird die Probe anhand des Zuganges B (siehe Abb. 10) gesättigt und drainiert. Auf die Bodenprobe wird eine metallene Druckkappe aufgelegt, welche mit dem oben befindlichen Stempel in Kontakt steht und somit die Vertikalspannung σ_1 definiert. Der Stempel ragt aus dem oberen Teil der Triaxialzelle empor, wobei auf dem Stempel eine 20 kN Kraftmessdose angebracht ist, siehe Abb. 14. Die Kraftmessdose wird auf eine Gewindestange befestigt. Diese Stange steht wiederum in Verbindung mit einem außen liegenden Rahmen, welcher die Kraft vom Ödometer nach oben und somit direkt in die Zelle leitet. Zwischen dem oberen Joch des Rahmens und der Kraftmessdose wird die Schraube durch Muttern versteift.

3.2 Boden der Triaxialzelle

Auf dem Ödometer wurde eine Metallplatte aufgelegt, siehe Abb. 9. Diese wird durch eine Schraube Nr.: 26 fixiert, welche zusätzlich den darauf liegenden Boden der Triaxialzelle gegen Verdrehung sichert. Aufgrund dieser Sicherungsmaßnahme musste der Boden der Triaxialzelle in diesem Bereich ausgehöhlt werden.

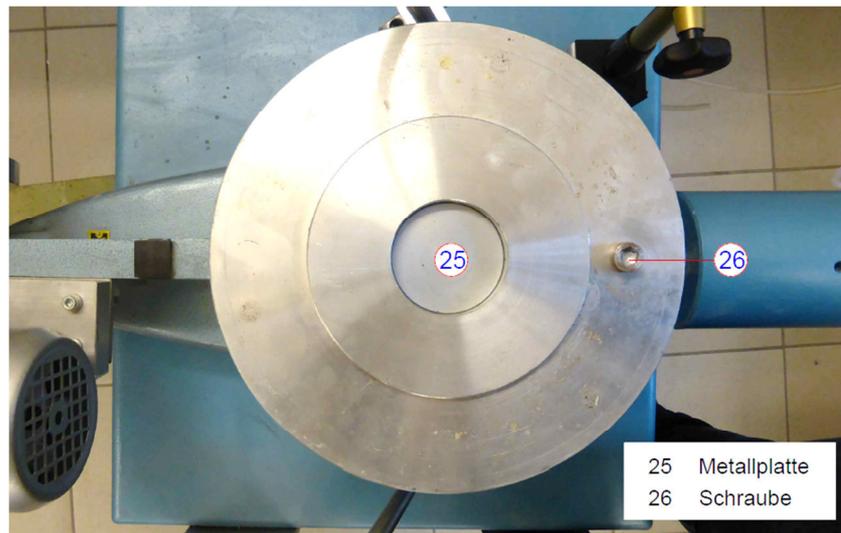


Abb. 9 Aufgelegte Metallplatte

Auf die Metallplatte aufliegend befindet sich ein Boden der Triaxialzelle der Firma „Wykeham and Farrance“ Modell Nr.: 11001-S. In Abb. 10 ist der verwendete Bauteil, welcher vier Anschlüsse aufweist, erkennbar:

- A: Anschluss Druckkappe oben
- B: Zugang zur Probe, Drainage und Sättigung
- C: Zugang zur Zelle, Zelldruck
- D: Porenwasserdruck

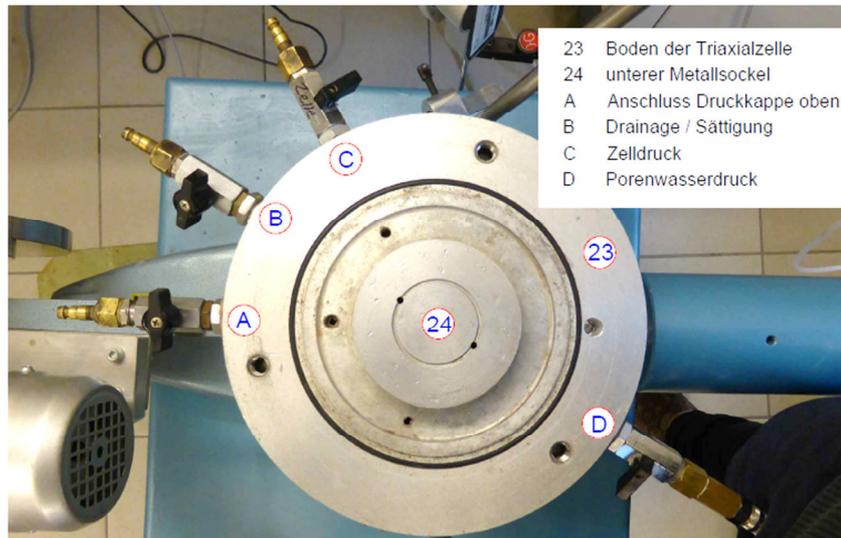


Abb. 10 Aufbau des Triaxialbodens

3.3 Triaxialzelle

Am oberen Teil der Triaxialzelle befinden sich die Befestigung des Rahmens und die Kraftmessdose. Um den Rahmen stabil halten zu können, wurden zwei Halterungen aus Metall gefertigt. Diese wurden halbkreisförmig ausgeschnitten und weisen je einen Zacken auf. Diese Zacken gewährleisten die Lagesicherung des Rahmens. Beide Halterungen müssen der Lage der Kraftmessdose angepasst werden und dürfen erst danach vollständig fixiert werden. Die Fixierung der Halterungen erfolgt anhand der drei Gewindestangen, welche den Boden der Triaxialzelle mit der Triaxialzelle verbinden. Somit wird die Triaxialzelle geschlossen und kann in Folge mit Wasser gefüllt werden.

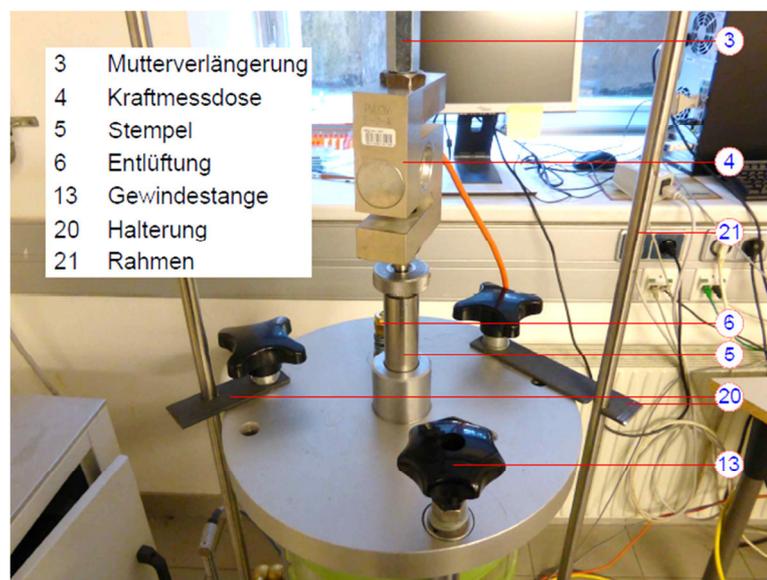


Abb. 11 Detail Kraftmessdose

4 Messtechnik

Im Vorfeld der Versuche mit Sandproben wurde als Messkraftverstärker ein Spider 8 mit dazu gehöriger Software verwendet. Mit dieser konnte lediglich die Kraft und der Weg aufgezeichnet werden. Die Daten wurden mit einer Messrate von 400 Hz vom Programm aufgenommen. Nachdem die ersten Versuche mit Holz- und XPS-Proben beendet waren, wurden wie in Kapitel 9 beschrieben zwei Beschleunigungssensoren verwendet. Ab diesem Zeitpunkt wurde ein Messkraftverstärker Quantum MX 840 A appliziert. Dieser bietet nicht nur eine deutlich höhere Anzahl an Einstellungsmöglichkeiten und Sensoren an, sondern kann auch eine höhere Versorgungsspannung (24 V¹) zur Verfügung stellen.



Abb. 12 Messkraftverstärker Quantum MX 840 A

4.1 Kraftmessdose

Die verwendete Kraftmessdose hat eine maximale Belastungsgrenze von 20 kN. Diese wird unter Zuhilfenahme eines Spitzes, welcher in die Kraftmessdose gedreht wurde, auf den Stempel fixiert. Der aufgeschraubte Spitz dient zur zentrischen Positionierung der Kraftmessdose oberhalb des Stempels und zur Krafteinleitung. Die Kraftmessdose wird am oberen Ende durch eine Gewindestange am Versuchsrahmen fixiert. Zwei vorhandene Hülsen mit Innengewinde sorgen für den nötigen Kraftschluss zwischen Rahmen und Kraftmessdose. Zu Beginn der Versuchsreihe wurde die Kraftmessdose kalibriert, siehe Abb. 13.

¹ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Datenblatt – Quantum X MX 840 A.

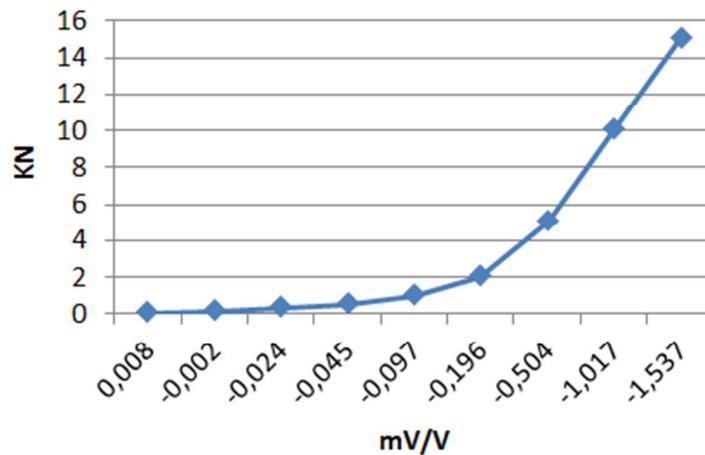


Abb. 13 Kalibrierungsdatei Kraftmessdose



Abb. 14 Kraftmessdose

4.2 Wegaufnehmer

Der induktive Wegaufnehmer stammt von der Firma „HBM“ und hat die Modell Nr.: WA / 50 mm. Dieses Messinstrument kann die Vertikalverformungen mit einer Genauigkeit von 0,01 mm aufzeichnen. Der Messbereich des Sensors liegt zwischen 0 bis 50 mm. Im Vorfeld der Versuche wurde dieser neu kalibriert, siehe Abb. 15.

Der Kontaktpunkt der Wegaufnahme wurde so gewählt, dass das stabile Ende unter Hilfenahme einer Magnethalterung, Nr.: 28, auf dem Ödometer aufsitzt. Der Messsensor nimmt die lagemäßigen Veränderungen des Rahmens wahr und wird anhand einer Schraubkonstruktion, Nr.: 28, auf dem Rahmen platziert.

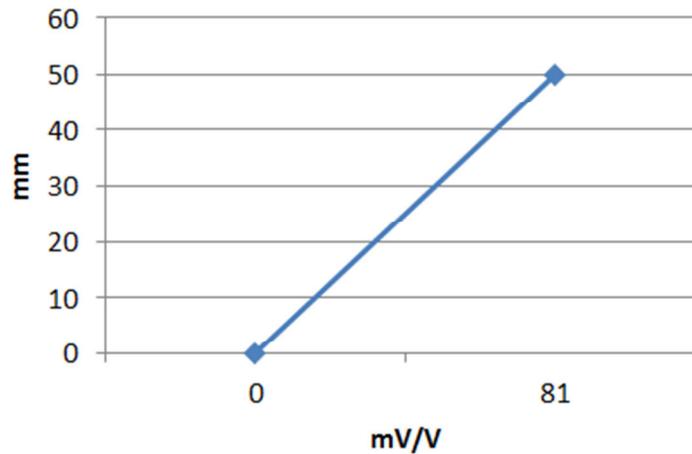


Abb. 15 Kalibrierungsdatei Wegaufnehmer

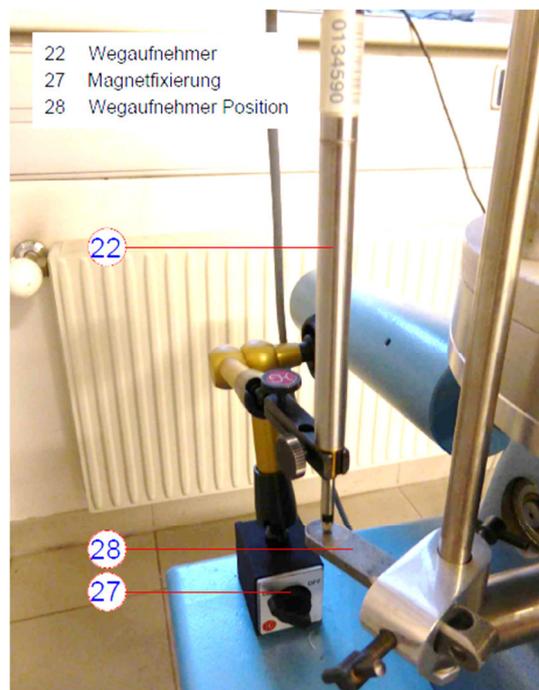


Abb. 16 Detail Wegaufnehmer

4.3 Porenwasserdruckmessgeber

Der verwendete Stecker des Porenwasserdruckmessgebers wurde für die Verwendung des Quantum MX 840 A adaptiert. Der Schaltplan basiert auf der Anleitung gemäß dem Handbuch HBM QuantumX, Kapitel 8.13 Elektrische Spannung 10 V, Seite 142.

Tab. 1 Schaltbelegung des Adapter Steckers

Kabel Farbe	Pin Belegung	7 poliger Rundstecker Pin	Quantum X Stecker Pin
Gelb	Speisung -	3	11
Braun	Speisung +	1	12
Weiß	Signal -	5	9
Grün	Signal +	4	14
Blau	Schutz	2	Schirm

Der Porenwasserdruckmessgeber wird auf Position D an dem Boden der Triaxialzelle befestigt. Zu Beginn der Versuchsreihe muss immer gewährleistet sein, dass der Messgeber keine Luft im System hat. Die Werte der Kalibrierung des Messensors kann der Abb. 17 entnommen werden.

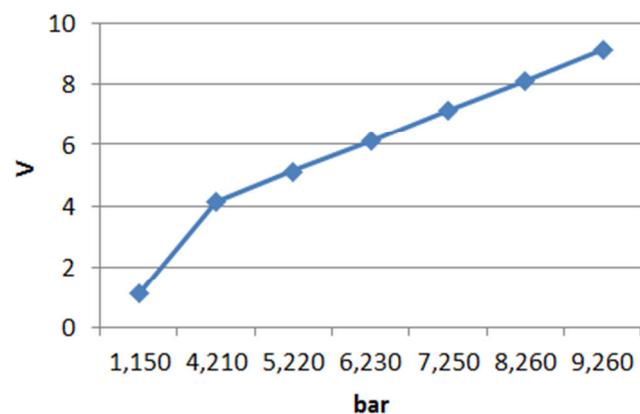


Abb. 17 Kalibrierungsdatei PWD



Abb. 18 Porenwasserdruckmessgeber

5 Versuchsaufbau

Um in weiterer Folge Versuche mit Bodenproben durchführen zu können, musste die dynamische Triaxialmaschine neu eingerichtet und kalibriert werden.

Anhand zweier Schrauben bei der Unwucht wurden drei dynamische Belastungen getestet: Unwucht 1, Unwucht 2 und Unwucht 3. Die jeweiligen Unwuchtpositionen können unter Zuhilfenahme von drei Holzklötzen festgelegt werden, siehe Abb. 19. Beide Unwuchtscheiben sind entlang einer Schiene miteinander verbunden, welche eine entsprechende Vertiefung aufweist, siehe Abb. 20. In diese Vertiefung befestigt man, je nachdem welche Position man haben möchte, die Anzahl der Klötze und bestimmt somit die Exzentrizität der Scheibe.



Abb. 19 Unwucht Abstandhalter

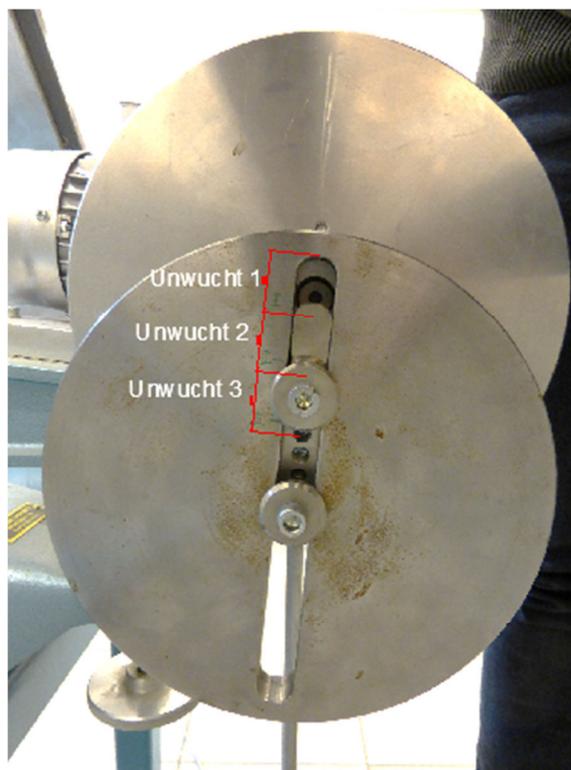


Abb. 20 Einstellung der Unwuchtposition

Aufgrund der Einstellung des elektrischen Motors und der digitalen Anzeige der Motorumdrehungen von Stufe 0,0 bis Stufe 50,0 wurden die dazu passenden Frequenzen herausgefiltert.

Tab. 2 Elektrischer Motor – Stufe zu Hz

Elektrischer Motor - Stufe	Frequenz der Unwucht [Hz]
0	0
10	0,2
15	0,3
20	0,4
25	0,5
30	0,6
40	0,8
50	1,0

Der eingebaute elektrische Motor bietet die Möglichkeit eine zyklische Zusatzbelastung von 0,2 bis maximal 1,0 Hz aufzubringen.

Im Zuge der Versuche wurden für die Prüfzylinder mit einem Radius von 50 mm und einer Höhe von 200 mm drei unterschiedliche Laststufen untersucht:

- 300 kN/m² entspricht einer Kraft auf die Probe von 2,357 kN
- 500 kN/m² entspricht einer Kraft auf die Probe von 3,927 kN
- 700 kN/m² entspricht einer Kraft auf die Probe von 5,498 kN

Die Spannung kann anhand der aufgebrachten Kraft und der Fläche der Probe berechnet werden.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Um die vorher definierte Vertikalspannung σ_1 erzielen zu können, werden auf den Ödometer, siehe Abb. 21, Gewichtscheiben aufgelegt. Durch die Verbindung dieses Gewichtes mit dem Gegengewicht am anderen Ende des Armes, kann eine Feinjustierung der Vertikalspannung erfolgen, indem der Proband das Gegengewicht entlang einer innenliegenden Schraube verdreht.



Abb. 21 Ödometer Gewicht

Der Prüfkörper wird zentrisch auf den Sockel des Bodens der Triaxialzelle gestellt. Darauf wird die obere Druckkappe aufgebracht, welcher dem eingeführten Stempel als Führung dient. Im nächsten Schritt wird die Hülle der Triaxialzelle aufgesetzt und die drei Gewindestangen werden leicht angezogen. Danach wird die Stellschraube beim Ödometergewicht nach oben geschraubt, damit der Ödometerarm nicht auf dem Boden aufliegt. Anschließend wird die Verbindung zwischen Probe und Kraftmessdose anhand des Stempels hergestellt. Bei der Fixierung der Kraftmessdose muss auf die zwei Rahmenfixierungen geachtet werden, um die zentrale Position oberhalb des Stempels gewährleisten zu können. Der Proband muss diese Interaktion zwischen der Kraftmessdose und der Rahmenfixierungen beachten, ansonsten kann es zur Durchbiegung der Gewindestange kommen. Erst nachdem beide Rahmenfixierungen in der richtigen Position liegen und die Kraftmessdose sich zentrisch oberhalb des Stempels befindet, werden die Gewindestangen angezogen. Danach können sämtliche Schrauben und Hülsen der Versuchseinrichtung festgeschraubt werden. Nach der Befestigung der Kraftmessdose wird der Boden der Triaxialzelle mit dem Unterboden des Ödometers mit zwei Schraubzwingen befestigt. Nachdem diese Schritte vorgenommen wurden, kann mit der Stellschraube das Gewicht auf die Triaxialzelle gebracht werden. Dazu wird die Schraube nach unten gedreht, sodass der starre Ödometerbalken frei schwebt. Des Weiteren sollte die Schraube einen Abstand zum Ödometerbalken und zu dem unten aufliegenden Gewicht haben. Der Proband kann anhand dieser Einstellung den Kraftverlauf mit der angeschlossenen Messtechnik nachverfolgen. Durch die Messung der Kraft kann die Spannung berechnet werden und eine Feinjustierung vorgenommen werden. Dies erfolgt durch das Herausdrehen oder Hineindrehen des Gegengewichtes. Zum Schluss wird der Wegaufnehmer positioniert und auf circa halbe Eindringlänge (2,5 cm) gestellt.

6 Proben aus Holz



Abb. 22 Prüfkörper aus Holz

Die ersten Vorversuche wurden mit einem Holzblock mit den Dimensionen 100 x 100 x 200 mm durchgeführt. Dieser wurde in die dynamische Versuchseinrichtung eingebaut und erprobt. Hierbei wurden insgesamt 40 unterschiedliche Versuche gefahren, wobei diverse Einstellungen erprobt worden sind. Es wurden alle drei Unwuchtpositionen, alle drei Laststufen und alle Frequenzen getestet. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt, um diverse Ausreißer in der Versuchsreihe eliminieren zu können. Somit ergibt sich für die ersten Versuche mit Holzzylinder eine Testanzahl von insgesamt 120 Versuchen. Aufgrund der Elastizität und des Steifemodules des Holzes wurden beim Wegaufnehmer geringe bis gar keine Ausschläge registriert und wurden daher auch nicht in der Auswertung berücksichtigt. Für die genauere Betrachtung wurden fünf Versuchsreihen ausgewählt, welche einen sinusartigen Kraft-Zeit-Verlauf aufwiesen:

- Test 16 – 18
- Test 31 – 33
- Test 46 – 48
- Test 61 – 63
- Test 76 – 78

6.1 Test 16 – 18

In Abb. 23 sind drei Testläufe mit denselben Applikationen abgebildet. Für diese Versuchsreihe wurde eine vertikale Belastung von $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Die Unwucht wurde auf Position 3 gestellt und die Frequenz beträgt 0,2 Hz.

Anhand der grafischen Auswertung der einzelnen Versuche kann Test 16 als Ausreißer deklariert werden, da er aufgrund seiner vergrößerten Amplitudenhöhe nicht zu Test 17 und Test 18 passt. Der ursprüngliche Kraftlevel von 2,36 kN wird jedoch bei allen drei Versuchen gehalten. Neben der Hauptschwingung tritt noch eine Subschwingung auf, welche grafisch aus Abb. 23 ausgelesen wurde. Vergleicht man hierbei die Auswertung aus Kapitel 11 der Fourier Analyse mit den Daten der grafischen Ausarbeitung, so erhält man unterschiedliche Ergebnisse. Die Fourier Analyse ist in der Auswertung genauer, weil jeder Messwert einem eigenen Zeitpunkt zugewiesen wird. Die Zeitskala wird anhand der Messrate berechnet. Im Programm Microsoft Excel kann eine solche exakte Zeitskala nicht definiert werden. Deshalb treten bei der graphischen Auswertung mehrere Werte zu einem Zeitpunkt auf. Die Fourier Analyse wurde vom Mittelwert MW der Kurven gebildet, jedoch wurden Ausreißer nicht beachtet:

Tab. 3 Frequenzen Test 16 - 18

Test	16	17	18	MW 16 - 18
Verfahren	grafisch	grafisch	grafisch	Fourier Analyse
Hauptschwingung [Hz]	0,2	0,2	0,2	0,2
Subschwingung [Hz]	5,0	5,0	5,0	4,6

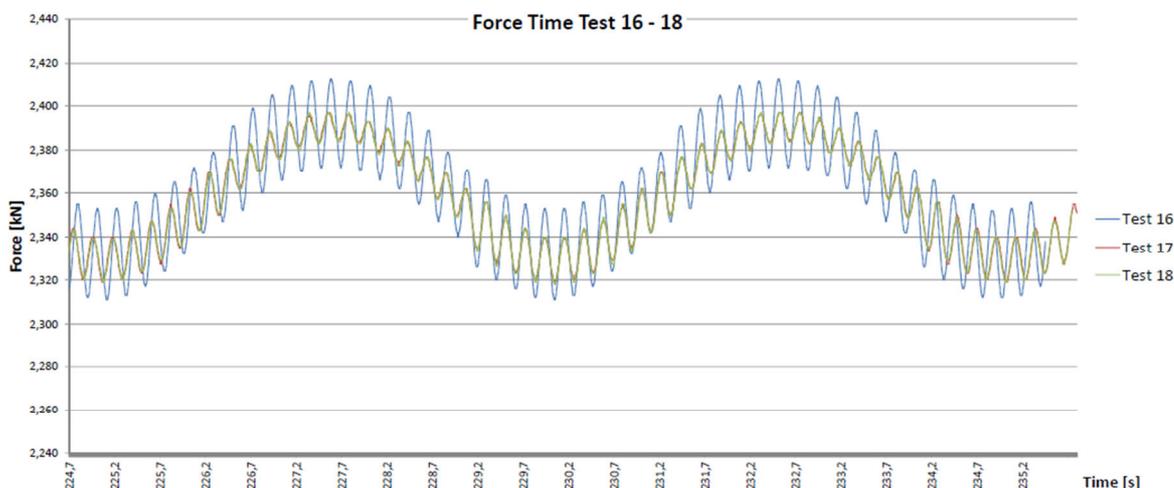


Abb. 23 Test 16 - 18

6.2 Test 31 – 33

Diese Versuchsreihe wurde mit den Einstellungen: $\sigma_1 = 500 \text{ kN/m}^2$, Unwuchtposition 2 und Frequenz 0,2 Hz durchgeführt. Aus der grafischen Aufbereitung der Versuche in der Abb. 24 lässt sich erkennen, dass die Amplitudenhöhen der Subschwingung von Versuch 31 bis Versuch 33 kontinuierlich zunehmen. Dieser Kraftzuwachs hatte ein Ausmaß von rund 5 N. Im unteren Kraftbereich ist die Subschwingungsamplitude größer als im maximalen Kraftbereich. Der Verlauf der Hauptschwingung und der Nebenschwingung stellt sich sinusförmig ein und hat folgende Frequenzen:

Tab. 4 Frequenzen Test 16 - 18

Test	31	32	33	MW 31 - 33
Verfahren	grafisch	grafisch	grafisch	Fourier Analyse
Hauptschwingung [Hz]	0,2	0,2	0,2	0,2
Subschwingung [Hz]	5,0	5,0	5,0	4,2

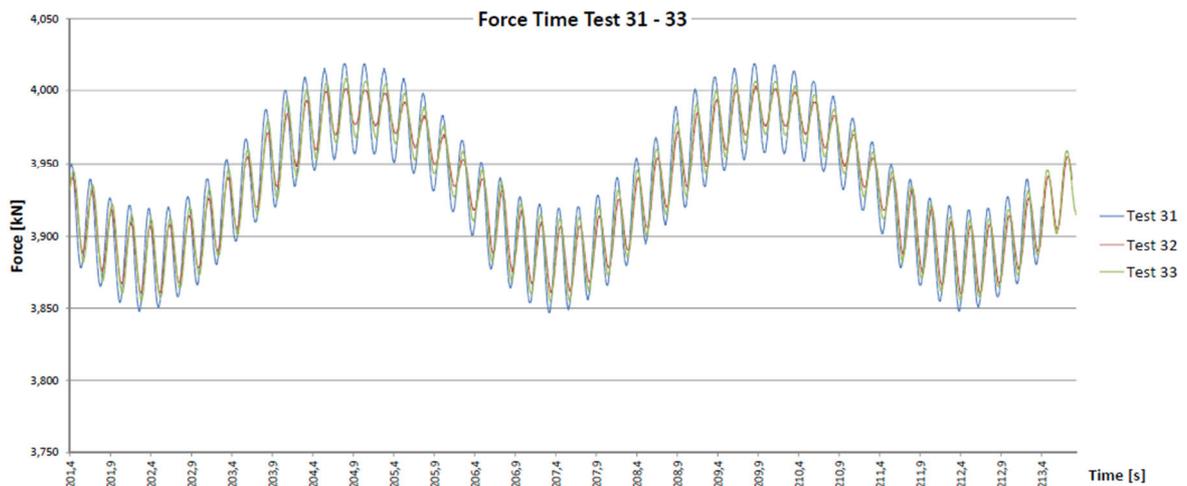


Abb. 24 Test 31 - 33

6.3 Test 46 – 48

Die folgende Versuchsreihe in Abb. 25 zeigt drei Testverläufe mit denselben Grundeinstellungen. Für diese Proben wurde eine vertikale Belastung von $\sigma_1 = 500 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Die Unwucht wurde auf Position 3 gestellt und die Frequenz beträgt 0,2 Hz.

Alle drei Proben weisen eine einheitliche Struktur der Haupt- und Nebenschwingungen auf. An den maximalen und minimalen Peak-Werten der Tests lassen sich die Subschwingung deutlich erkennen bzw. belegen. Die Subschwingungen treten mit einer jeweils erhöhten Amplitudenhöhe in diesen Bereichen auf. Aufgrund der grafischen Beurteilung und der mathematischen Fourier Analyse wurden die jeweiligen Frequenzen ermittelt:

Tab. 5 Frequenzen Test 46 - 48

Test	46	47	48	MW 46 - 48
Verfahren	grafisch	grafisch	grafisch	Fourier Analyse
Hauptschwingung [Hz]	0,2	0,2	0,2	0,2
Subschwingung [Hz]	5,0	5,0	5,0	4,1

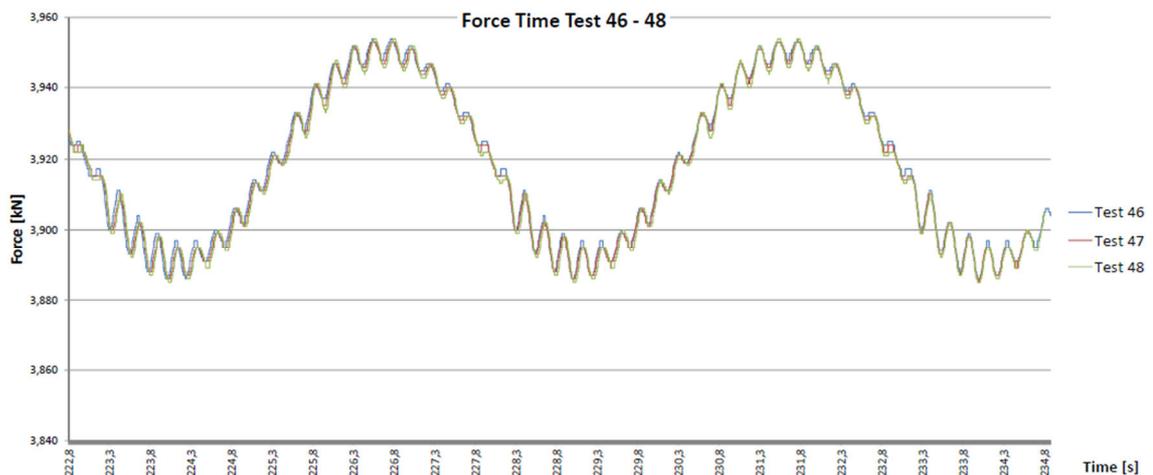


Abb. 25 Test 46 - 48

6.4 Test 61 – 63

Bei Test 61 bis 63 wurde mit einem Kraftlevel von 5,498 kN gearbeitet. Dies entspricht einer Spannung auf der Oberfläche von $\sigma_1 = 700 \text{ kN/m}^2$. Die Unwucht wurde auf Position 2 gestellt und die Frequenz beträgt 0,2 Hz.

Bei dieser Versuchsreihe sind alle drei Versuche ident. Sie unterscheiden sich minimal in der Amplitudenhöhe der Subschwingung. Diese Nebenschwingungen haben die größte Amplitudenhöhe am maximalen Peak.

Tab. 6 Frequenzen Test 61 - 63

Test	61	62	63	MW 61 - 63
Verfahren	grafisch	grafisch	grafisch	Fourier Analyse
Hauptschwingung [Hz]	0,2	0,2	0,2	0,2
Subschwingung [Hz]	5,0	5,0	5,0	4,0

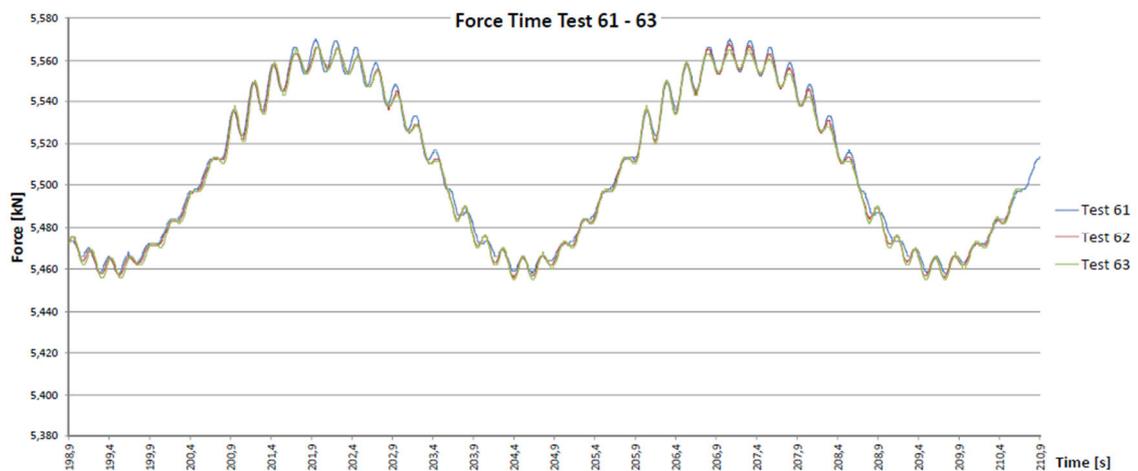


Abb. 26 Test 61 - 63

6.5 Test 76 – 78

Diese Versuchsreihe wurde mit den Einstellungen: $\sigma_1 = 700\text{kN/m}^2$, Unwuchtposition 3 und Frequenz 0,2 Hz durchgeführt. Aufgrund der grafischen Aufbereitung der Versuche wurde festgestellt, dass alle drei Versuche ident sind. Subschwingungen treten während des kompletten Versuchsablaufes auf. Die Amplitudenhöhe stellt sich an dem minimalen und am maximalen Peak etwa gleich groß ein.

Tab. 7 Frequenzen Test 76 - 78

Test	76	77	78	MW 76 - 78
Verfahren	grafisch	grafisch	grafisch	Fourier Analyse
Hauptschwingung [Hz]	0,2	0,2	0,2	0,2
Subschwingung [Hz]	5,0	5,0	5,0	4,0

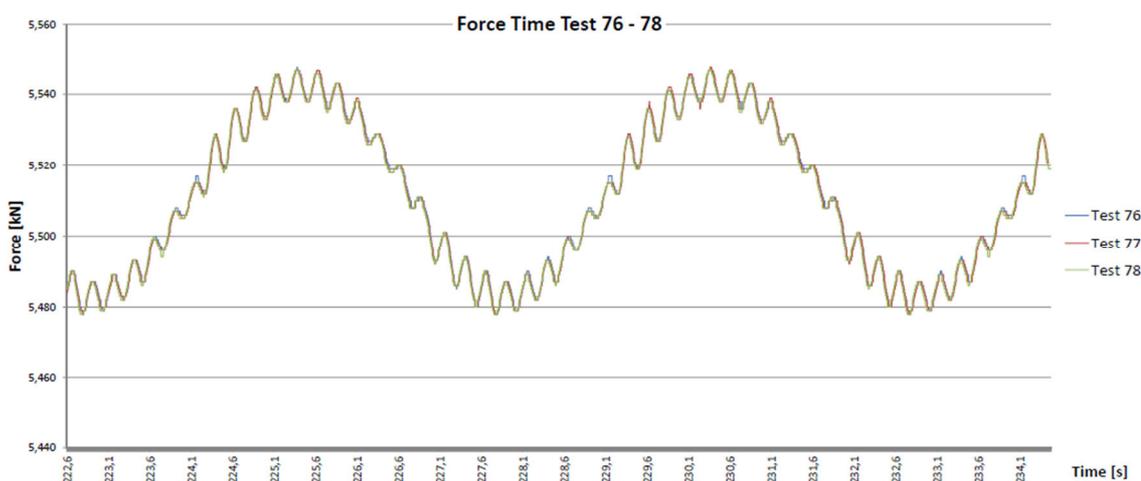


Abb. 27 Test 76 - 78

6.6 Resultat der Versuche mit Holzproben

In den vorher beschriebenen Versuchen aus Holz lässt sich ein sinusförmiger Kraft-Zeit-Verlauf erkennen. Jedoch gibt es neben der Hauptschwingung auch diverse Nebenschwingungen, die aus den grafisch aufbereiteten Diagrammen erkannt bzw. belegt und anhand der Fourier Analyse mathematisch berechnet werden können, siehe Kapitel 11. Teilweise haben die Subschwingungen ein beträchtliches Ausmaß im Verhältnis zur Amplitudenhöhe und Frequenz der Hauptschwingungen. Aus diesem Grund könnte das wahrscheinliche Verhalten einer Versuchsprobe nicht nur durch die Hauptschwingung, sondern auch durch die Nebenschwingung geprägt werden.

7 Proben aus XPS

Aufgrund der beobachteten Subschwingungen bei den Holzversuchen wurde ein neues Material zu Testzwecken herangezogen. Der neue Prüfkörper sollte eine geringere Steifigkeit aufweisen. Es wurden unterschiedliche Materialien in Betracht gezogen, wie z.B. EPS, Glasschaumgranulat und Wellpappenkarton. Der letztendlich für die Versuchsreihe ausgewählte Testkörper wurde aus XPS angefertigt und hatte die Abmessungen 100 x 100 x 200 mm.

Aufgrund der Testergebnisse der Versuche mit Holzzylinder wurden in der neuen Versuchsreihe Frequenzen im Bereich von 0,2 bis 0,6 Hz, die Unwuchtposition 2 und 3 und eine Belastung von $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$ erprobt. Eine Erhöhung der Belastung von $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$ auf $\sigma_1 = 500 \text{ kN/m}^2$ konnte nicht realisiert werden, da der XPS Prüfkörper dieser Beanspruchung nicht standhielt. Aus diesem Grund kam es zu einem Versuchsstopp beim Erreichen der Versuche mit $\sigma_1 = 500 \text{ kN/m}^2$. Insgesamt wurden 10 unterschiedliche Versuchseinstellungen jeweils dreimal am neuen Prüfkörper erprobt.

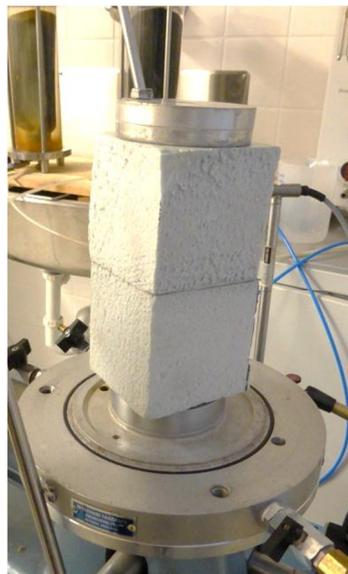


Abb. 28 Prüfkörper aus XPS

7.1 Test 121 - 123

Bei Test 121 bis 123 wurde mit einem Kraftlevel von 2,357 kN gearbeitet. Dies entspricht einer Spannung auf der Oberfläche von $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$. Die Unwucht wurde auf Position 3 gestellt und die Frequenz betrug 0,2 Hz.

In der Nähe des maximalen Peaks ist zu erkennen, dass die auftretenden Subschwingungen minimal sind. Mit abnehmender Kraft erhöht sich die Amplitude der Nebenschwingung um ein Vielfaches. Jedoch bleibt die Frequenz der Subschwingungen in jeder Lage ident.

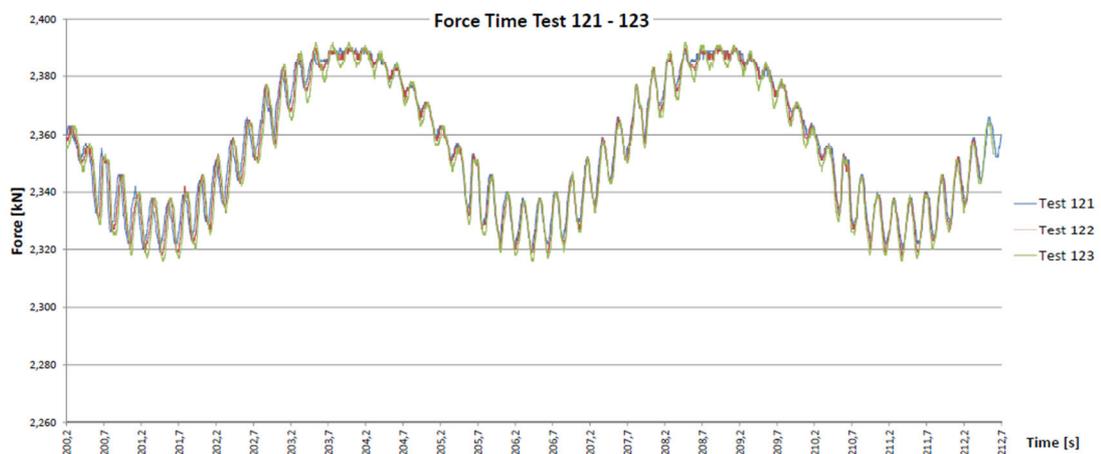


Abb. 29 XPS Probe 121 bis 123 – Auswertung

7.2 Test 133 - 135

Für die Versuche 133 bis 135 wurde eine vertikale Spannung von $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Die Unwucht wurde auf Position 3 gestellt und die Frequenz betrug 0,2 Hz.

Der Kraft-Zeit-Verlauf gem. Abb. 30 zeigt, dass der generelle Verlauf nicht sinusförmig ist. Es entstehen zwei Peaks im maximalen Bereich der Kraft während dem Vorgang. Diese sind in der Höhe ihres Ausschlages unterschiedlich groß. Der Verlauf des Testes 135 ist zu den anderen beiden Versuchen in der Höhe der Kraft unterschiedlich. Dieser weist in allen Punkten - im Vergleich zu den Versuchen 133 und 134 - eine gleich hohe aber verschobene Beanspruchung auf. Im Zuge des Versuches 135 dürften sich entweder die Gewichtscheiben auf der Ödometerseite oder das Gegengewicht verschoben haben. Dementsprechend wird Test 135 als Ausreißer deklariert.

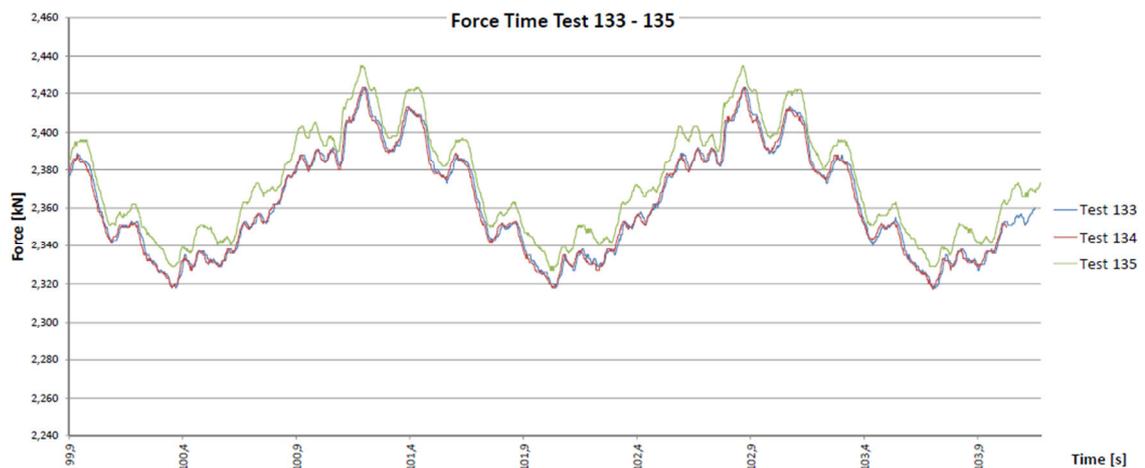


Abb. 30 XPS Probe 133 bis 135 – Auswertung

8 Vergleich der Proben aus Holz mit Proben aus XPS

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Proben aus Holz mit denen der Proben aus XPS verglichen werden, um Rückschlüsse auf die Ursachen der festgestellten Subschwingungen zu erhalten und um diese letztendlich aus dem System zu eliminieren. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften herangezogen.

8.1 Test 16 - 18, Test 121 - 123

In der Abb. 31 ist der Kraft-Zeit-Verlauf eines Holzblockes dargestellt. Darunter befindet sich die Abb. 32, wobei diese den Verlauf eines XPS Blockes zeigt. Für beide Versuche wurden die folgenden Einstellungen gewählt: $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$, Unwuchtposition 3 und eine Frequenz von 0,2 Hz.

Test 16 wurde als Ausreißer deklariert und es wurden lediglich die Versuche 17 und 18 für den folgenden Vergleich herangezogen. Die Gemeinsamkeiten von den Versuchen mit Holz und den Versuchen aus XPS liegen in der identen Frequenz der Hauptschwingung und der Subschwingungen. Die Nebenschwingungen beim Versuch aus Holz treten über einen Zyklus betrachtet annähernd mit der gleichen Amplitudenhöhe auf. Im Gegensatz hierzu flacht die Amplitudenhöhe am maximalen Peak des Versuches aus XPS ab. Die Subschwingung erreicht beim XPS Versuch im niedrigsten Kraftbereich ihre maximale Amplitudenhöhe.

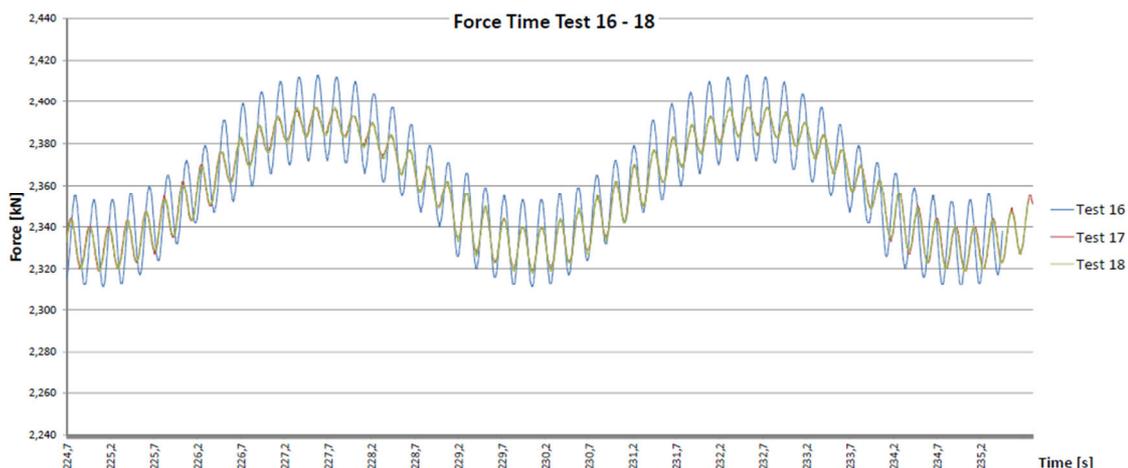


Abb. 31 Holz Probe 16 bis 18 – Auswertung

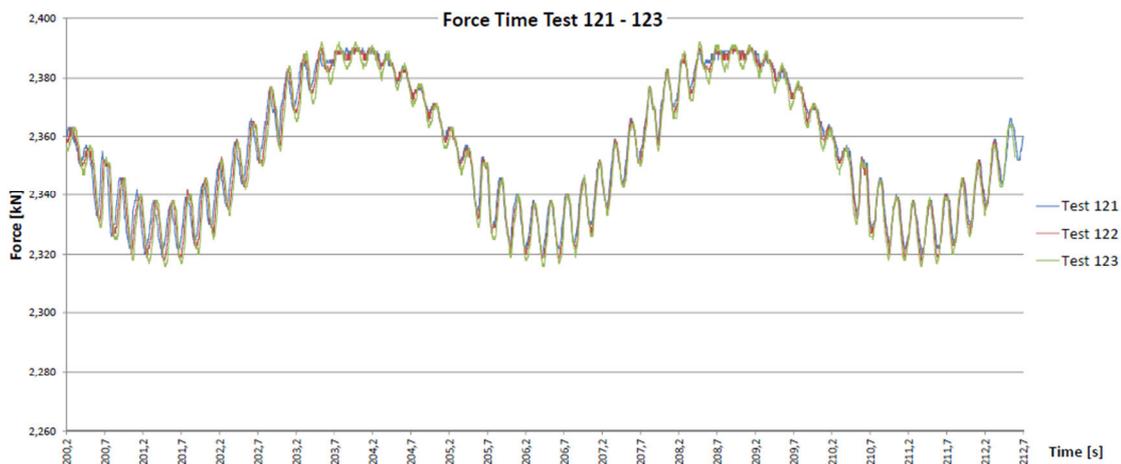


Abb. 32 XPS Probe 121 bis 123 – Auswertung

8.2 Test 22 - 24, Test 133 - 135

In der Abb. 33 ist der Kraft-Zeit-Verlauf eines Versuches mit einer Holzprobe dargestellt. Darunter befindet sich die Abb. 34, wobei diese die Ergebnisse eines Versuches mittels eines XPS Blockes zeigt. Für beide Versuche wurden die folgenden Einstellungen gewählt: $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$, Unwuchtposition 3 und eine Frequenz von 0,2 Hz.

Der Verlauf der Versuche mittels einer Probe aus Holz in Abb. 33 entspricht dem Verlauf des Versuches mittels einer Probe aus XPS in Abb. 34. Beide Versuche weisen deutliche gemeinsame Charakteristika, wie den doppelten Peak am Maximum der Kraft, auf. Ebenso ist der Kraft-Zeit-Verlauf beim Erreichen und beim Überschreiten des maximalen Peaks ähnlich. Die Subschwingungen treten sowohl beim Versuch mittels Holzproben als auch beim Versuch mittels XPS mit jeweils gleicher Amplitudenhöhe auf.

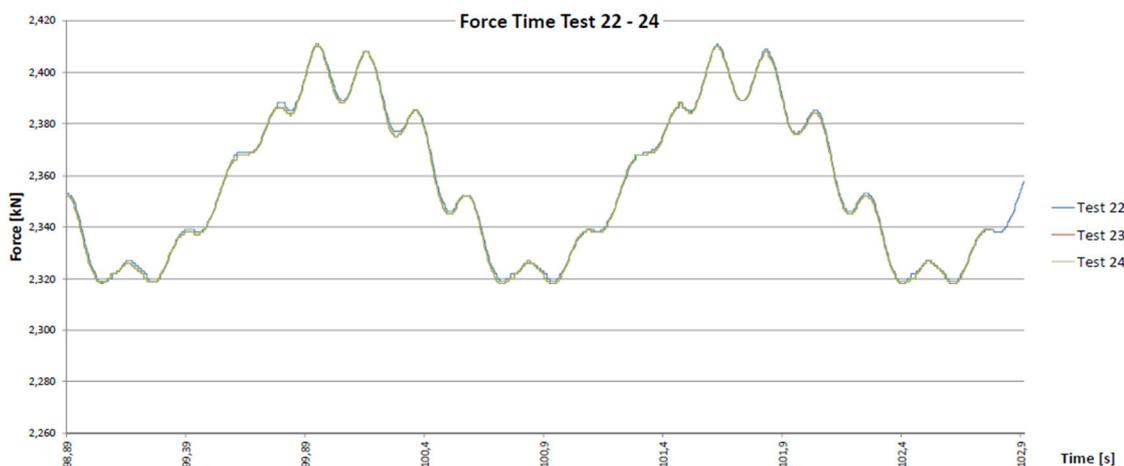


Abb. 33 Holz Probe 22 bis 24 – Auswertung

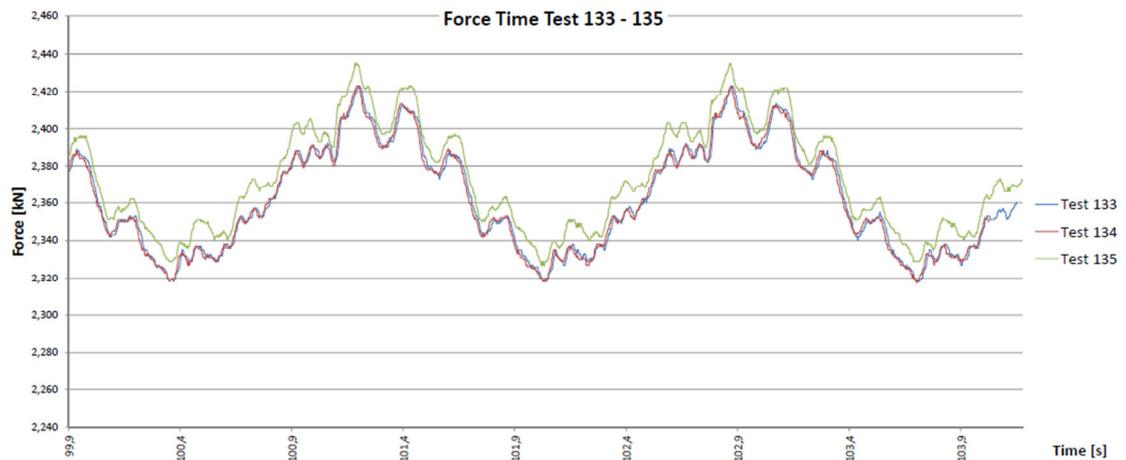


Abb. 34 XPS Probe 133 bis 135 – Auswertung

8.3 Resultat des Vergleiches

Die Auswertung der beiden Versuchsreihen mit Holz- bzw. XPS-Proben hat ergeben, dass die auftretenden Subschwingungen nicht die Ursache von zu hohen Steifigkeiten des Prüfkörpers sein können. Die Nebenschwingungen müssen daher andere Ursachen haben.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurden weitere Versuche am Holzblock, diesmal unter Zuhilfenahme von Beschleunigungssensoren, durchgeführt.

9 Beschleunigungssensoren

Im nächsten Abschnitt dieser Masterarbeit wurden an der Triaxialmaschine zwei Beschleunigungssensoren des Types PJM 3D 2g angebracht. Die durch die Beschleunigungssensoren gemessenen Verläufe wurden unter Zuhilfenahme des Messkraftverstärkers Quantum MX 840 A mit einer Messrate von 200 Hz aufgezeichnet. In den nachfolgenden Diagrammen stellt der rote Verlauf die Beschleunigung in der Messposition AC 1 und der blaue Verlauf die Beschleunigung in der Messposition AC 2 dar. Mit grüner Farbe wird in den Auswertungen der Kraftverlauf des Versuches dargestellt. Die Versuche wurden an einem Holzblock durchgeführt, wobei zwei unterschiedliche Positionen für die Beschleunigungssensoren definiert wurden:

9.1 Messschema 1

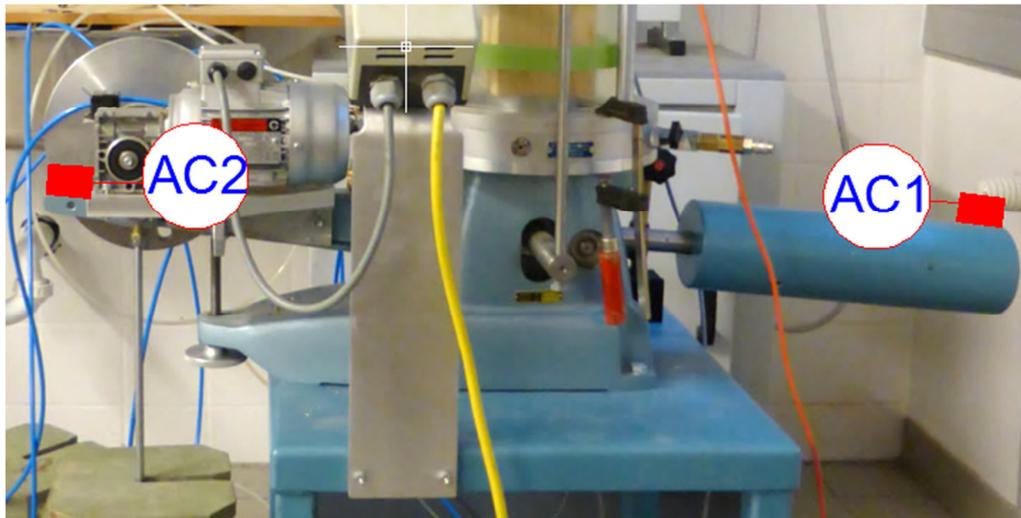


Abb. 35 Beschleunigungssensor – Messschema 1

Die Adaption der Maschine war, aufgrund der noch vorhandenen Subschwingungen bei den Versuchen mittels XPS-Proben, notwendig. Unter Zuhilfenahme der Beschleunigungssensoren wurde das Verhalten des starren Balkens bei Belastung des Holzblockes beobachtet. Es bestand Grund zur Annahme, dass das Gegengewicht, durch den zu filigranen Ausleger, von der Unwucht angeregt wird und so die Subschwingungen in der Triaxialzelle erzeugt werden. In der Position 1 wurde der Beschleunigungssensor AC 1 am Gegengewicht und der Beschleunigungssensor AC 2 am anderen Ende des starren Balkens hinter dem elektrischen Motor angebracht, siehe Abb. 35. Im Zuge des Messschemas 1 wurden zwölf Versuchseinstellungen gem. Tab. 8 definiert.

Tab. 8 Beschleunigungssensor Messschema 1, Testreihe

Test	Unwuchtposition	σ_1 [kN/m ²]	Frequenz [Hz]	AC 1 Frequenz [Hz]	AC 2 Frequenz [Hz]
151	3	300	0,2	24	24
152	3	300	0,3	24	24
153	3	300	0,4	24	24
154	3	300	1,0	24	24
155	3	500	0,2	24	24
156	3	500	0,3	24	24
157	3	500	0,4	24	24
158	3	500	1,0	24	24
159	3	700	0,2	24	Rauschen
160	3	700	0,3	24	24
161	3	700	0,4	24	24
162	3	700	1,0	24	24

9.1.1 Test 151

Anhand der Anbringung der Beschleunigungssensoren gem. Abb. 35 Position 1 wurde das vermutete Aufschaukeln der Gewichte untereinander erforscht. Aus dem Versuch Nr.: 151, Abb. 36, ist abzuleiten, dass sich die Beschleunigungsamplituden und die Beschleunigungsfrequenz der beiden Punkte gegengleich verhalten. Kurz vor dem minimalen Kraftniveau kommt es zu mehreren größeren Beschleunigungsausschlägen in beiden Messpunkten. Am maximalen Kraftniveau des Versuches erfolgt auch die maximale Beschleunigung in der Messposition AC 1.

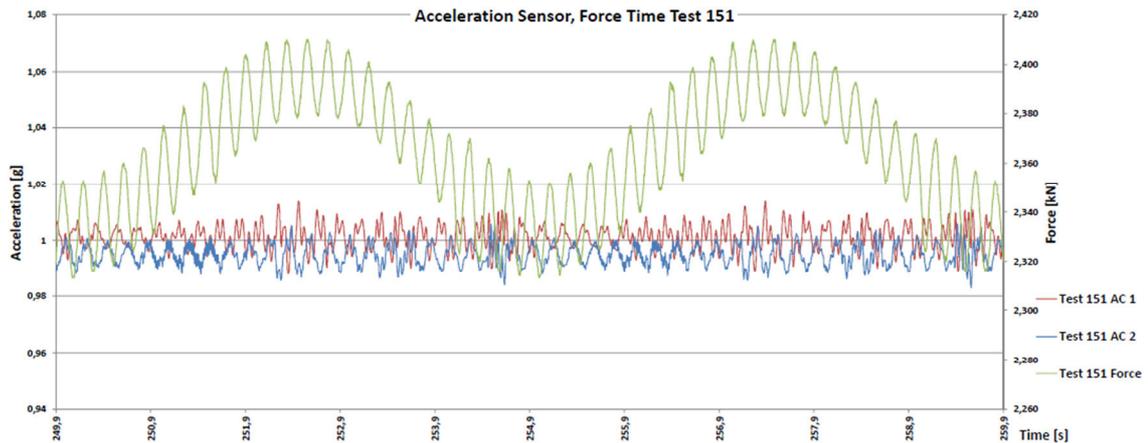


Abb. 36 Beschleunigungssensor – Auswertung Test 151, Messschema 1

9.1.2 Test 160

Der Versuch 160 unterscheidet sich deutlich von der beim Test 151 festgestellten gegengleichen Schwingung. In der Abb. 37 ist zu erkennen, dass der Beschleunigungssensor AC 1 eine höhere Amplitude aufweist als der Beschleunigungssensor AC 2. Der Verlauf der Beschleunigung entlang der Zeit tritt in einem regelmäßigen Muster auf, jedoch besitzt diese Kurve keine einheitliche Amplitudenhöhe. Des Weiteren ist die Beschleunigung, in Bezug auf den Kraftverlauf, phasenverschoben und tritt verzögert auf. Der Beschleunigungssensor an der Stelle AC 2 befindet sich am Ödometergewicht, welches unterhalb des elektrischen Motors hängt. Dieser weist eine gewisse Regelmäßigkeit in der Frequenz und Höhe der Amplitude auf. Der maximale Ausschlag der Beschleunigung in diesem Punkt tritt kurz nach dem Erreichen des maximalen Kraftniveaus auf. Der Beschleunigungssensor AC 1 hat zum gleichen Zeitpunkt wie der Beschleunigungssensor AC 2 die maximale Beschleunigung. Die Subschwingsfrequenz des Kraft-Zeit-Verlaufes beträgt 5 Hz. Anhand der Auswertung des Versuches kann von einem gegenseitigen Aufschaukeln der beiden Gewichte ausgegangen werden.

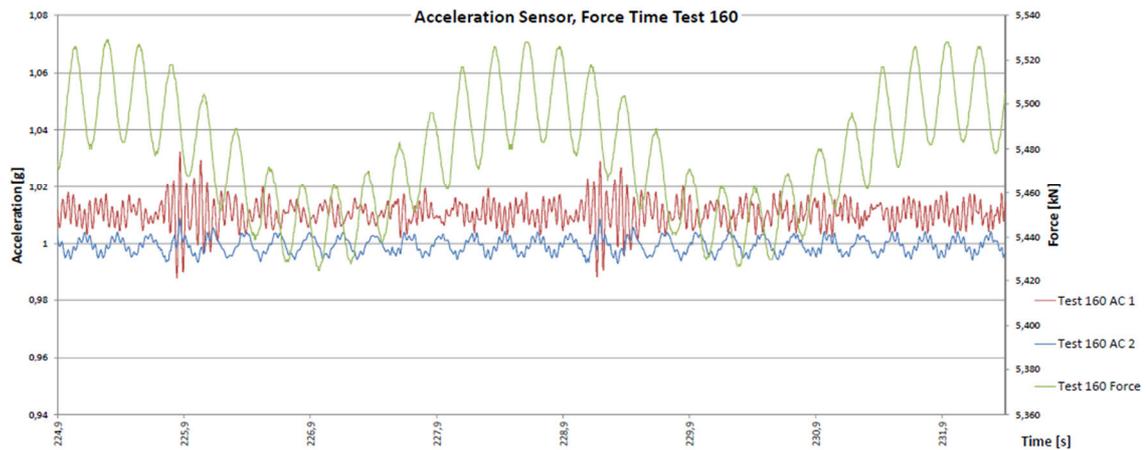


Abb. 37 Beschleunigungssensor – Auswertung Test 160, Messschema 1

9.2 Messschema 2

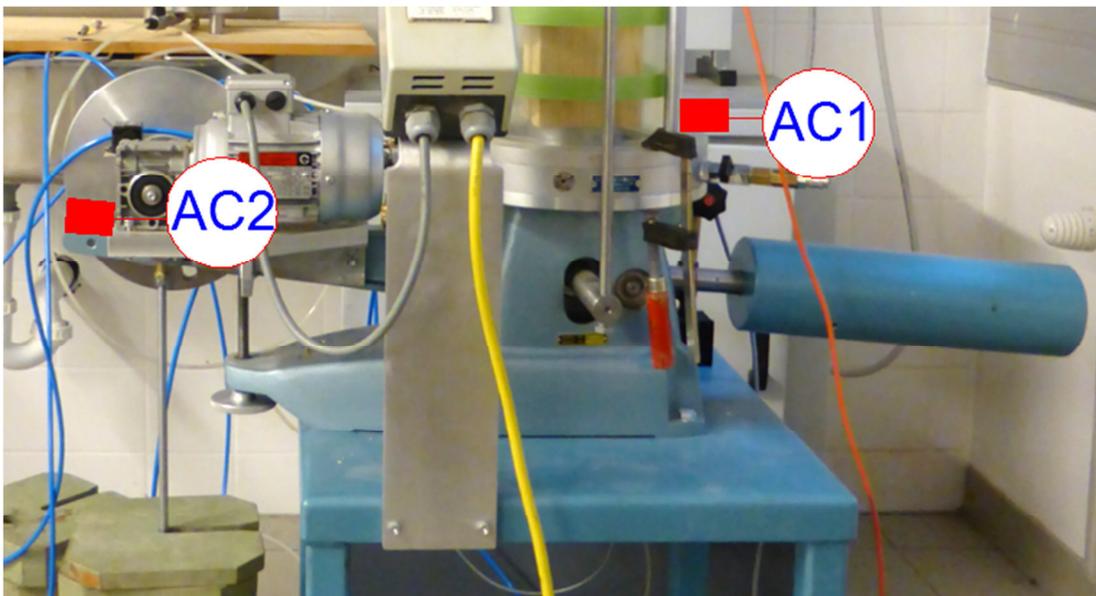


Abb. 38 Beschleunigungssensor – Messschema 2

Nachdem ein gegenseitiges Aufschaukeln der beiden Gewichte erforscht und belegt wurde, wurde der Beschleunigungssensor AC 1 in seiner Lage verschoben und vom Gegengewicht auf die Triaxialzelle verlegt, siehe Abb. 38, um eine mögliche Beschleunigung des Gehäuses wahrnehmen zu können. Der Beschleunigungssensor AC 2 wurde in seiner Lage zum Messschema 1 nicht verändert. Es wurden zwölf unterschiedliche Messeinstellungen erprobt, gem. Tab. 9.

Tab. 9 Beschleunigungssensor Messschema 2, Testreihe

Test	Unwuchtposition	σ_1 [kN/m ²]	Frequenz [Hz]	AC 1 Frequenz [Hz]	AC 2 Frequenz [Hz]
163	3	500	0,2	24 und Rauschen	24
164	3	500	0,3	24 und Rauschen	24
165	3	500	0,4	24	24
166	3	500	1,0	24	24
167	3	300	0,2	24 und Rauschen	24 und Rauschen
168	3	300	0,3	24	24
169	3	300	0,4	24	24
170	3	300	1,0	24	24
171	3	700	0,2	Rauschen	24
172	3	700	0,3	24 und Rauschen	24
173	3	700	0,4	24	24
174	3	700	1,0	24	24

9.2.1 Test 163

In Abb. 39 ist festzustellen, dass die maximalen Amplituden beider Beschleunigungssensoren zur gleichen Zeit stattfinden. Jedoch ist die Amplitudenhöhe des Beschleunigungssensors AC 2 höher als jene des Beschleunigungssensors AC 1. Aufgrund der Lage des Beschleunigungssensors AC 1 und der gewählten Frequenz erfährt die Triaxialzelle minimale Beschleunigungen. Lediglich nach Erreichen des Kraftmaximums kommt es zu einem Ausschlag beim Beschleunigungssensor AC 1 von 0,004 g und beim Beschleunigungssensor AC 2 von 0,01 g im Beschleunigungsprofil beider Sensoren.

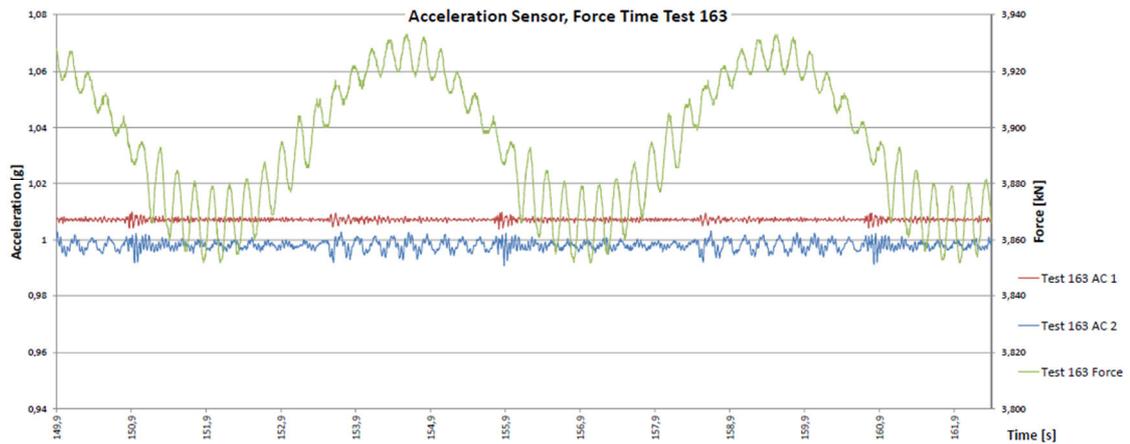


Abb. 39 Beschleunigungssensor – Auswertung Test 163, Messschema 2

9.2.2 Test 170

Abb. 40 zeigt einen Versuch mit einem dynamischen Kraftverlauf mit einer Frequenz von 1,0 Hz. Aufgrund dieser hohen Beanspruchung kommt es zu einem unregelmäßigen Beschleunigungsverlauf von den Beschleunigungssensoren AC 1 und AC 2. Der Verlauf der Beschleunigung entlang der Zeit tritt in einem regelmäßigen Muster auf und wiederholt sich mit jedem dynamischen Zyklus. Die Kurve des Beschleunigungssensors AC 2 weist keine einheitliche Amplitudenhöhe auf. Der Beschleunigungssensor AC 1, welcher auf der Triaxialzelle befestigt wurde, erfährt im Gegensatz zum Versuch 163, Abb. 39, kontinuierlich Beschleunigungen. Des Weiteren ist die Beschleunigung, in Bezug auf den Kraftverlauf, phasenverschoben und tritt verzögert auf.

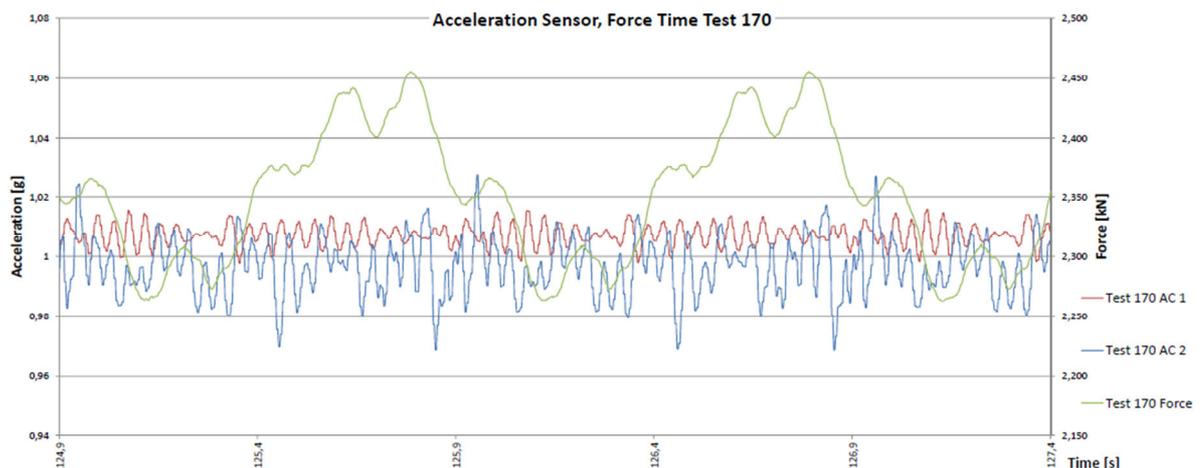


Abb. 40 Beschleunigungssensor – Auswertung Test 170, Messschema 2

9.3 Resultat der Beschleunigungsmessungen

Anhand der Auswertung der Testreihen sind die vorhandenen Subschwingungen auf den Aufbau des dynamischen Triaxialgerätes zurück zu führen. Hierbei dürfte der elektrische Motor mit Getriebe auch eine wichtige Rolle spielen. Wie in den Auswertungen ersichtlich ist, tritt die maximale Amplitude der Beschleunigung erst nach dem Auftreten der maximalen dynamischen Kraft ein. Dieser Beschleunigungsverlauf ist zeitlich nach hinten phasenverschoben, sodass die maximale Beschleunigung beim Runtergehen des Unwuchtgewichtes entsteht. Nach Erreichen des maximalen Kraftniveaus schlägt das Zahnrad im Getriebe des elektrischen Motors durch. Beim Ansteigen der Kraft gibt es in den Zahnrädern einen stetigen Kontakt, sodass das Gewicht nach oben bewegt wird. Nachdem das Gewicht den höchsten Punkt erreicht hat, schlägt das Zahnrad aufgrund des Spieles durch. Das Zahnrad fällt auf den darunter liegenden Zahn im Getriebe und verursacht eine zusätzliche dynamische Beanspruchung, welche die Versuchsreihen negativ beeinflussten.

Die auftretenden Subschwingungen können nicht verhindert werden, jedoch kann man die vermeidliche Amplitudenhöhe reduzieren, indem man die dynamische Belastung bei einer niederfrequenten Hertzzahl definiert.

10 Proben aus Sand

Der Versuchssand wurde für das Labor vom Bodenmechanik und Grundbau Institut der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellt. Die Proben werden manuell gesättigt, konsolidiert und belastet. Für sämtliche Prüfkörper gelten die Anforderungen eines CU Versuches. Es wird von einer vollkommen gesättigten Probe ausgegangen, sodass sich das Volumen der Probe während des Versuches nicht verändert. Ausgang B, welcher für die Sättigung und Drainage zuständig ist, wird geschlossen. Über den Zugang D wird der Porenwasserdruck im Fußpunkt der Probe gemessen.

10.1 Versuchsaufbau

Der Sand wird mit einem Wassergehalt w von 15 % in die Versuchsschalung eingebaut, Abb. 41.



Abb. 41 Versuchssand mit 15% Wassergehalt

Zuerst wird die Membrane auf den unteren Sockel der Triaxialzelle aufgezogen. Diese wird mittels eines O-Ringes unterhalb befestigt. Anschließend wird ein Filterstein eingebracht und die Probenschalung wird anhand der Feststellschrauben auf dem Boden der Triaxialzelle befestigt. Danach wird die Membrane entlang der Schale nach oben gezogen und unter Vakuum glatt gestrichen. Dieses Vakuum ist notwendig, damit sich die Membrane vollständig an die Halbschalen anlegt und die Probe eingebaut werden kann. Des Weiteren wird ein Vakuum entlang des Sättigungs – bzw. Drainageweges gelegt. Bei der Befüllung des Sandes in die Form bleibt dieser Zugang

jedoch verschlossen. Dieser wird erst dann geöffnet, nachdem der Deckel auf die Probe aufgesetzt und die Membrane umgeschlagen wird. Schon vor dem Umschlagen der Membrane muss das Vakuum über den Zugang B im Boden der Triaxialzelle aufrechterhalten werden, siehe Abb. 42.

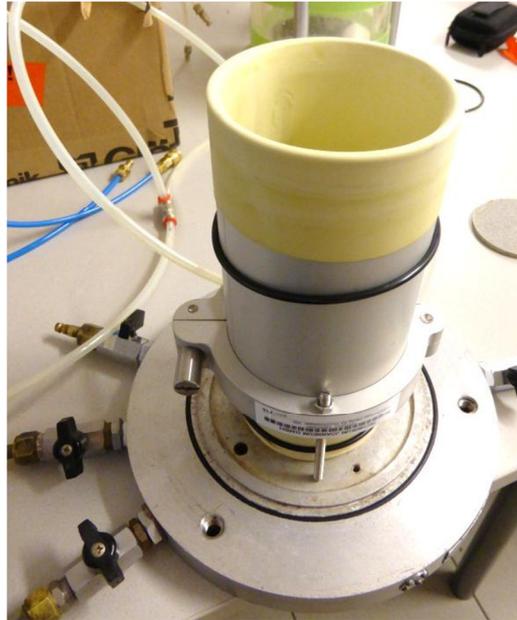


Abb. 42 Einbau der Probe aus Sand

Zur Verdichtung der Probe aus Sand wurden mehrere Versuche gestartet. Das Einbringen des Sandes mit Proctordichte war ungeeignet, da der Prüfkörper aus der Proctorschalung nicht ausgebaut werden konnte. Der Versuch den Sand mit dem Gewicht des Proctorversuchs von Hand einzubauen wurde ebenfalls fallen gelassen, weil die Membrane auf Höhe des unteren Filtersteines permanent gerissen ist. Schlussendlich wurde die Sandprobe lagenweise in die Schalung eingebaut und von Hand verdichtet. Zur Verdichtung des Sandes wurde ein zylinderförmiges Kunststoffgefäß, welches ein Gewicht von 500 g aufwies, verwendet. Durch die glatte Oberfläche und abgerundete Kanten des Kunststoffgefäßes ist es möglich, eine Probe aus Sand herzustellen ohne die Membrane zu beschädigen.

Nachdem die Probe verdichtet wurde, konnte auf diese ein Filterstein und die Druckkappe aufgelegt werden. Ab diesem Zeitpunkt wird das Vakuum zusätzlich durch den Sättigungs- bzw. Drainagekanal aufrechterhalten. Die Membrane wird nach oben geklappt und mit den O- Ringen befestigt. Die Schalung kann nun entfernt werden und man baut den Boden der Triaxialzelle in die Versuchseinrichtung wieder ein. Nachdem die Triaxialzelle geschlossen ist, wird anhand des Zuganges C Wasser in diese eingelassen. Wichtig hierbei ist es die Belüftung auf der Oberseite der Triaxialzelle zu

öffnen, damit die Luft entweichen kann. Nachdem die Zelle mit Wasser gefüllt ist, kann die Belüftung geschlossen und das Vakuum abgestellt werden. Anschließend müssen beide Ballone vollständig gefüllt werden, um die Sättigungs- und Konsolidierungsphase durchführen zu können.

10.2 Sättigung

Das Sättigen erfolgt unter Hilfenahme eines manuellen Schaltpultes der Firma Wille. Bei diesem Schaltpult gibt es jeweils drei Ausgänge. Der Erste befindet sich rechts unten und gibt lediglich Luftdruck ab. Daneben befinden sich zwei weitere idente Ausgänge, die am Schaltpult mit Einlauf und Auslauf bezeichnet sind. Diese beiden Anschlüsse können eine bestimmte Menge an Wasser mit einem definierten Druck abgeben. Die bei diesen zwei Ausgängen sich darüber befindlichen drei Gefäße heißen: Kammer, Vorrat und Bürette. Die sich im Inneren befindliche Bürette umfasst ein Volumen von 50 ml und besitzt eine Skala. Um die Bürette herum befindet sich ein größeres Rohr, das als Kammer bezeichnet wird. Die Kammer beinhaltet ein Volumen von rund 300 ml. Im unteren Bereich des Gefäßes befindet sich der sog. Vorrat, der ein Volumen von ebenfalls 50 ml aufweist.



Abb. 43 Ballons

Der Zelldruck der Triaxialzelle wird durch den direkten Luftdruckanschluss geregelt, der den Ballon, welcher für den Zelldruck zuständig ist, aufbläst. Durch den gewählten Druck am Manometer wird der Ballon aufgeblasen und drückt das Wasser entlang des Schlauches zum Eingang des Bodens der Triaxialzelle, wobei die Verbindung diesfalls über den Anschluss C erfolgt. Die Öffnung des Anschlusses C erfolgt über einen Sperrhahn.

Für die Sättigung wird die Bürette beim Ausgang Auslauf entleert und mit Luft gereinigt. Aufgrund der leeren Bürette im Auslauf kann entlang der Schnellkupplung am unteren Ende des Schaltpultes ein definierter Luftdruck entweichen. Dieser kann über das Manometer beim Auslauf geregelt werden. Dieser Luftanschluss führt zum anderen Ballon und presst das Wasser weiter zum Anschluss Position B im Boden der Triaxialzelle. Die Sättigung erfolgt durch das Öffnen des Sperrhahnes beim Anschluss B. Nur wenn der Ballon ausreichend mit Wasser gefüllt worden ist, reicht das Volumen aus um die Probe zu sättigen. Der Sättigungsgrad wird anhand des Skempton B Faktors bestimmt.

$$B = \frac{\Delta u}{\sigma_3} \quad (2)$$

Ein Wert von 1 bedeutet, dass die Probe zu 100 % gesättigt ist.

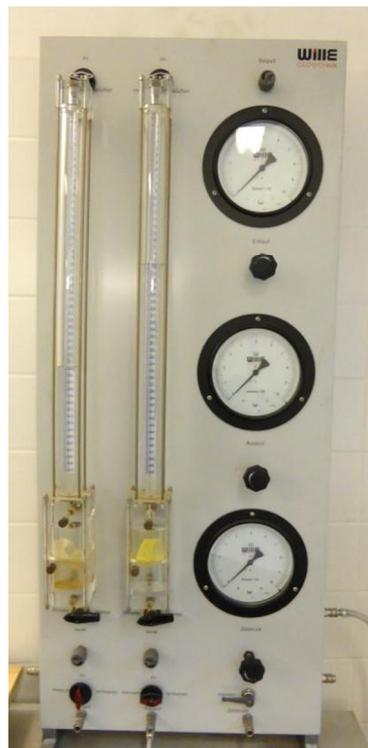


Abb. 44 Triaxialschaltpult WILLE LT 1000

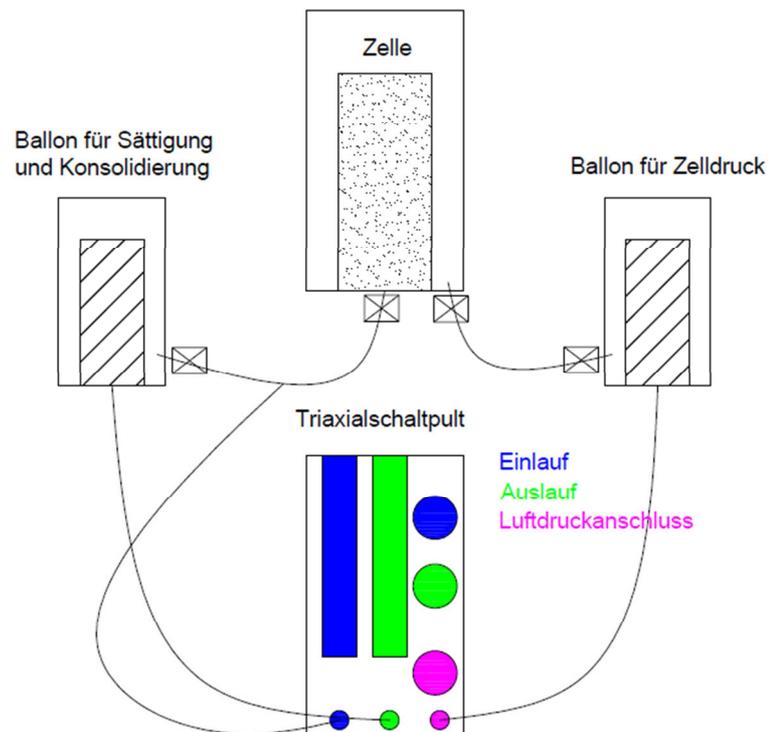


Abb. 45 Schemaskizze des Aufbaues

10.3 Konsolidierung

Mit der Konsolidierung wird erst dann begonnen, wenn die Probe einen bestimmten Sättigungsgrad aufweist. Der Sättigungsgrad für Proben aus Sand liegt laut Literatur bei 95 %² bzw. 97 %³. Aufgrund der Beschaffenheit des Sandes und der notwendigen Zeit wurde für die Kalibrierungsversuche bei den Proben aus Sand ein Sättigungsgrad von 90 % angepeilt. Konsolidiert wird mit einer effektiven Spannung von 100 kPa, welche auf die Probe aufgebracht wird.

Aufgrund der Spezifikation, dass die Probe über den Anschluss B gesättigt und drainiert wird, muss der Porenwasserdruck durch den Einlaufanschluss des Triaxialschaltpultes gewährleistet werden. Die Bürette des Einlaufes sollte bis auf 30 ml Wasser gefüllt sein, da beim Öffnen das Wasser in die Leitung übergeht.

Um das austretende Wasservolumen aus der Probe messen zu können wurde der Sättigungsschlauch mit einer T Kreuzung versehen. Ein Anschluss geht direkt in

² Kumar, S.S; Krishna, A.M.; Dey, A.; Dynamic soil properties of Brahmaputra sand using Cyclic Triaxial tests, north east students geo-congress on advances in geotechnical engineering.

³ La Vielle, T.H.; Liquefaction susceptibility of uncemented calcareous sands from Puerto rico by cyclic triaxial testing.

Eingang B und der zweite in den Schnellkupplungseingang des Einlaufes. Der nötige Backpressure kann trotz der Anbindung an den Anschluss Bürette Einlauf nicht erhalten werden.

10.4 Probe aus Sand Test 175

Die Sättigung erfolgte in mehreren Stufen, wobei in den ersten drei Tagen kein Sättigungsgrad bestimmt wurde, siehe Tab. 10. Die Sättigung der Probe erreicht einen Wert von 87 % in den ersten vier Tagen. Eine anschließende zwei Tage andauernde Sättigungsphase erhöhte den Sättigungsgrad um lediglich 2 % auf 89 %. Aufgrund der zeitlichen Rahmenbedingungen, der Tatsache des Erstversuches und der Erprobung der Einstellungen für das Triaxialschaltpult wurde die Probe Nr.: 175 nicht weiter gesättigt.

Tab. 10 Sättigung - Probe 175

Datum	Zeit	Zelldruck [kPa]	Sättigungsdruck [kPa]	PWD [kPa]	Differenz [kPa]	B-Wert
25.08.2015	14:49	200	190	-	-	-
26.08.2015	12:44	300	290	-	-	-
27.08.2015	09:25	400	390	-	-	-
28.08.2015	10:33	500	490	488,4		
		600	-	554,9	66,5	0,67
29.08.2015	09:30	700	690	688		
		800	-	775,1	87,1	0,87
31.08.2015	10:10	700	690	688,2		
		800	-	777	88,8	0,89

Aufgrund der fehlenden Sättigungswerte in den ersten drei Phasen kann die Konsolidierungskurve lediglich den letzten Teil der Sättigungsphase widerspiegeln.

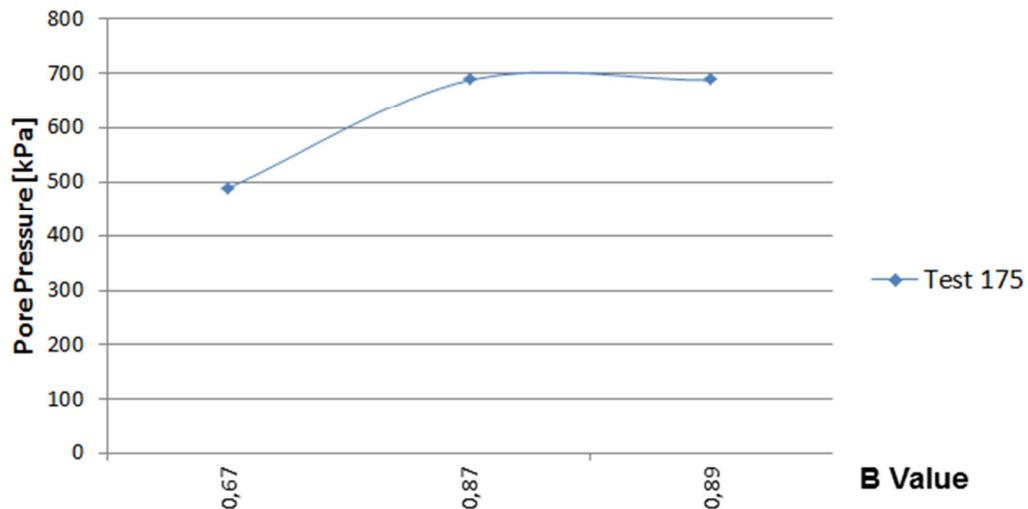


Abb. 46 Sättigung – Test 175

Nachdem eine Sättigung von 89 % erreicht ist, kann von einer teilgesättigten Probe ausgegangen werden. Nun wird die Konsolidierungsphase eingeleitet, sodass eine effektive Spannung auf die Probe einwirkt. Dadurch kommt es zu einer Volumensänderung in der Probe, welches unter anderem den Sättigungsgrad und den Porenwasserdruck verändert. Beim ersten Versuch, die effektive Spannung auf die Probe aufzubringen, geschah Folgendes:

Der Zelldruck wurde auf 700 kPa belassen und der Sättigungsdruck wurde auf 600 kPa gesenkt. Um die Menge des austretenden Wassers messen zu können wurde der Sättigungsschlauch mit einer T-Kreuzung versehen. Ein Anschluss geht direkt in Eingang B und der Zweite geht in den Schnellkupplungseingang des Einlaufes. Jetzt wurden der Zelldruck durch den Zelldruckausgang des Schaltpultes und der Sättigungsdruck vom Auslauf des Schaltpultes auf die Probe gesetzt. Durch die T-Kreuzung kam es jedoch zu einem direkten Druckaustausch zwischen Einlauf und Auslauf des Triaxialschaltpultes. Dadurch wurde die Bürette des Einlaufes mit dem Wasser des Ballons gefüllt und der Wasseraustritt aus der Probe konnte nicht eindeutig gemessen werden. Nach Auftreten dieses Ereignisses wurde sofort die Konsolidierung abgebrochen und eine weitere Sättigungsrate bestimmt. Die Sättigungszahl fiel durch den Zwischenfall von 89 % auf 81 %. Der Prüfkörper befand sich bereits im Konsolidierungsvorgang und die Ergebnisse der Volumensänderung liegen nicht vor.

Um dem Kurzschluss zwischen dem Einlauf und dem Auslauf des Triaxialschaltpultes zu vermeiden, wurde die Probe auf einen Porenwasserdruck von 30 kPa in der Sättigungsphase heruntergefahren. Dieser Sättigungsdruck wird durch den Anschluss

Einlauf hergestellt. Hierbei muss der Wasserablauf des Ballons für Sättigung und Drainage geschlossen werden, um den Druckkurzschluss zu verhindern. Eine effektive Spannung von 100 kPa ist angestrebt und dementsprechend wurde der Zelldruck auf 130 kPa reduziert. Aufgrund der letzten Zelldruckspannung von 700 kPa musste die Probe langsam auf den definierten Druck herunter gesteuert werden. Der Sättigungsdruck wurde parallel zum Zelldruck (jeweils 100 kPa alle 10 Minuten) kontinuierlich heruntergefahren. Um schlussendlich den niedrigeren Druck herstellen zu können, wurde der Zulauf des Luftdruckes zum Triaxialschaltpult nicht gänzlich geöffnet und im Zuge der Konsolidierung schwankte der Zelldruck somit um ± 30 kPa.

Aufgrund der Tatsache, dass der erste Teil der Konsolidierung nicht aufgezeichnet werden konnte, wurde der Vorgang nach einem Tag abgebrochen und mit der Lastaufbringung begonnen.

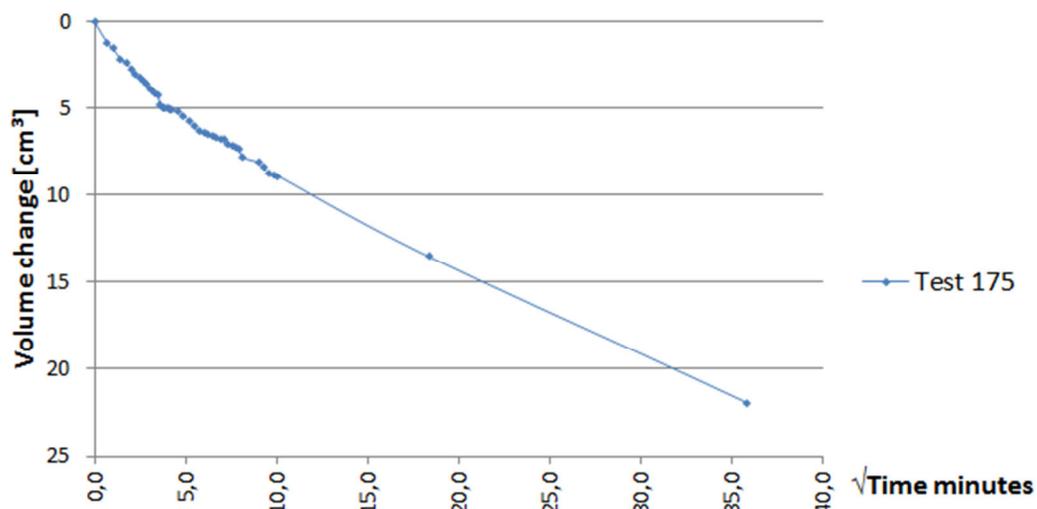


Abb. 47 Konsolidierung – Test 175

In Abb. 51 ist ein dynamischer Triaxial Kraft-Zeit-Verlauf dargestellt, welcher einen regelmäßigen Zyklus durchläuft. Die Messrate des Messkraftverstärker wurde für die Kanäle Kraft, Zeit und Druck auf 600 Hz gestellt. Der Versuch wurde mit den Einstellungen: $\sigma_1 = 300$ kN/m², $\sigma_3 = 150$ kN/m², Unwuchtposition 3 und Frequenz 0,2 Hz durchgeführt. Diese Parameter wurden entsprechend der Vorversuche gewählt. Der Prüfkörper wurde insgesamt drei Stunden dynamisch belastet, bevor eine weitere Steigerung von σ_1 auf 400 kPa erfolgte. Im Zuge der Laststeigerung ist die Probe abgesichert.



Abb. 48 Hebelsarm des Ödometers nach Steigerung σ_1 auf 400kPa

Dennoch ist der Kraft-Zeit-Verlauf der ersten drei Stunden vorhanden, welcher in den folgenden Abbildungen dokumentiert ist. Nach der zweiten Testminute wurde die Vertikalspannung von $\sigma_1 = 300 \text{ kN/m}^2$ aufgebracht.

Neben der vorhandenen Hauptschwingung treten während des Versuches auch Subschwingungen auf. Am oberen Peak sind die vorhandenen Amplitudenhöhen der Subschwingung minimal, siehe Abb. 49.

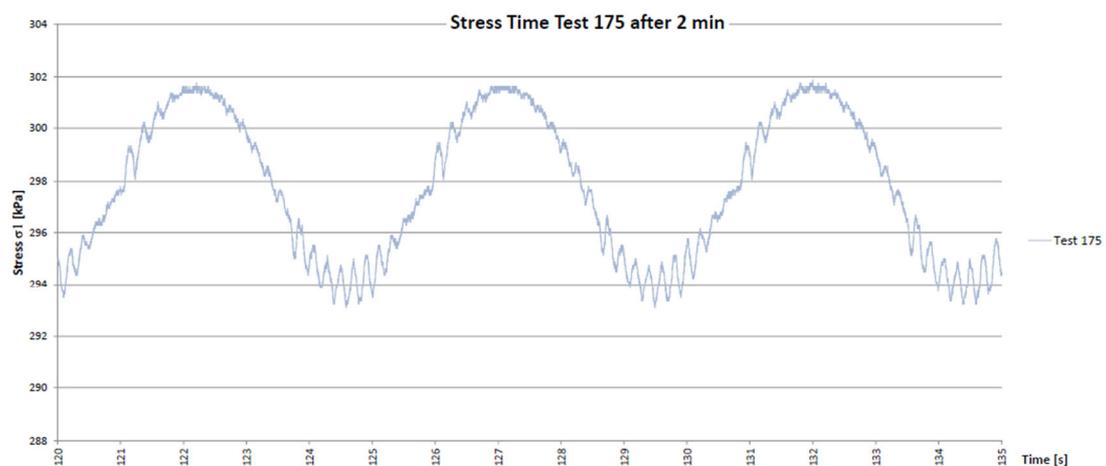


Abb. 49 Spannung Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 2 Minuten

In den ersten Minuten der Belastung wird eine Veränderung des Weges registriert. Dieser nimmt mit der Zeit kontinuierlich ab, siehe Abb. 50.

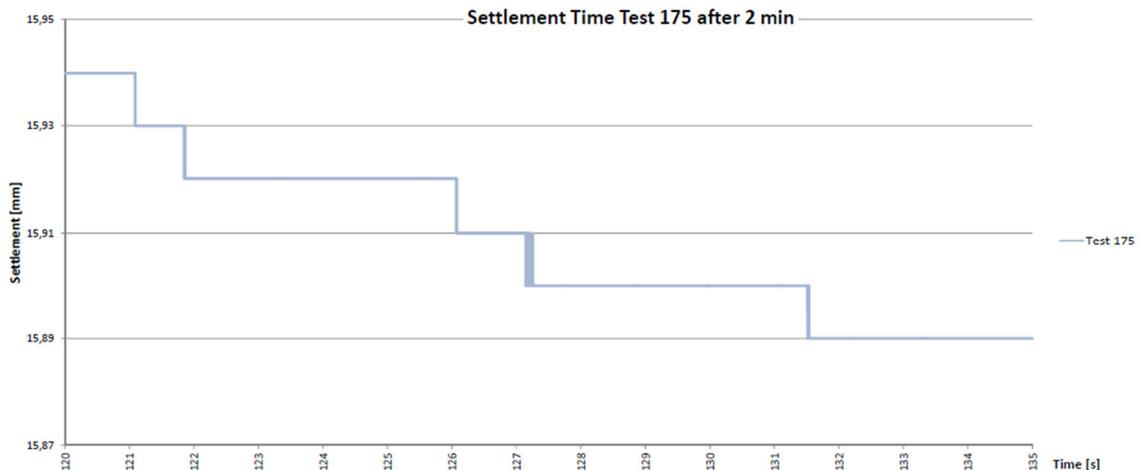


Abb. 50 Weg Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 2 Minuten

Die nächsten Abbildungen zeigen den Versuch 175 nach 27 Minuten dynamischer Belastung. Hierbei tritt neben der Hauptschwingung von 0,2 Hz eine Subschwingung von 4,8 Hz auf. Die Nebenschwingung tritt regelmäßig im gesamten Versuchsablauf auf, wobei die Subschwingungsamplitudenhöhe beim Kraftminimum am größten ist.

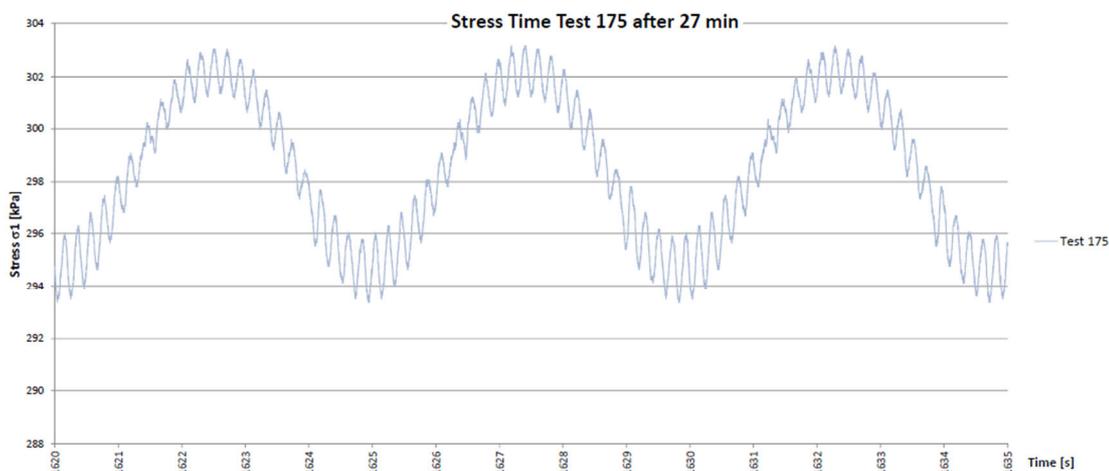


Abb. 51 Spannung Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 27 Minuten

Ab diesem Zeitpunkt registriert der Wegaufnehmer keinerlei Veränderung und bleibt konstant bis zu Erhöhung von σ_1 , welche zu einem Versagen der Probe führte.

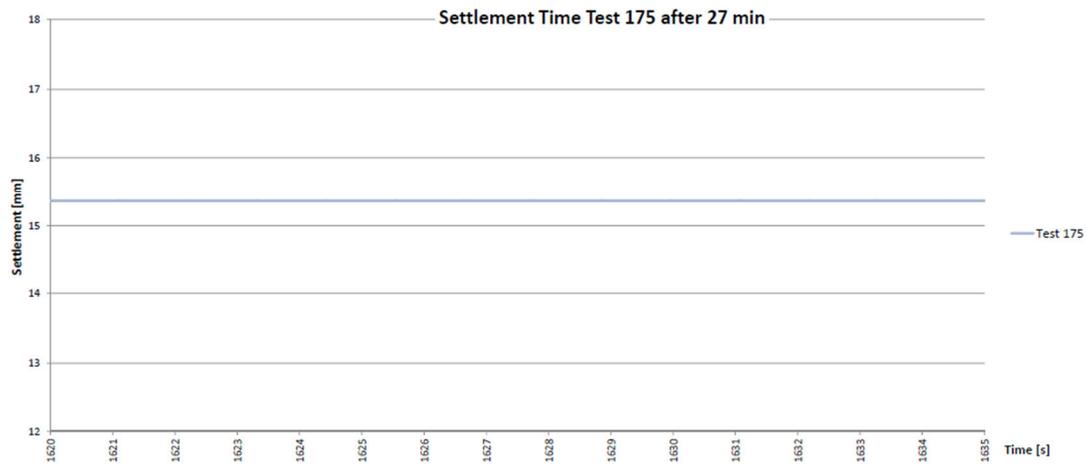


Abb. 52 Weg Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 27 Minuten

Die Porenwasserdrücke während des Versuches weisen kein erkennbares Muster auf. Der Verlauf ist zackenförmig und wird über den gleichen Zeitraum wie Abb. 51 und Abb. 52 betrachtet.

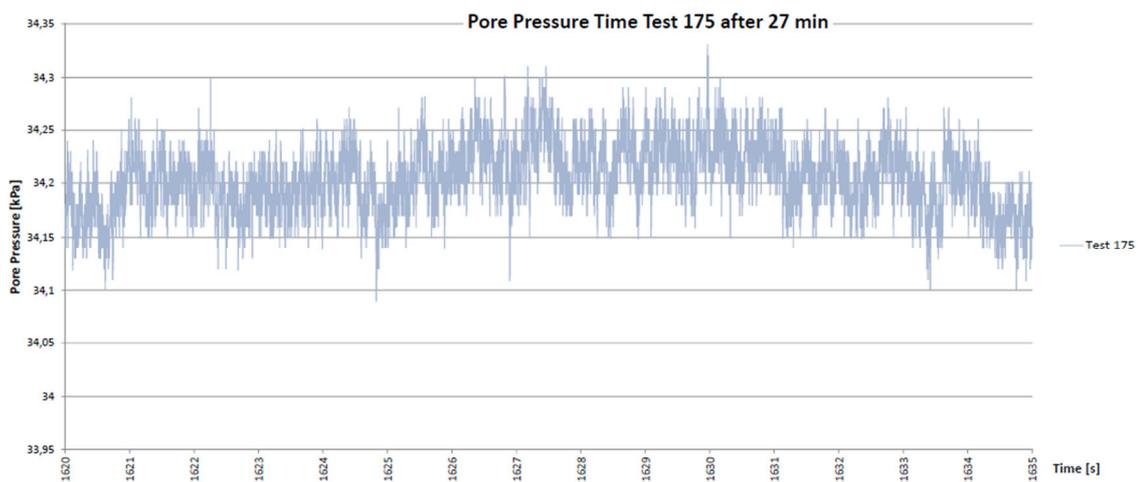


Abb. 53 Poren Druck Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung nach 27 Minuten

Anhand der Porenwasserdruckauswertung von zwei Kraftzyklen wurde eine größere Zeitspanne von ca. 1 Minute untersucht und ausgewertet. Entsprechend der Abb. 54 kann kein Trend abgeleitet werden.

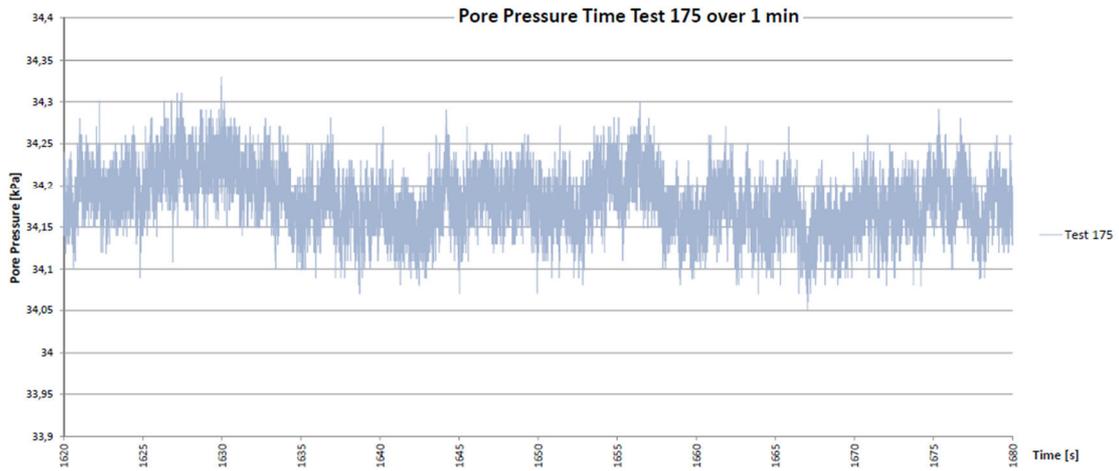


Abb. 54 Poren Druck Zeit Diagramm Test 175 – Auswertung über 1 Minute

Nach dem Anstieg von σ_1 auf 400 kPa ist der Versuchskörper aus Sand gebrochen. Um für die zukünftigen Versuche den Weg des Gewichtes zu vergrößern, wurde die Stellschraube herausgedreht und durch einen Holzklötz ersetzt, siehe Abb. 55. Die Stellschraubenlänge hat eine mögliche größere Stauchung des Prüfkörpers verhindert.



Abb. 55 Stellschraube ersetzt durch Holzklötz

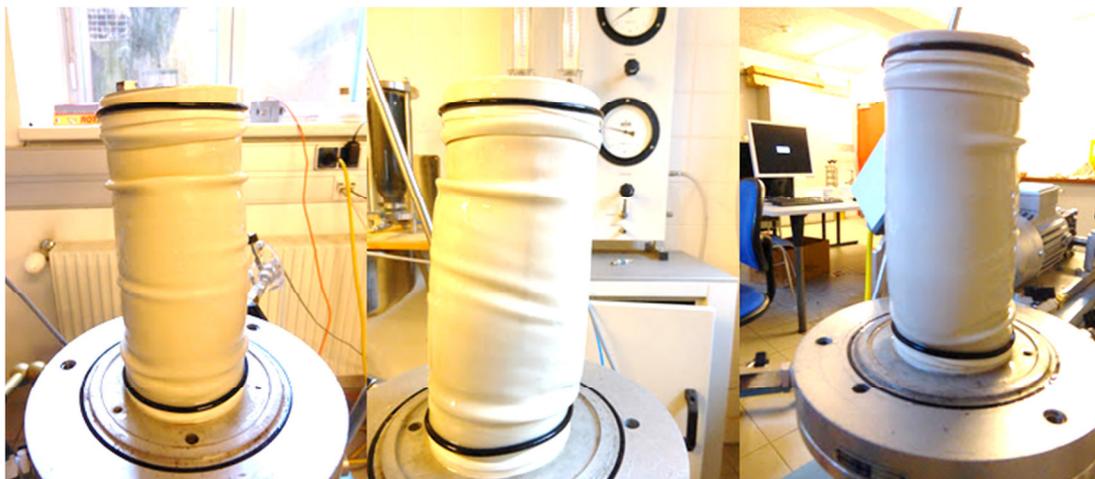


Abb. 56 Probe 175

10.5 Probe aus Sand Test 176

Die Sättigung erfolgte in mehreren Stufen, wobei ein Sättigungsgrad von 91 % nach vier Tagen bestimmt wurde. Der angetroffene Sättigungszustand wurde für diesen Versuch als ausreichend bewertet. Die Sättigung wurde anhand des B-Wertes bestimmt und ist in Tab. 11 ersichtlich. Aufgrund der Tatsache, dass die B Wert Analyse alle 24 Stunden erfolgte, erkennt man in Tab. 11, dass sich der Sättigungsgrad über die Zeit unterschiedlich erhöht. In den ersten zwei Tagen stieg dieser im Schnitt um 28 % und in der letzten Phase wurde der Sättigungsgrad um 8 % vergrößert.

Tab. 11 Sättigung - Probe 176

Datum	Zeit	Zelldruck [kPa]	Sättigungsdruck [kPa]	PWD [kPa]	Differenz [kPa]	B-Wert
01.09.2015	13:05	300	290	290,7		
		400	-	328	37,3	0,37
02.09.2015	08:02	400	390	391,2		
		500	-	447,6	56,4	0,56
03.09.2015	08:01	600	590	589,9		
		700	-	673,2	83,3	0,83
04.09.2015	08:00	700	690	687,6		
		800	-	778,6	91	0,91

In der ersten Phase der Sättigung wird der Zelldruck um 100 kPa erhöht und der B Wert steigt. Danach wurde der Zelldruck um 200 kPa erhöht und der Sättigungsgrad hat zugenommen. Dieser Verlauf spiegelt sich im nachstehenden Diagramm, Abb. 57, wieder.

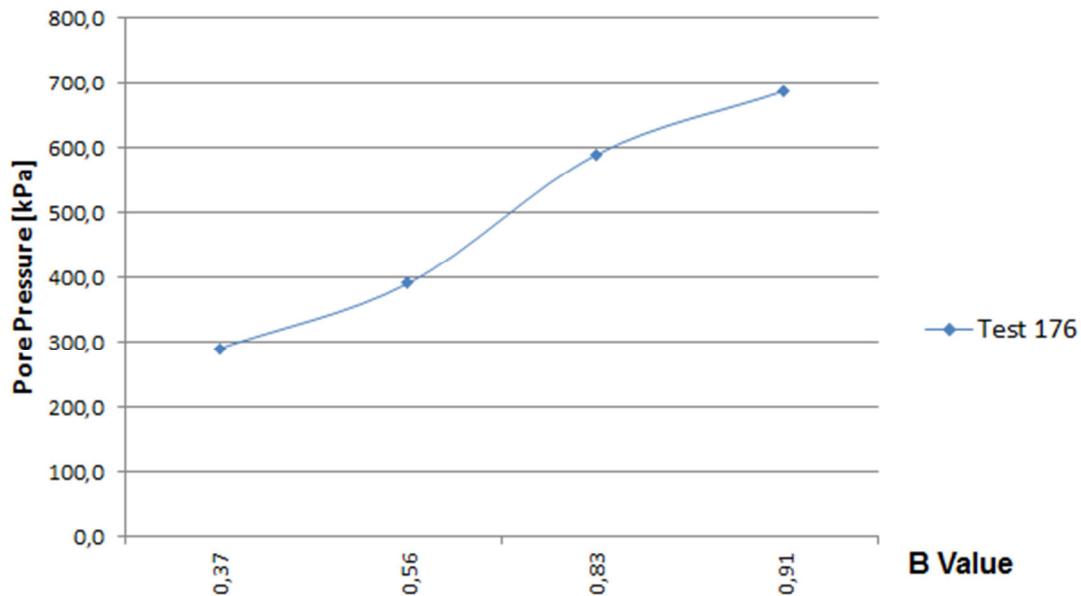


Abb. 57 Sättigung – Test 176

Nach Beendigung der Sättigungsphase wird die Konsolidierungsphase eingeleitet. Hierbei wird eine effektive Spannung von 100 kPa auf die Probe aufgebracht. Der Zelldruck wird mit 700 kPa festgelegt. Dementsprechend wird der Prüfkörper mit einem Backpressure von 600 kPa belastet. Diese 600 kPa werden durch den Anschluss Einlauf am Triaxialschaltpult erzeugt. Hierbei ist zu beachten, dass die Bürette im Einlauf mit 30 ml Wasser gefüllt ist. Der Wasserabfluss des Ballons für die Sättigung und Konsolidierung muss geschlossen sein, damit kein Druckkurzschluss zwischen Einlauf und Auslauf des Triaxialschaltpultes entsteht. Zuerst wird der Zelldruck (Zugang C) auf die Probe aufgebracht und anschließend der Backpressure (Zugang B).

Die Konsolidierungsphase kann der Abb. 58 entnommen werden, wobei keine Volumensänderung am Ende des ersten Tages festgestellt werden konnte. Ein Wert von $0,8 \text{ cm}^3$ hat sich eingestellt. In den nächsten zwei Tagen nahm die Volumensänderung wieder zu.

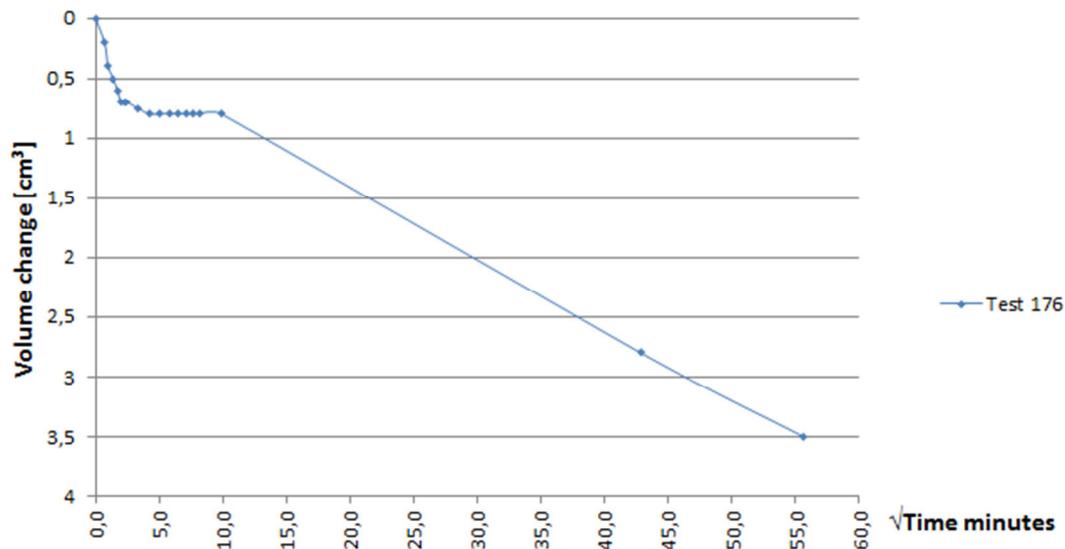


Abb. 58 Konsolidierung – Test 176

Nachdem die Probe gesättigt und konsolidiert wurde, wird die Scherphase des Versuches eingeleitet. Hierbei wird der vorher angebrachte Holzklötz, welcher als Stellschraube dient, manuell entfernt. Das Gewicht sollte hierbei behutsam auf den Prüfkörper aufgebracht werden.

Bei Test 176 wurde mit einem Zelldruck σ_3 von 150 kPa und einer zusätzlichen Belastung des Prüfkörpers von $\sigma_1 = 300$ kPa gearbeitet. Die zusätzliche Belastung vom Ödometergewicht konnte die Probe nicht aufnehmen und der Hebelsarm des Gewichtes fiel auf den Ödometeraufbau. Dadurch war es nicht möglich, eine dynamische Belastung auf den Prüfkörper aufzubringen.

11 Fourier Analyse

Der letzte Teil dieser Masterarbeit beschäftigt sich mit der mathematischen Analyse der Kraft-Zeit-Diagramme. Unter Hilfenahme des Programmes Matlab R2010bSP1 wurde gemeinsam mit Herrn Dipl.-Ing. Michael Grubmüller vom Institut für elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung der Technischen Universität in Graz ein Quellcode für diskrete Fourier Analysen geschrieben. Dadurch werden sämtliche Frequenzen und Amplitudenhöhen aller Versuche dargestellt. Alle Ausreißer wurden vernachlässigt und der Mittelwert der jeweiligen Tests gebildet. Die Vorteile einer mathematischen Auswertung gegenüber einer grafischen Auswertung sind, die exakte Bestimmung der Amplitudenhöhe und der Frequenz.

In Abb. 1 wurde die Hauptschwingung von den Nebenschwingungen getrennt. Auf der Abzisse wurde die Amplitudenhöhe in N dargestellt und auf der Ordinate wurde die Frequenz in Hz logarithmisch geplottet. Die Peaks im Diagramm weisen je auf eine auftretende Schwingung hin. Die Auswertung des Mittelwertes der Test 16 – 18 weist eine Frequenz in der Hauptschwingung von rund 0,2 Hz und eine Amplitudenhöhe von rund 22 N auf. Zusätzlich tritt eine erkennbare Nebenschwingung mit einer Frequenz von rund 4,6 Hz und einer Amplitudenhöhe von rund 8 N auf.

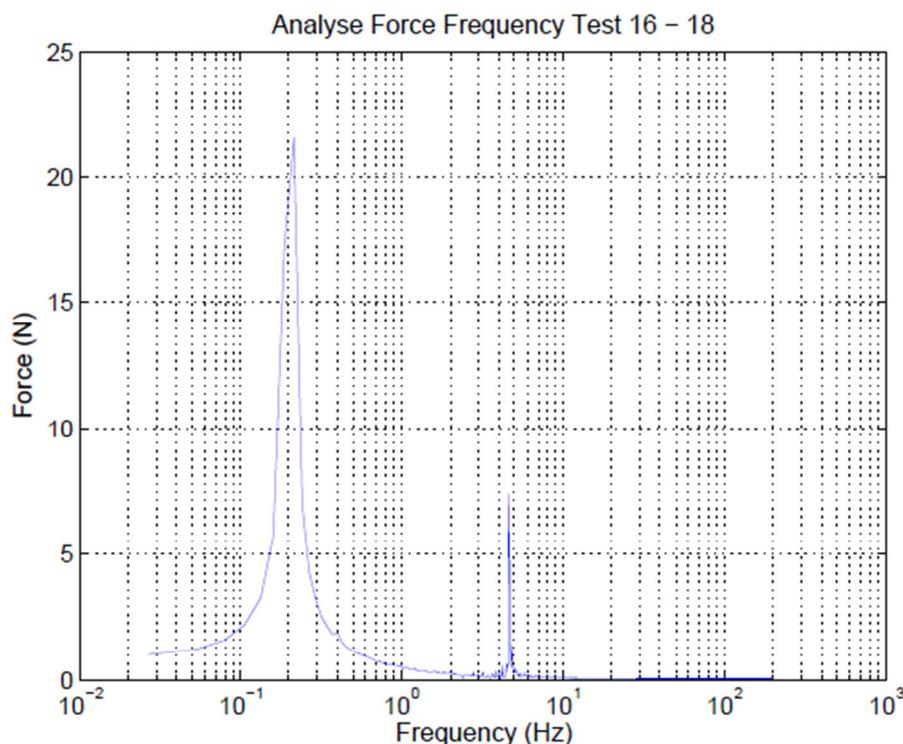


Abb. 59 Fourier Analyse Kraft Frequenz, Test 16 – 18

12 Resümee

Aus mehreren Einzelkomponenten: Odometer, elektrischer Motor und Triaxialzelle wurde eine dynamische Triaxialmaschine auf der Technischen Universität in Graz gebaut. Das Getriebe, welches die dynamische Beanspruchung erzeugt, ist aufgrund des Durchschlagens von Zahnrad auf Zahnrad ungeeignet für die Erzeugung einer konstanten dynamischen Belastung. Für die gestellten Anforderungen an die Triaxialmaschine beispielsweise eine mögliche Verflüssigung im Boden repräsentieren zu können, ist die Triaxialmaschine - aufgrund der Versuchsergebnisse - jedoch ungeeignet, da die aufbringbare dynamische Beanspruchung lediglich zwischen 1 und 2 % der gemessenen statischen Belastung ausmacht. In vergleichbaren Untersuchungen, welche in einer Literaturstudie erfasst wurde, wurde rein mit einer dynamischen Belastung gearbeitet⁴. Aufgrund des in den aufliegenden Versuchsreihen gemessenen ungleichmäßigen Verhältnis von statischer Belastung zu dynamischer Belastung, konnte der üblicherweise feststellbare Anstieg vom Porenwasserdruck nicht nachvollzogen werden. Gegen die Eignung der Triaxialmaschine für weitere Versuche spricht auch die begrenzte niedrige Frequenzauswahl, mit der bei den Versuchen lediglich getestet werden konnte. Der potentielle Frequenzbereich der Proben liegt bei 0,2 Hz. Bei höheren Frequenzen konnte keine signifikante sinusförmige Kurve bei dem Kraft-Zeit-Verlaufen erzielt werden, da die Subschwingungen das Ergebnis deutlich negativ beeinflusst haben. Die gemessene Verformungen bei den Versuchsreihen spielten sich lediglich in Zehntelmillimeter ab und es zeigten sich im Test wenige Messausschläge, z.B. bei den Proben aus Sand (Test 175).

⁴ La Vielle, T.H.; Liquefaction susceptibility of uncemented calcareous sands from Puerto rico by cyclic triaxial testing.

13 Literatur

- Donahue, J.L.; Bray, J.D.; Riemer, M.F. (2007)
The liquefaction susceptibility, resistance, and response of silty and clayey soils.
- Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Bedienungsanleitung – Quantum X.
- Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Datenblatt – Quantum X MX 840 A.
- Head, K.H.; Epps, R.J. (2014)
Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 3: Effective Stress Tests, Third Edition.
- Ho, D.Y.F.; Fredlund, D.G. (1982)
A multistage triaxial test for unsaturated soils, Geotechnical Testing Journal, March/June 1982.
- Kreiter, S.; Moerz, T.; Strasser, M.; Lange, M.; Schunn, W.; Schlue, B.F.; Otto, D.; Kopf, A.
Advanced dynamic soil testing – Introducing the new marum dynamic triaxial testing device.
- Kumar, S.S; Krishna, A.M.; Dey, A. (2014)
Dynamic soil properties of Brahmaputra sand using Cyclic Triaxial tests, north east students geo-congress on advances in geotechnical engineering.
- La Vielle, T.H. (2008)
Liquefaction susceptibility of uncemented calcareous sands from Puerto rico by cyclic triaxial testing.
- Shajarati, A.; Sørensen, K.W.; Nielsen, S.D.; Ibsen, L.B. (2012)
Manual for cyclic triaxial, University Aalborg.
- Shu-Gi, Chern; Tain-Shyang, Chang. (1995)
Simplified procedure for evaluating soil liquefaction characteristics, Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung Taiwan R.O.C, Journal of Marine Science and Technology, Vol.,3, No.1, pp.35-42.

14 Anhang

Versuchsprotokoll

Test 1 - 175

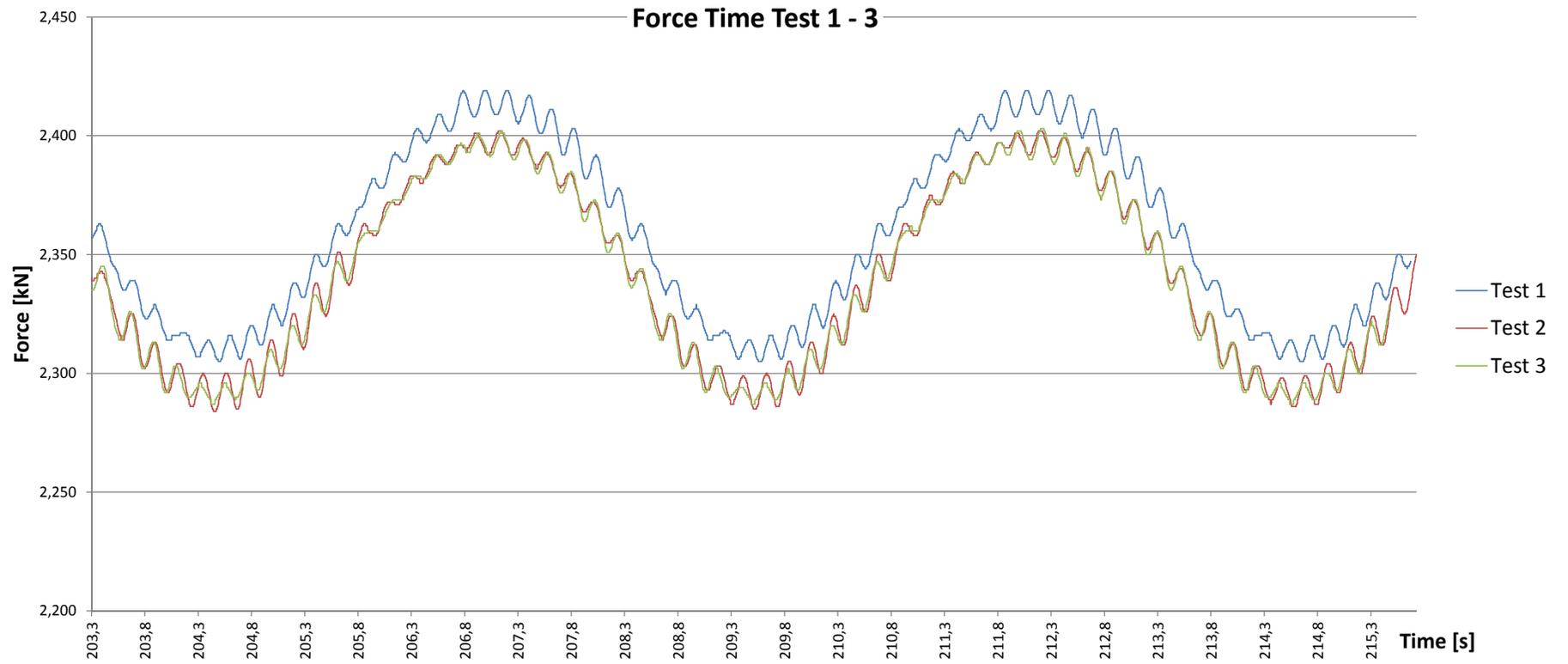
VERSUCHSPROTOKOLL

Test	Imbalance	σ_1	Force	Level	Frequency	Frequency-Sub	max. Amplitude	max. Amplitude-Sub	Stop	Material	Size [mm]	Outliers	Data Name
1	2	300 kN/m ²	2,358 kN	10	0,2 Hz	4,3 Hz	40 N	4 N	360 sec	Wood	100x100x200	✓	20_5_2015_Versuch_1
2	2	300 kN/m ²	2,358 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_2
3	2	300 kN/m ²	2,358 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_3
4	2	300 kN/m ²	2,358 kN	20	0,4 Hz	4,9 Hz	56 N	9 N	180 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_4
5	2	300 kN/m ²	2,358 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_5
6	2	300 kN/m ²	2,358 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_6
7	2	300 kN/m ²	2,358 kN	30	0,6 Hz	4,8 Hz	52 N	13 N	100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_7
8	2	300 kN/m ²	2,358 kN	30					120 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_8
9	2	300 kN/m ²	2,358 kN	30					120 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_9
10	2	300 kN/m ²	2,358 kN	40	0,8 Hz	4,8 Hz	87 N	32 N	150 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_10
11	2	300 kN/m ²	2,358 kN	40					120 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_11
12	2	300 kN/m ²	2,358 kN	40					140 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_12
13	2	300 kN/m ²	2,358 kN	50	1,0 Hz	5,0 Hz	108 N	18 N	100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_13
14	2	300 kN/m ²	2,358 kN	50					90 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_14
15	2	300 kN/m ²	2,358 kN	50					90 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_15
16	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10	0,2 Hz	4,6 Hz	22 N	8 N	390 sec	Wood	100x100x200	✓	20_5_2015_Versuch_16
17	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10					300 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_17
18	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10					320 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_18
19	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20	0,4 Hz	4,9 Hz	33 N	7 N	140 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_19
20	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20					140 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_20
21	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20					130 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_21
22	3	300 kN/m ²	2,358 kN	30	0,6 Hz	4,1 Hz	12 N	4 N	120 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_22
23	3	300 kN/m ²	2,358 kN	30					120 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_23
24	3	300 kN/m ²	2,358 kN	30					120 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_24
25	3	300 kN/m ²	2,358 kN	40	0,8 Hz	4,8 Hz	51 N	14 N	110 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_25
26	3	300 kN/m ²	2,358 kN	40					110 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_26
27	3	300 kN/m ²	2,358 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_27
28	3	300 kN/m ²	2,358 kN	50	1,0 Hz	4,9 Hz	70 N	17 N	100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_28
29	3	300 kN/m ²	2,358 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_29
30	3	300 kN/m ²	2,358 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_30
31	2	500 kN/m ²	3,928 kN	10	0,2 Hz	4,2 Hz	47 N	13 N	360 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_31
32	2	500 kN/m ²	3,928 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_32
33	2	500 kN/m ²	3,928 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_33
34	2	500 kN/m ²	3,928 kN	20	0,4 Hz	4,3 Hz	56 N	10 N	150 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_34
35	2	500 kN/m ²	3,928 kN	20					150 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_35
36	2	500 kN/m ²	3,928 kN	20					160 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_36
37	2	500 kN/m ²	3,928 kN	30	0,6 Hz	4,2 Hz	56 N	67 N	150 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_37
38	2	500 kN/m ²	3,928 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_38
39	2	500 kN/m ²	3,928 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_39
40	2	500 kN/m ²	3,928 kN	40	0,8 Hz	4,0 Hz	83 N	50 N	130 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_40
41	2	500 kN/m ²	3,928 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_41
42	2	500 kN/m ²	3,928 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_42
43	2	500 kN/m ²	3,928 kN	50	1,0 Hz	4,0 Hz	115 N	34 N	100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_43
44	2	500 kN/m ²	3,928 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_44
45	2	500 kN/m ²	3,928 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		20_5_2015_Versuch_45

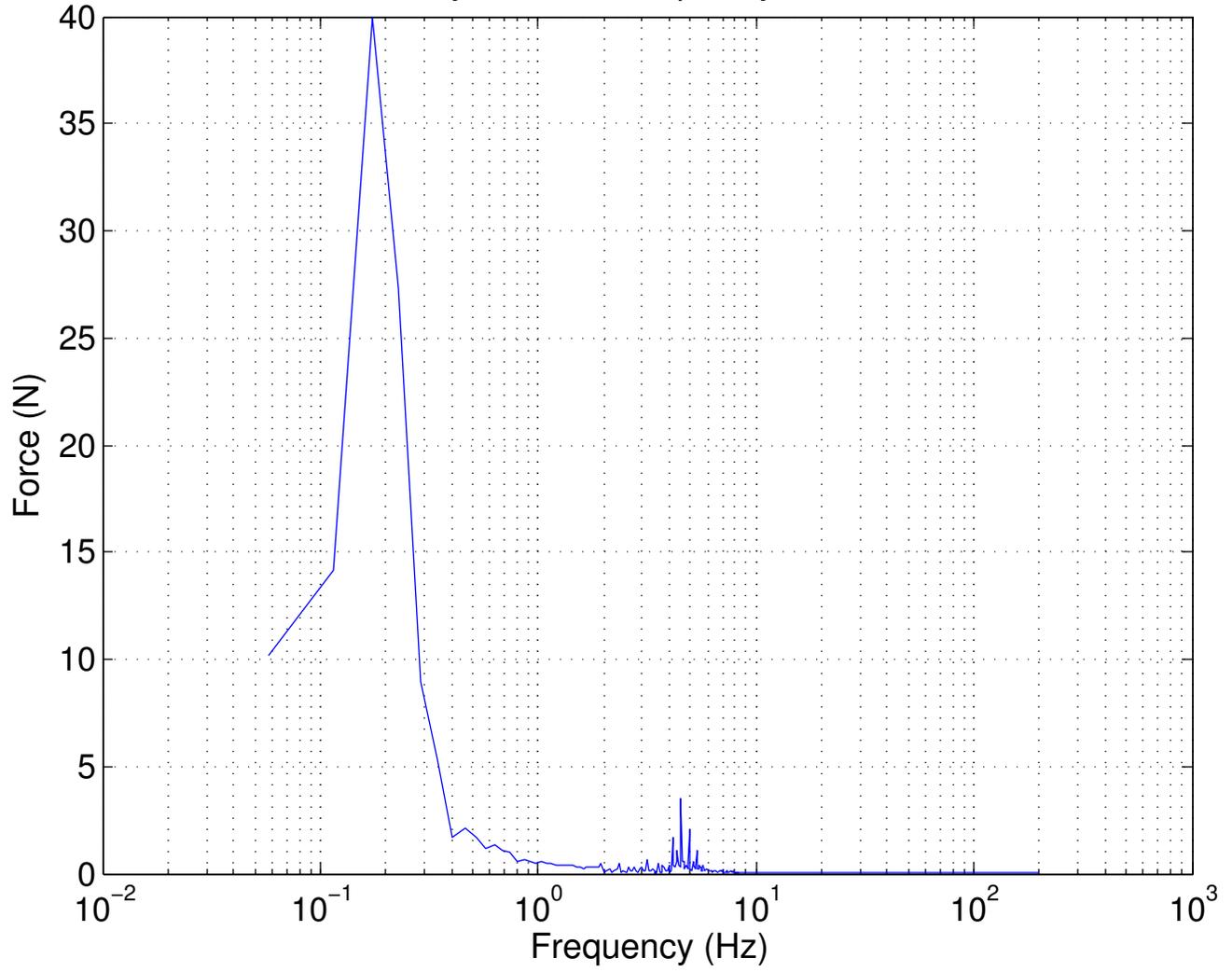
Test	Imbalance	σ_1	Force	Level	Frequency	Frequency-Sub	max. Amplitude	max. Amplitude-Sub	Stop	Material	Size [mm]	Outliers	Data Name
46	3	500 kN/m ²	3,928 kN	10	0,2 Hz	4,1 Hz	20 N	3 N	360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_46
47	3	500 kN/m ²	3,928 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_47
48	3	500 kN/m ²	3,928 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_48
49	3	500 kN/m ²	3,928 kN	20	0,4 Hz	4,0 Hz	33 N	3 N	180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_49
50	3	500 kN/m ²	3,928 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_50
51	3	500 kN/m ²	3,928 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_51
52	3	500 kN/m ²	3,928 kN	30	0,6 Hz	4,1 Hz	12 N	26 N	150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_52
53	3	500 kN/m ²	3,928 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_53
54	3	500 kN/m ²	3,928 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_54
55	3	500 kN/m ²	3,928 kN	40	0,8 Hz	4,0 Hz	48 N	19 N	130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_55
56	3	500 kN/m ²	3,928 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_56
57	3	500 kN/m ²	3,928 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_57
58	3	500 kN/m ²	3,928 kN	50	1,0 Hz	4,0 Hz	66 N	20 N	100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_58
59	3	500 kN/m ²	3,928 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_59
60	3	500 kN/m ²	3,928 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_60
61	2	700 kN/m ²	5,497 kN	10	0,2 Hz	4,0 Hz	40 N	5 N	360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_61
62	2	700 kN/m ²	5,497 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_62
63	2	700 kN/m ²	5,497 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_63
64	2	700 kN/m ²	5,497 kN	20	0,4 Hz	4,0 Hz	54 N	16 N	180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_64
65	2	700 kN/m ²	5,497 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_65
66	2	700 kN/m ²	5,497 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200	✓	21_5_2015_Versuch_66
67	2	700 kN/m ²	5,497 kN	30	0,6 Hz	4,1 Hz	55 N	13 N	150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_67
68	2	700 kN/m ²	5,497 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_68
69	2	700 kN/m ²	5,497 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_69
70	2	700 kN/m ²	5,497 kN	40	0,8 Hz	4,0 Hz	81 N	78 N	130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_70
71	2	700 kN/m ²	5,497 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_71
72	2	700 kN/m ²	5,497 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_72
73	2	700 kN/m ²	5,497 kN	50	1,0 Hz	4,0 Hz	115 N	39 N	100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_73
74	2	700 kN/m ²	5,497 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_74
75	2	700 kN/m ²	5,497 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_75
76	3	700 kN/m ²	5,497 kN	10	0,2 Hz	4,0 Hz	19 N	4 N	360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_76
77	3	700 kN/m ²	5,497 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_77
78	3	700 kN/m ²	5,497 kN	10					360 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_78
79	3	700 kN/m ²	5,497 kN	20	0,4 Hz	4,0 Hz	33 N	6 N	180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_79
80	3	700 kN/m ²	5,497 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_80
81	3	700 kN/m ²	5,497 kN	20					180 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_81
82	3	700 kN/m ²	5,497 kN	30	0,6 Hz	4,0 Hz	31 N	6 N	150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_82
83	3	700 kN/m ²	5,497 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_83
84	3	700 kN/m ²	5,497 kN	30					150 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_84
85	3	700 kN/m ²	5,497 kN	40	0,8 Hz	4,0 Hz	48 N	37 N	130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_85
86	3	700 kN/m ²	5,497 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_86
87	3	700 kN/m ²	5,497 kN	40					130 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_87
88	3	700 kN/m ²	5,497 kN	50	1,0 Hz	4,0 Hz	66 N	35 N	100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_88
89	3	700 kN/m ²	5,497 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_89
90	3	700 kN/m ²	5,497 kN	50					100 sec	Wood	100x100x200		21_5_2015_Versuch_90

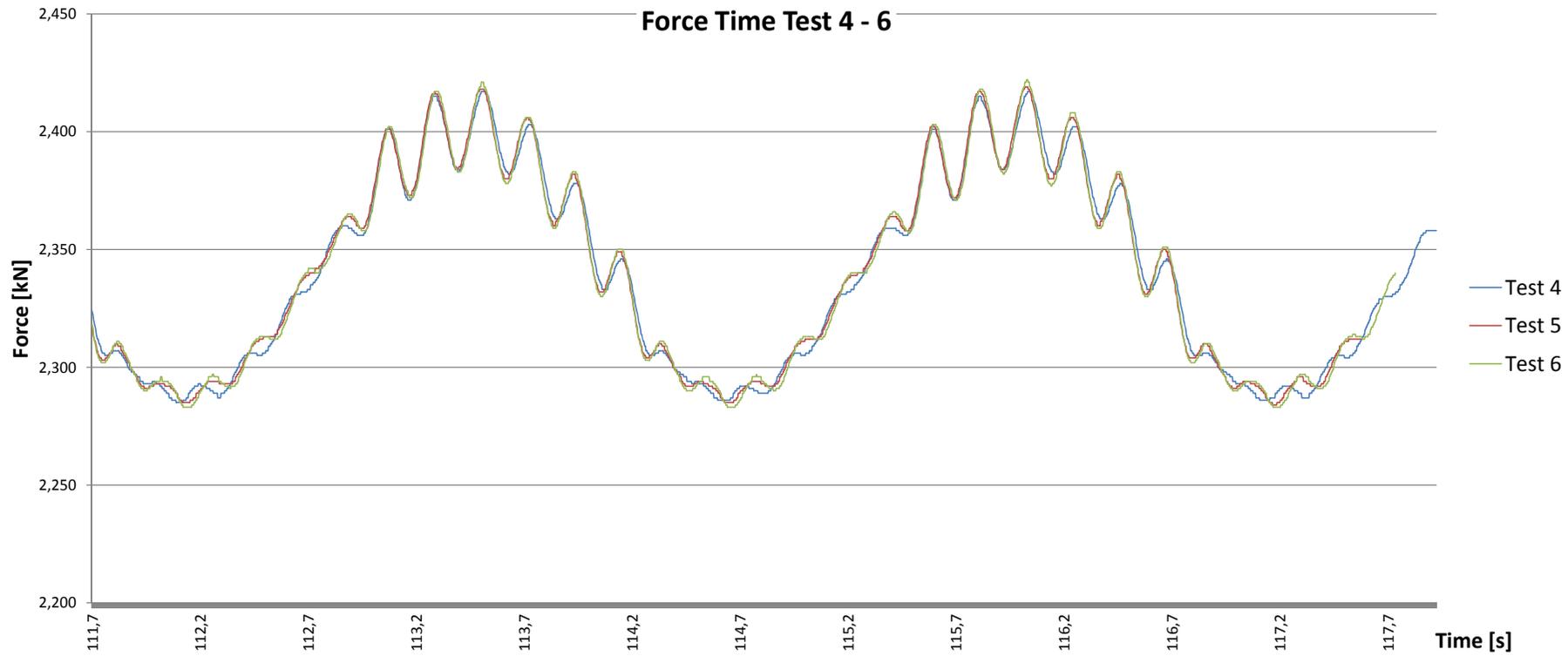
Test	Imbalance	σ_1	Force	Level	Frequency	Frequency-Sub	max. Amplitude	max. Amplitude-Sub	Stop	Material	Size [mm]	Outliers	Data Name
91	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15	0,3 Hz	4,8 Hz	27 N	10 N	240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_91
92	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_92
93	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_93
94	3	300 kN/m ²	2,358 kN	25	0,5 Hz	4,3 Hz	34 N	7 N	160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_94
95	3	300 kN/m ²	2,358 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_95
96	3	300 kN/m ²	2,358 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_96
97	3	500 kN/m ²	3,928 kN	15	0,3 Hz	4,4 Hz	26 N	3 N	240 sec	Wood	100x100x200	✓	3_6_2015_Versuch_97
98	3	500 kN/m ²	3,928 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_98
99	3	500 kN/m ²	3,928 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_99
100	3	500 kN/m ²	3,928 kN	25	0,5 Hz	4,4 Hz	34 N	15 N	160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_100
101	3	500 kN/m ²	3,928 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_101
102	3	500 kN/m ²	3,928 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_102
103	2	500 kN/m ²	3,928 kN	15	0,3 Hz	4,2 Hz	46 N	8 N	240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_103
104	2	500 kN/m ²	3,928 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_104
105	2	500 kN/m ²	3,928 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_105
106	2	500 kN/m ²	3,928 kN	25	0,5 Hz	4,3 Hz	58 N	18 N	160 sec	Wood	100x100x200	✓	3_6_2015_Versuch_106
107	2	500 kN/m ²	3,928 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_107
108	2	500 kN/m ²	3,928 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_108
109	3	700 kN/m ²	5,497 kN	15	0,3 Hz	4,0 Hz	27 N	3 N	240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_109
110	3	700 kN/m ²	5,497 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_110
111	3	700 kN/m ²	5,497 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_111
112	3	700 kN/m ²	5,497 kN	25	0,5 Hz	4,0 Hz	34 N	7 N	160 sec	Wood	100x100x200	✓	3_6_2015_Versuch_112
113	3	700 kN/m ²	5,497 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_113
114	3	700 kN/m ²	5,497 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_114
115	2	700 kN/m ²	5,497 kN	15	0,3 Hz	4,0 Hz	45 N	13 N	240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_115
116	2	700 kN/m ²	5,497 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_116
117	2	700 kN/m ²	5,497 kN	15					240 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_117
118	2	700 kN/m ²	5,497 kN	25	0,5 Hz	4,0 Hz	58 N	21 N	160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_118
119	2	700 kN/m ²	5,497 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_119
120	2	700 kN/m ²	5,497 kN	25					160 sec	Wood	100x100x200		3_6_2015_Versuch_120
121	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10	0,2 Hz	4,5 Hz	20 N	5 N	360 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_121
122	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10					360 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_122
123	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10					360 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_123
124	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15	0,3 Hz	4,8 Hz	28 N	5 N	240 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_124
125	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15					240 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_125
126	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15					240 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_126
127	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20	0,4 Hz	4,8 Hz	33 N	4 N	180 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_127
128	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20					180 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_128
129	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20					180 sec	XPS	100x100x200	✓	16_6_2015_Versuch_129
130	3	300 kN/m ²	2,358 kN	25	0,5 Hz	4,4 Hz	33 N	5 N	160 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_130
131	3	300 kN/m ²	2,358 kN	25					160 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_131
132	3	300 kN/m ²	2,358 kN	25					160 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_132
133	3	300 kN/m ²	2,358 kN	30	0,6 Hz	4,1 Hz	30 N	7 N	150 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_133
134	3	300 kN/m ²	2,358 kN	30					150 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_134
135	3	300 kN/m ²	2,358 kN	30					150 sec	XPS	100x100x200	✓	16_6_2015_Versuch_135
136	2	300 kN/m ²	2,358 kN	10	0,2 Hz	4,5 Hz	35 N	3 N	360 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_136
137	2	300 kN/m ²	2,358 kN	10					360 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_137
138	2	300 kN/m ²	2,358 kN	10					360 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_138

Test	Imbalance	σ_1	Force	Level	Frequency	Frequency-Sub	max. Amplitude	max. Amplitude-Sub	Stop	Material	Size [mm]	Outliers	Data Name
139	2	300 kN/m ²	2,358 kN	15	0,3 Hz	4,8 Hz	45 N	6 N	240 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_139
140	2	300 kN/m ²	2,358 kN	15					240 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_140
141	2	300 kN/m ²	2,358 kN	15					240 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_141
142	2	300 kN/m ²	2,358 kN	20	0,4 Hz	4,2 Hz	54 N	9 N	180 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_142
143	2	300 kN/m ²	2,358 kN	20					180 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_143
144	2	300 kN/m ²	2,358 kN	20					180 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_144
145	2	300 kN/m ²	2,358 kN	25	0,5 Hz	4,2 Hz	58 N	6 N	160 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_145
146	2	300 kN/m ²	2,358 kN	25					160 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_146
147	2	300 kN/m ²	2,358 kN	25					160 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_147
148	2	300 kN/m ²	2,358 kN	30	0,6 Hz	4,1 Hz	64 N	17 N	150 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_148
149	2	300 kN/m ²	2,358 kN	30					150 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_149
150	2	300 kN/m ²	2,358 kN	30					150 sec	XPS	100x100x200		16_6_2015_Versuch_150
Test	Imbalance	σ_1	Force	Level	AC 1 Frequency	AC 2 Frequency	AC 1 Acceleration	AC 2 Acceleration	Stop	Material	Size [mm]	Outliers	Data Name
151	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0065 g	0,0050 g	360 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_151, 22_6_2015_Versuch_151-Lv-10-AC
152	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0227 g	0,0071 g	240 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_152, 22_6_2015_Versuch_152-Lv-15-AC
153	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0143 g	0,0111 g	180 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_153, 22_6_2015_Versuch_153-Lv-20-AC
154	3	300 kN/m ²	2,358 kN	50	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0298 g	0,0218 g	130 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_154, 22_6_2015_Versuch_154-Lv-20-AC
155	3	500 kN/m ²	3,928 kN	10	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0167 g	0,0045 g	360 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_155, 22_6_2015_Versuch_155-Lv-10-AC
156	3	500 kN/m ²	3,928 kN	15	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0224 g	0,0094 g	240 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_156, 22_6_2015_Versuch_156-Lv-15-AC
157	3	500 kN/m ²	3,928 kN	20	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0118 g	0,0095 g	180 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_157, 22_6_2015_Versuch_157-Lv-20-AC
158	3	500 kN/m ²	3,928 kN	50	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0230 g	0,0130 g	130 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_158, 22_6_2015_Versuch_158-Lv-50-AC
159	3	700 kN/m ²	5,497 kN	10	24,0 Hz	Rauschen	0,0207 g	x	360 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_159, 22_6_2015_Versuch_159-Lv-10-AC
160	3	700 kN/m ²	5,497 kN	15	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0222 g	0,0066 g	240 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_160, 22_6_2015_Versuch_160-Lv-15-AC
161	3	700 kN/m ²	5,497 kN	20	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0153 g	0,0050 g	180 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_161, 22_6_2015_Versuch_161-Lv-20-AC
162	3	700 kN/m ²	5,497 kN	50	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0198 g	0,0105 g	130 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_162, 22_6_2015_Versuch_162-Lv-50-AC
163	3	500 kN/m ²	3,928 kN	10	24 Hz & Rauschen	24,0 Hz	0,0022 g	0,0056 g	360 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_163, 22_6_2015_Versuch_163-Lv-10-AC
164	3	500 kN/m ²	3,928 kN	15	24 Hz & Rauschen	24,0 Hz	0,0025 g	0,0060 g	240 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_164, 22_6_2015_Versuch_164-Lv-15-AC
165	3	500 kN/m ²	3,928 kN	20	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0047 g	0,0064 g	180 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_165, 22_6_2015_Versuch_165-Lv-20-AC
166	3	500 kN/m ²	3,928 kN	50	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0090 g	0,0154 g	130 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_166, 22_6_2015_Versuch_166-Lv-50-AC
167	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10	24 Hz & Rauschen	24 Hz & Rauschen	0,0034 g	0,0082 g	360 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_167, 22_6_2015_Versuch_167-Lv-10-AC
168	3	300 kN/m ²	2,358 kN	15	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0029 g	0,0070 g	240 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_168, 22_6_2015_Versuch_168-Lv-15-AC
169	3	300 kN/m ²	2,358 kN	20	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0038 g	0,0092 g	180 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_169, 22_6_2015_Versuch_169-Lv-20-AC
170	3	300 kN/m ²	2,358 kN	50	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0075 g	0,0227 g	130 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_170, 22_6_2015_Versuch_170-Lv-50-AC
171	3	700 kN/m ²	5,497 kN	10	Rauschen	24,0 Hz	x	0,0237 g	360 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_171, 22_6_2015_Versuch_171-Lv-10-AC
172	3	700 kN/m ²	5,497 kN	15	24 Hz & Rauschen	24,0 Hz	0,0037 g	0,0086 g	240 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_172, 22_6_2015_Versuch_172-Lv-15-AC
173	3	700 kN/m ²	5,497 kN	20	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0022 g	0,0052 g	180 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_173, 22_6_2015_Versuch_173-Lv-20-AC
174	3	700 kN/m ²	5,497 kN	50	24,0 Hz	24,0 Hz	0,0075 g	0,0112 g	130 sec	Wood	100x100x200		22_6_2015_Versuch_174, 22_6_2015_Versuch_174-Lv-50-AC
Test	Imbalance	σ_1	Force	Level	Frequency	Frequency-Sub	max. Amplitude	max. Amplitude-Sub	Stop	Material	Size [mm]	Outliers	Data Name
175	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10	0,20	4,80	27,0	6,0	3 hours	Sand	100x204		07_09_2015_Versuch_Test175
176	3	300 kN/m ²	2,358 kN	10	x	x	x	x	x	Sand	100x207	x	

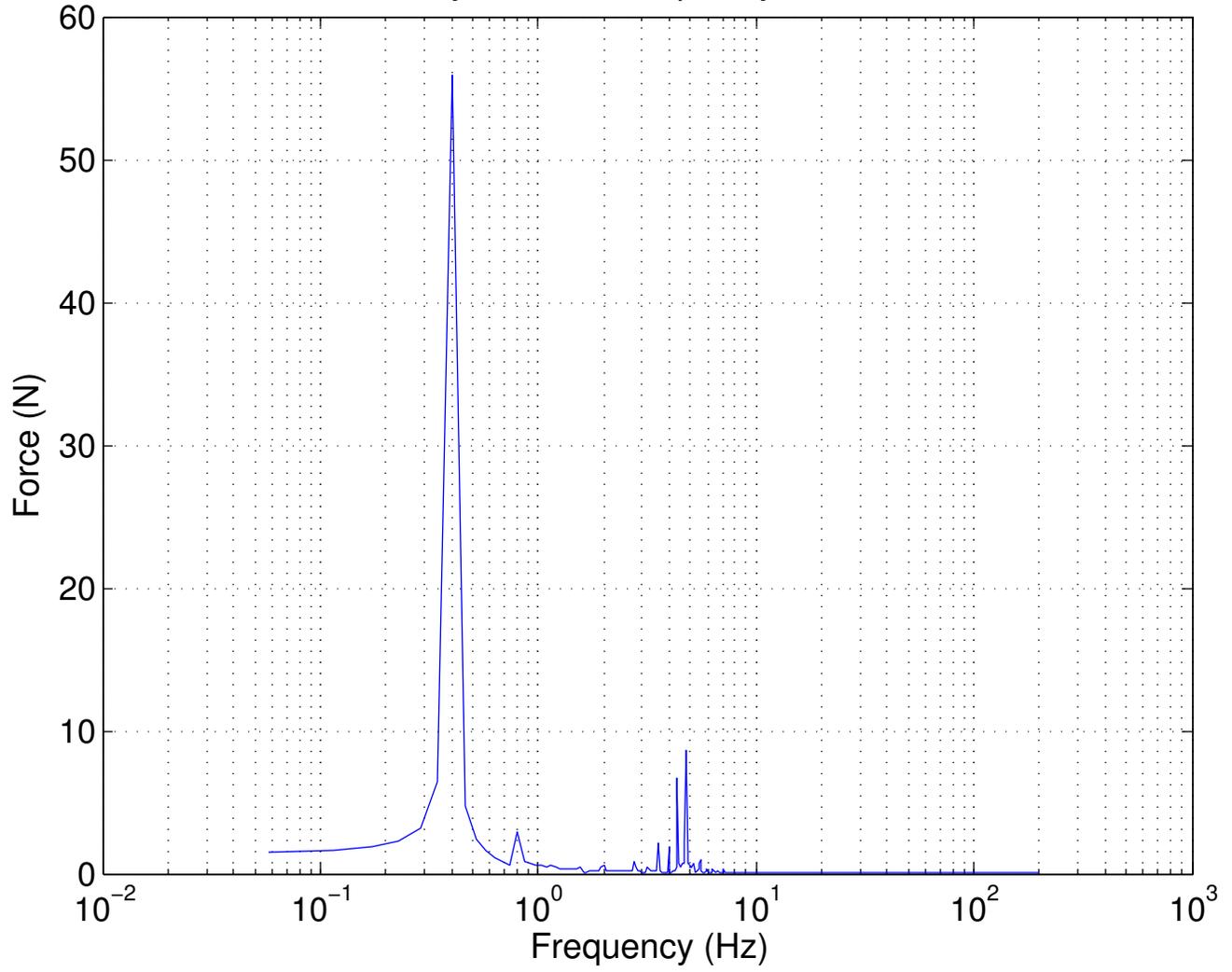


Analyse Force Frequency Test 1 – 3



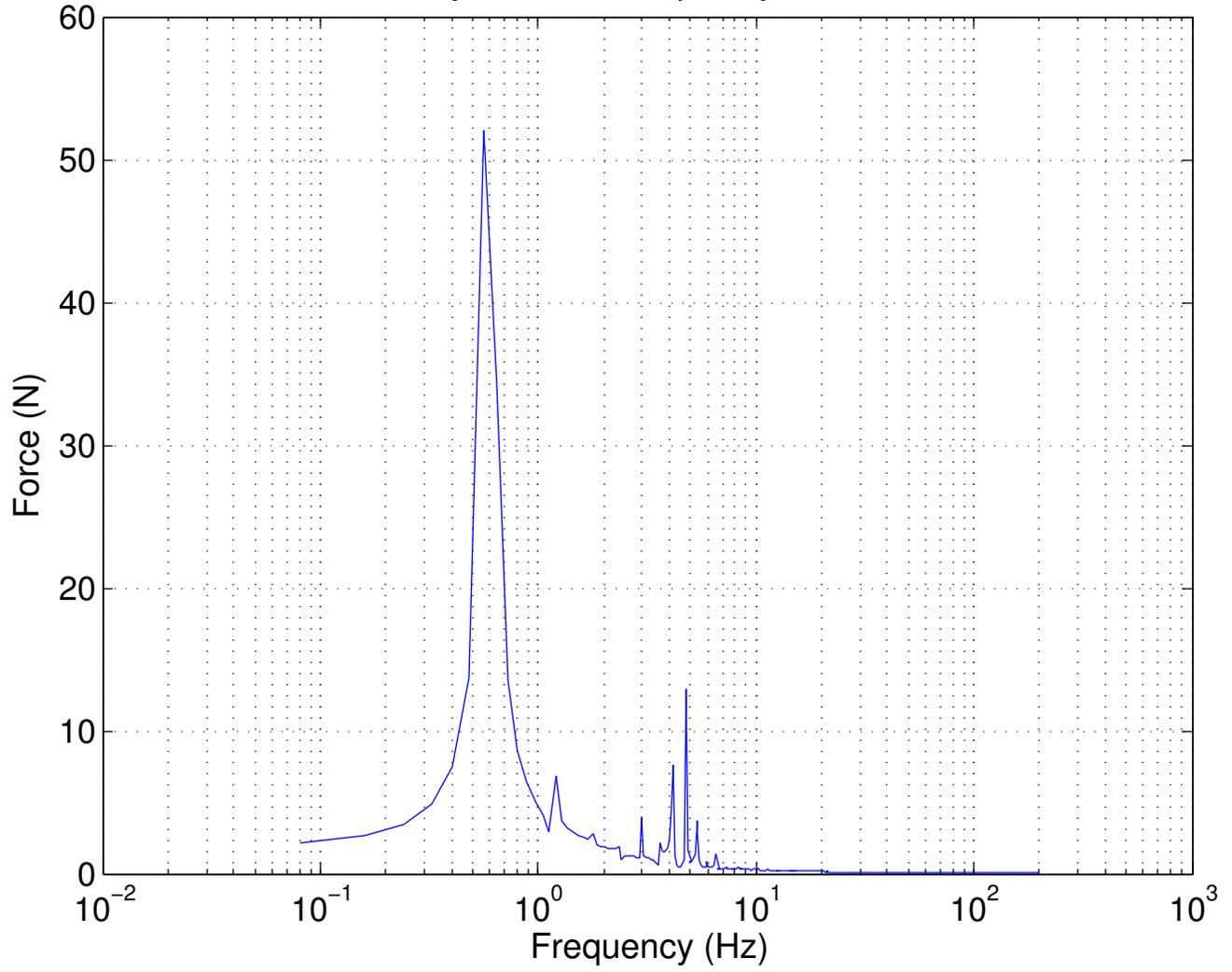


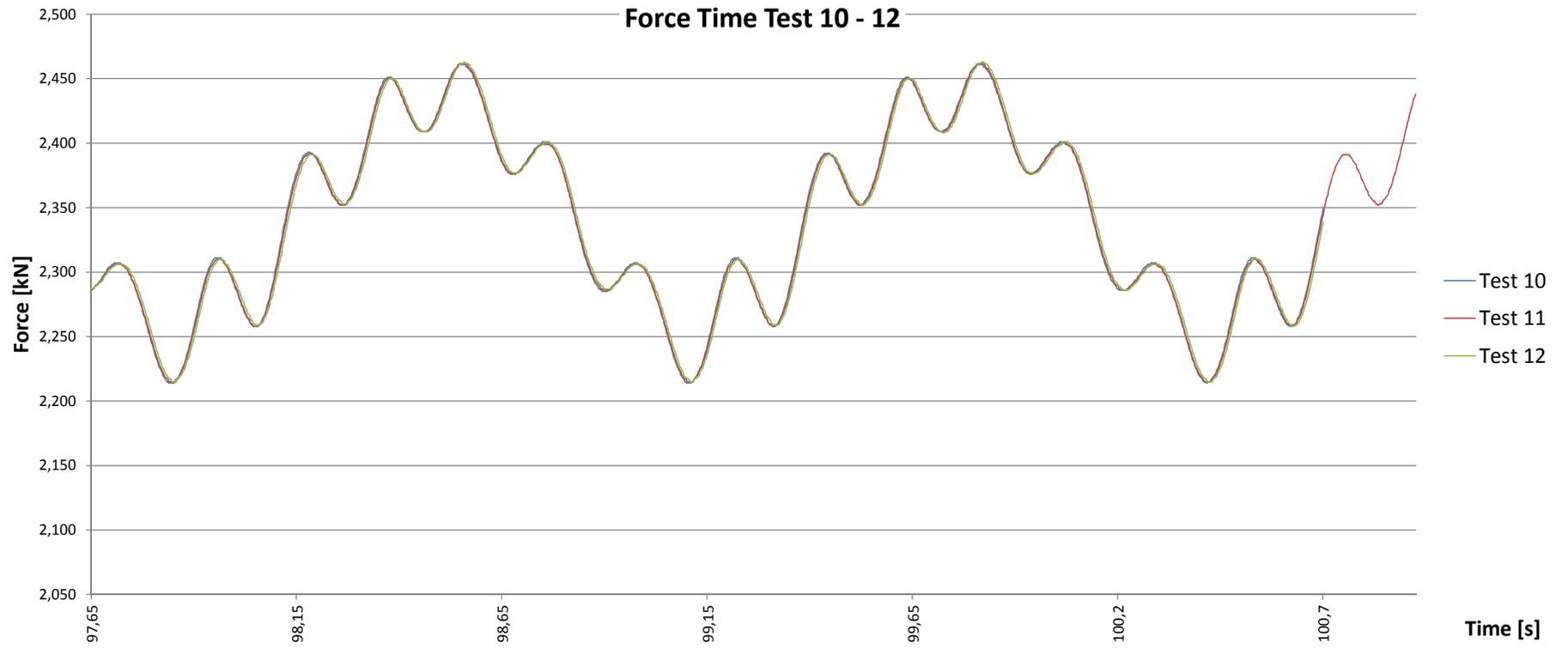
Analyse Force Frequency Test 4 – 6



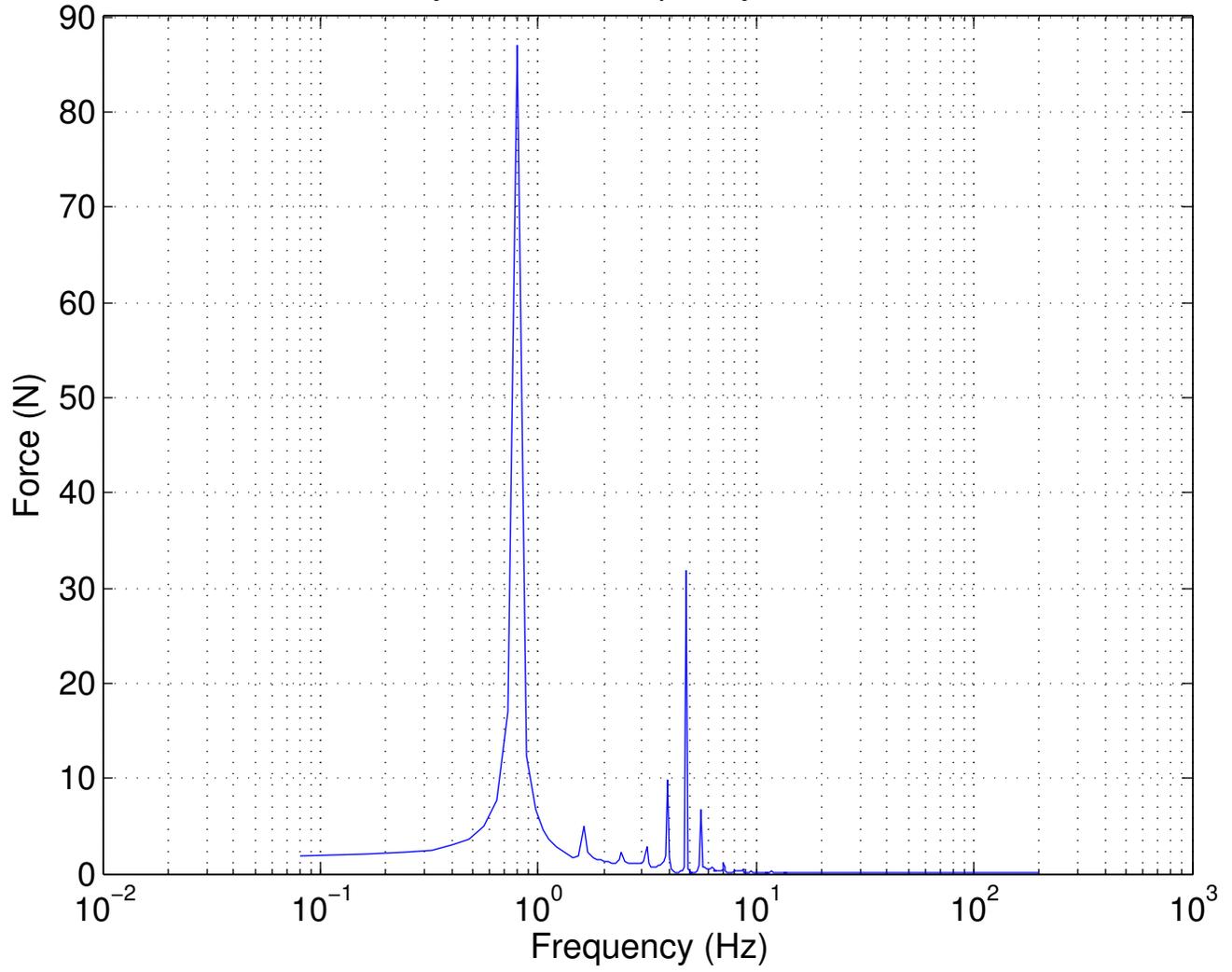


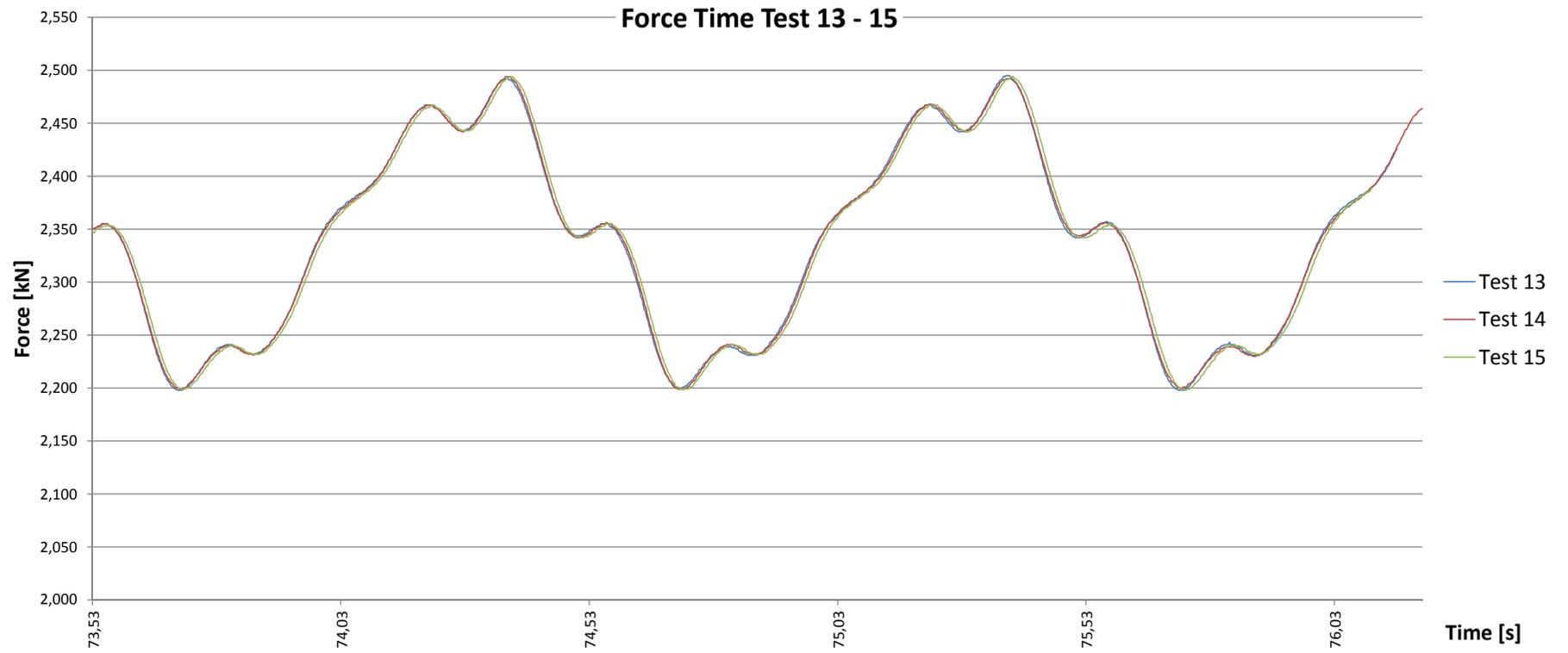
Analyse Force Frequency Test 7 – 9



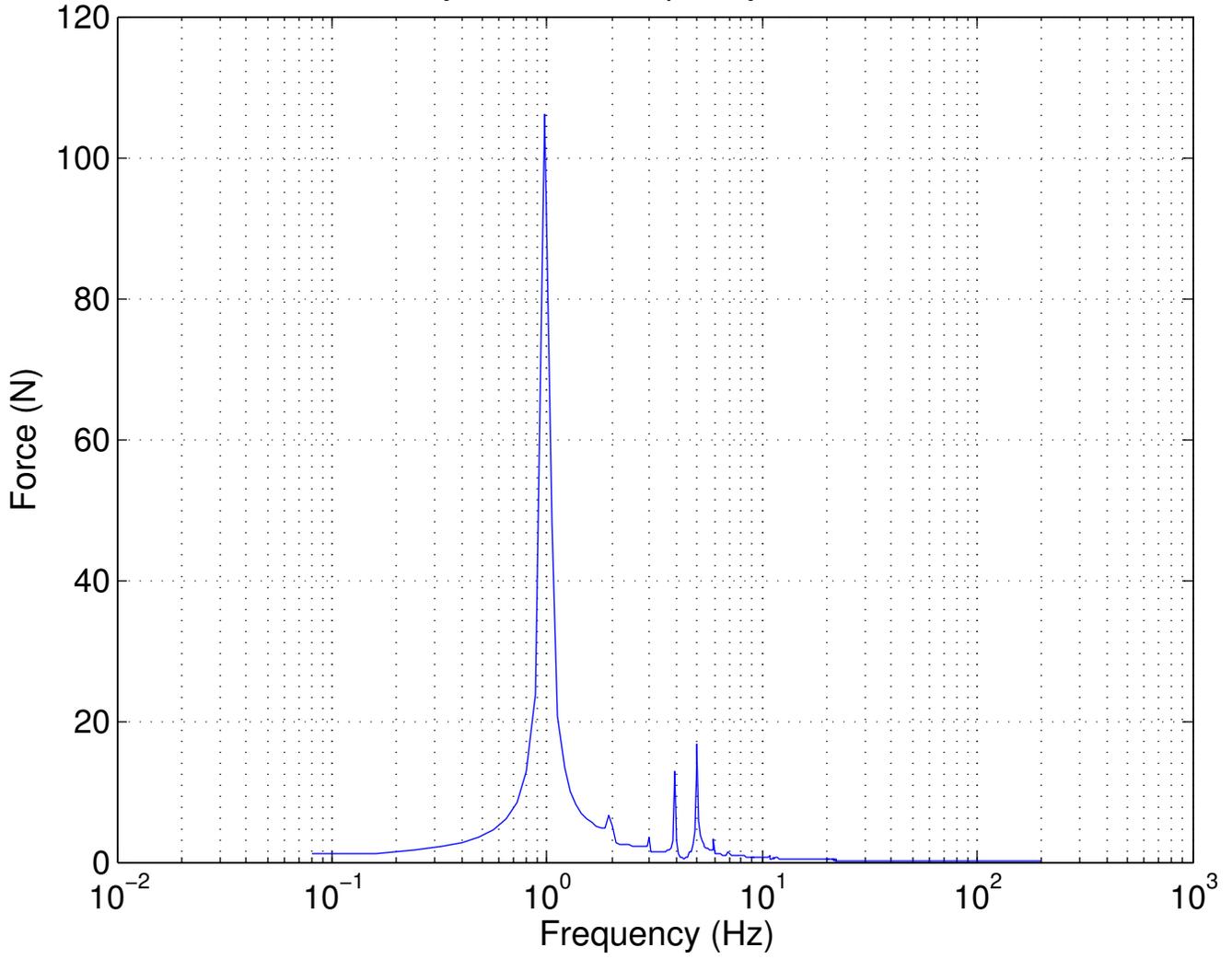


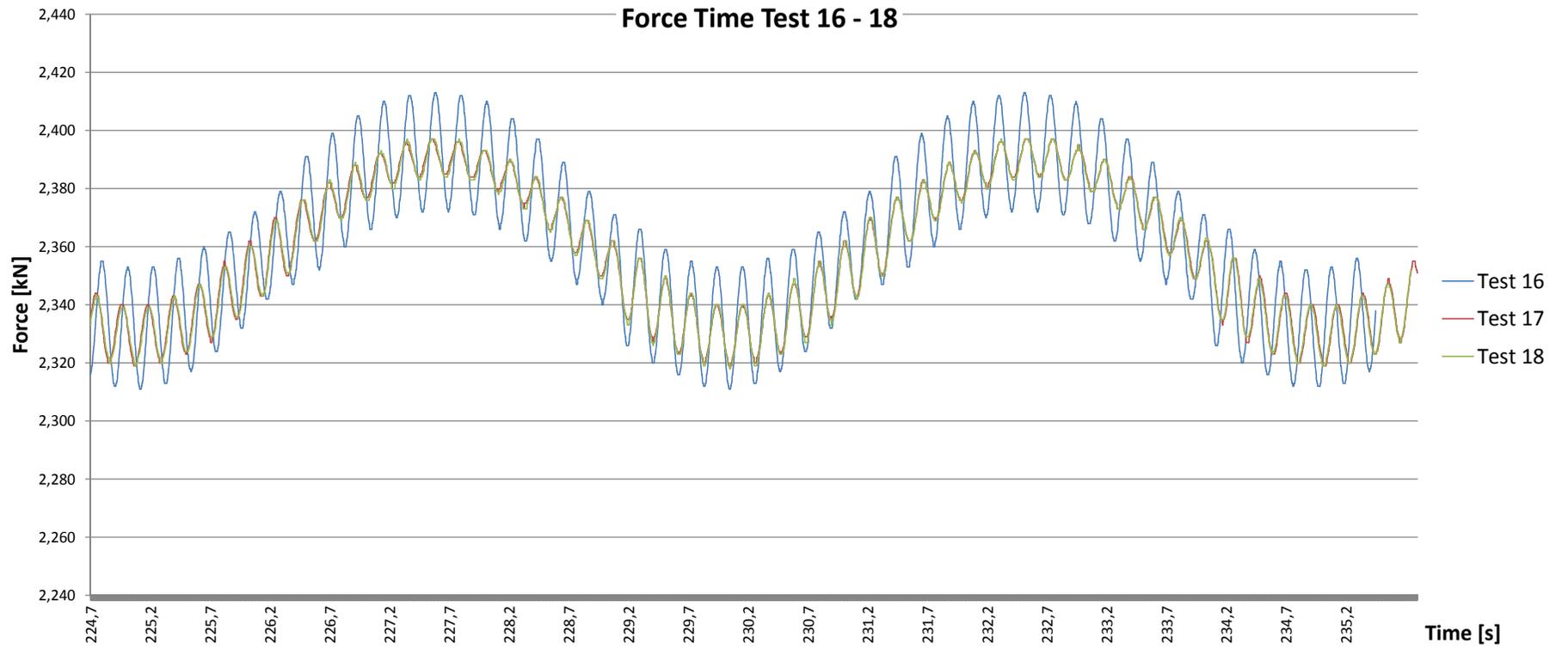
Analyse Force Frequency Test 10 – 12



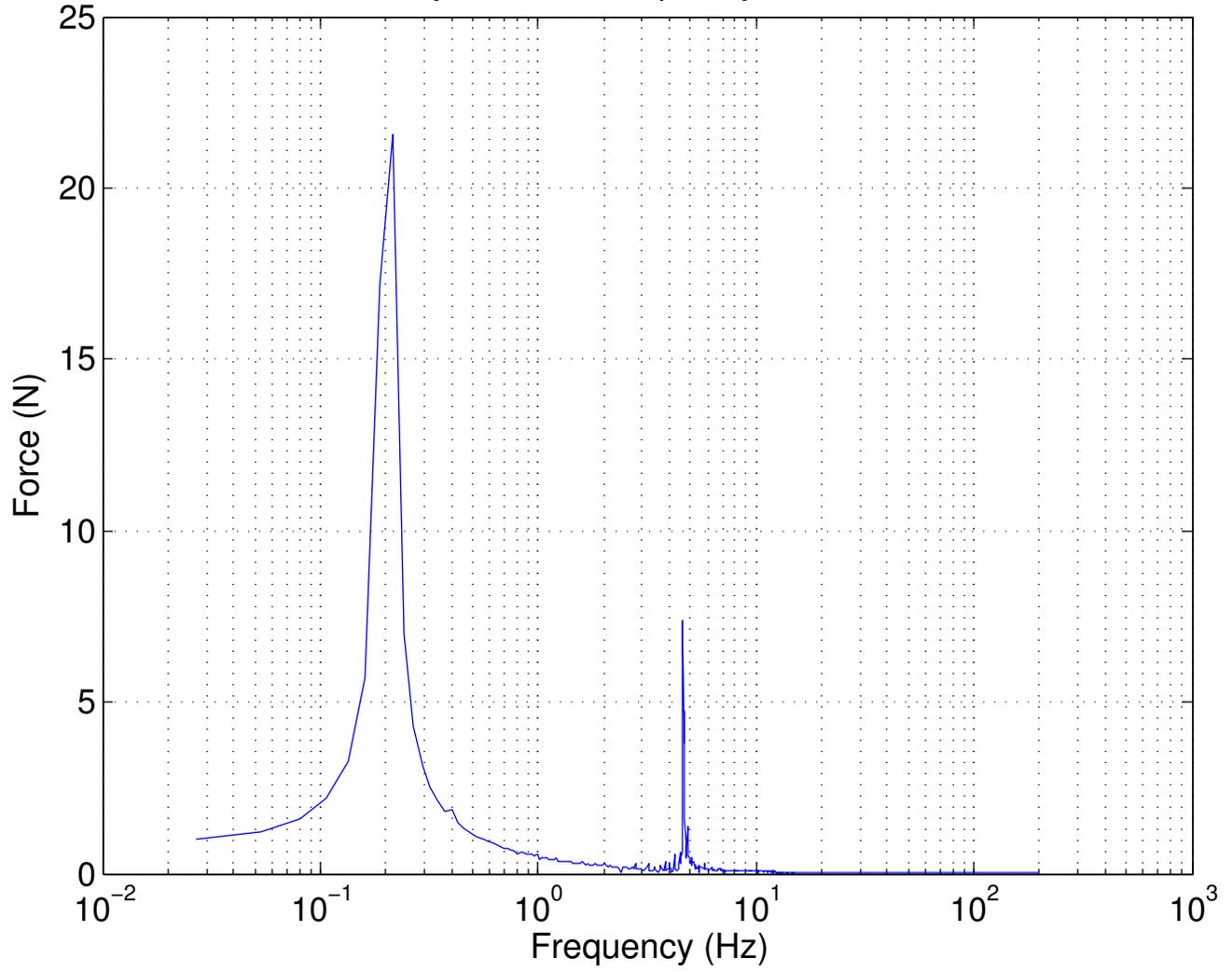


Analyse Force Frequency Test 13 – 15



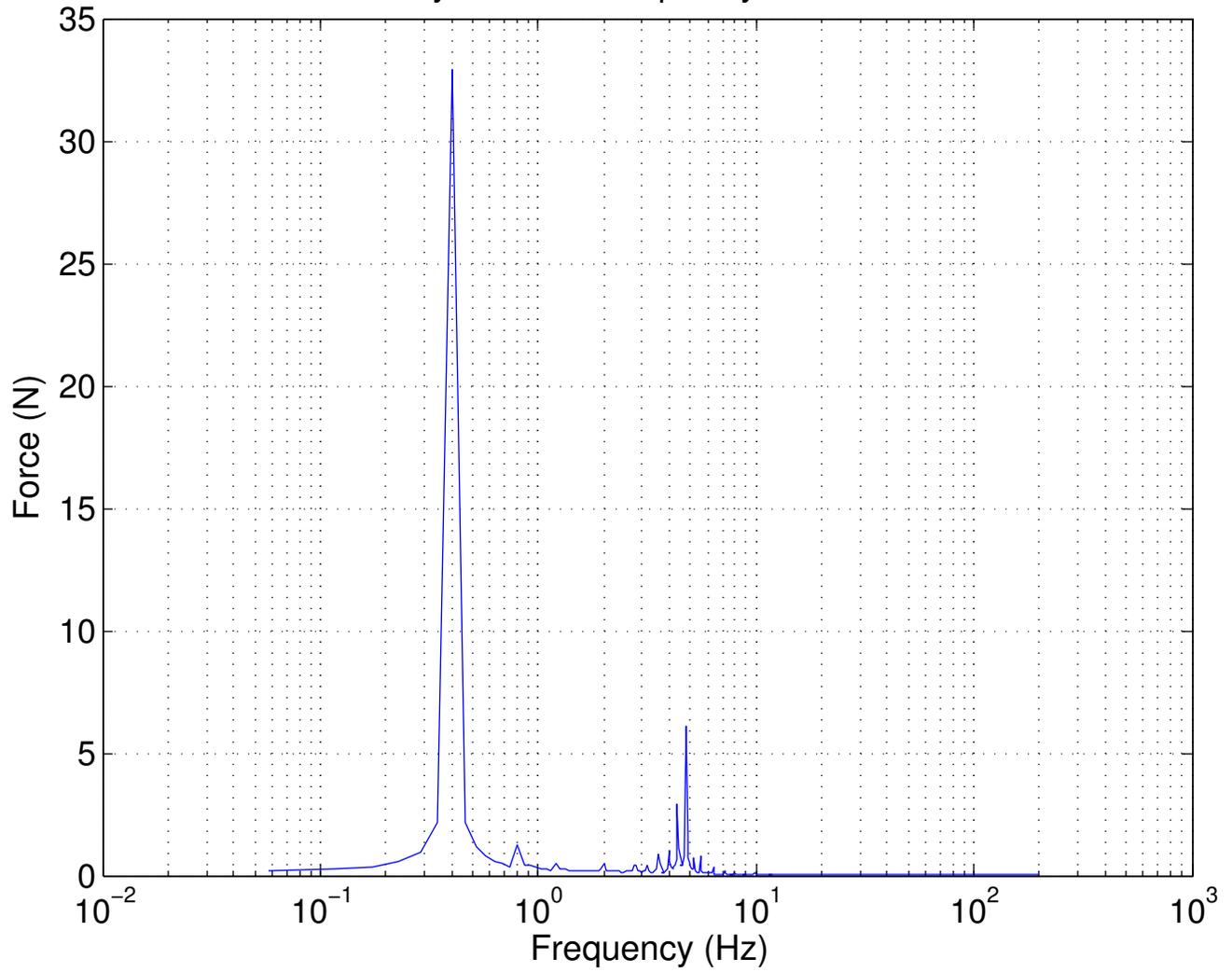


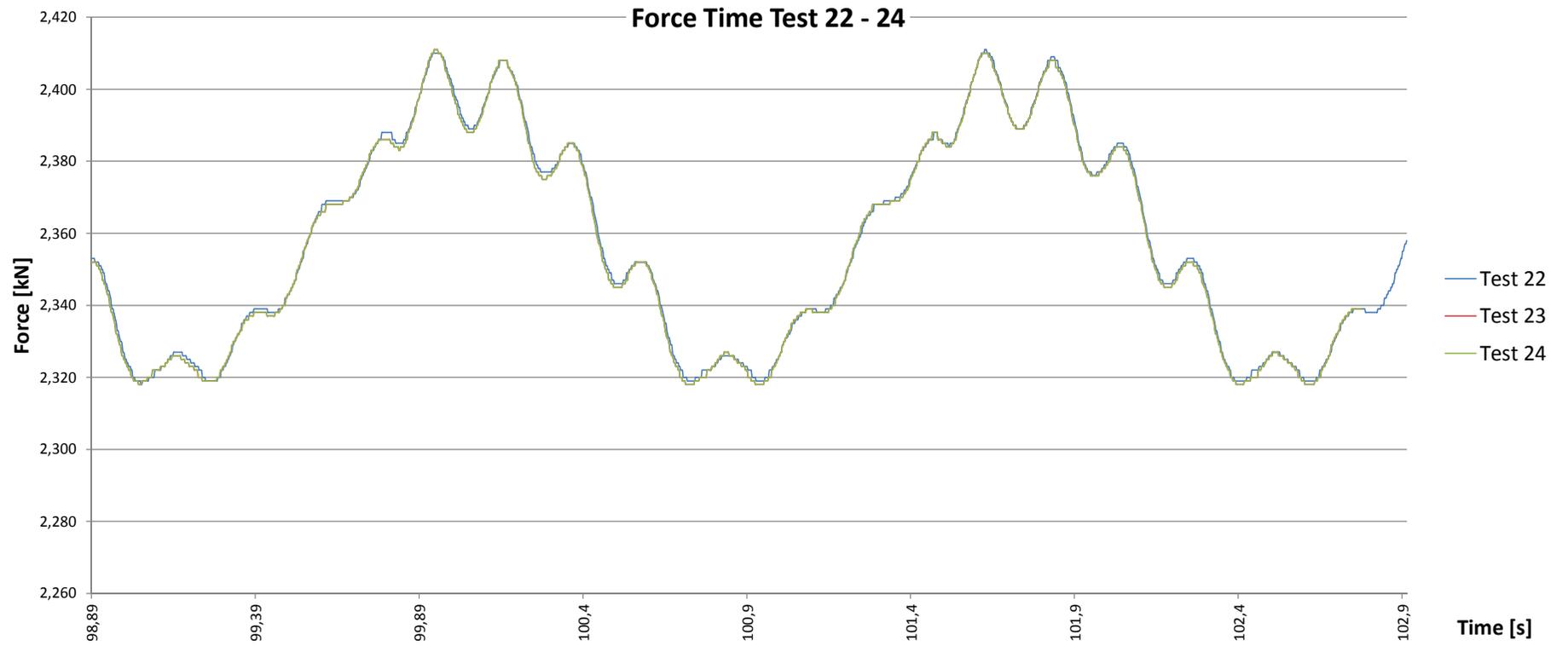
Analyse Force Frequency Test 16 – 18



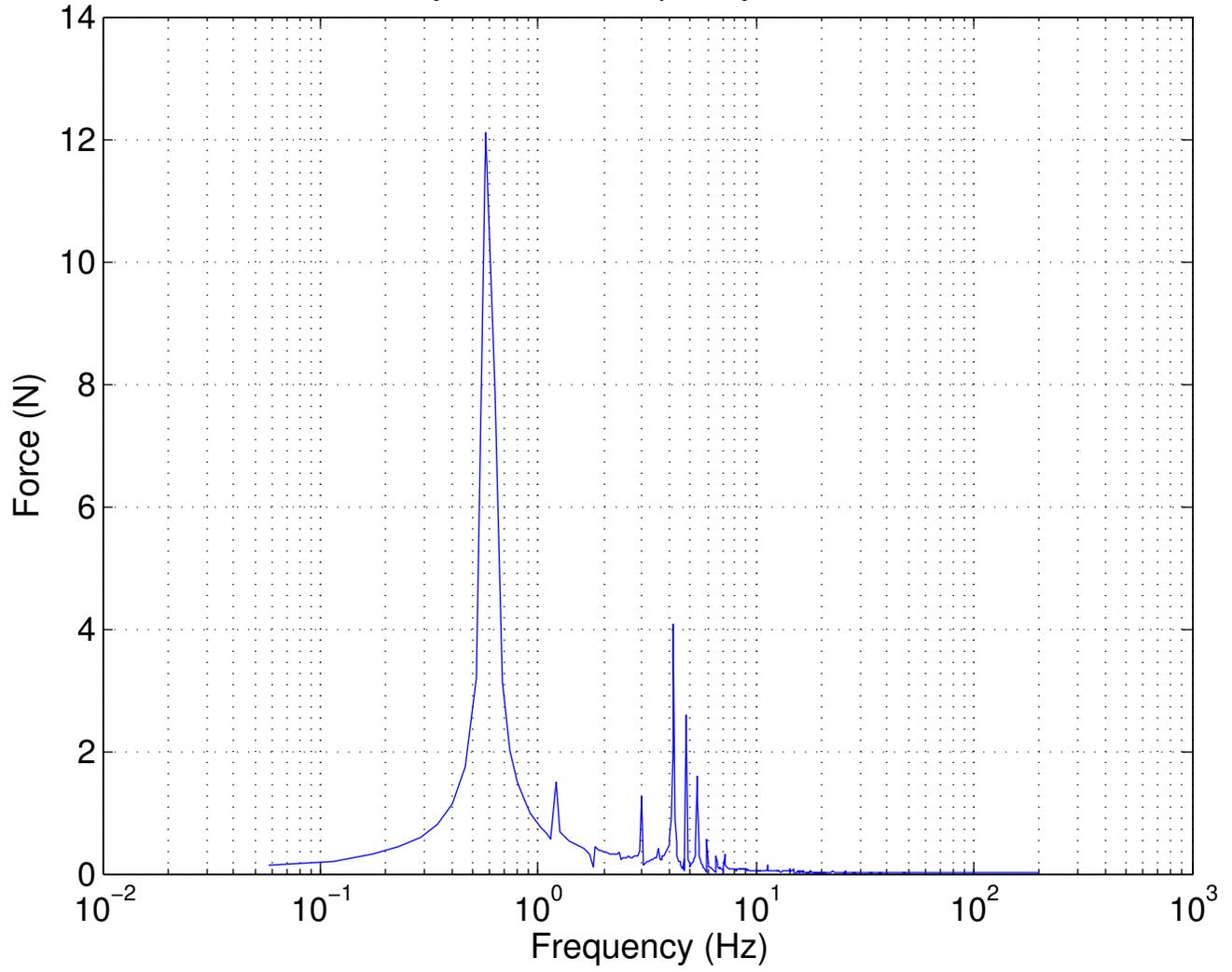


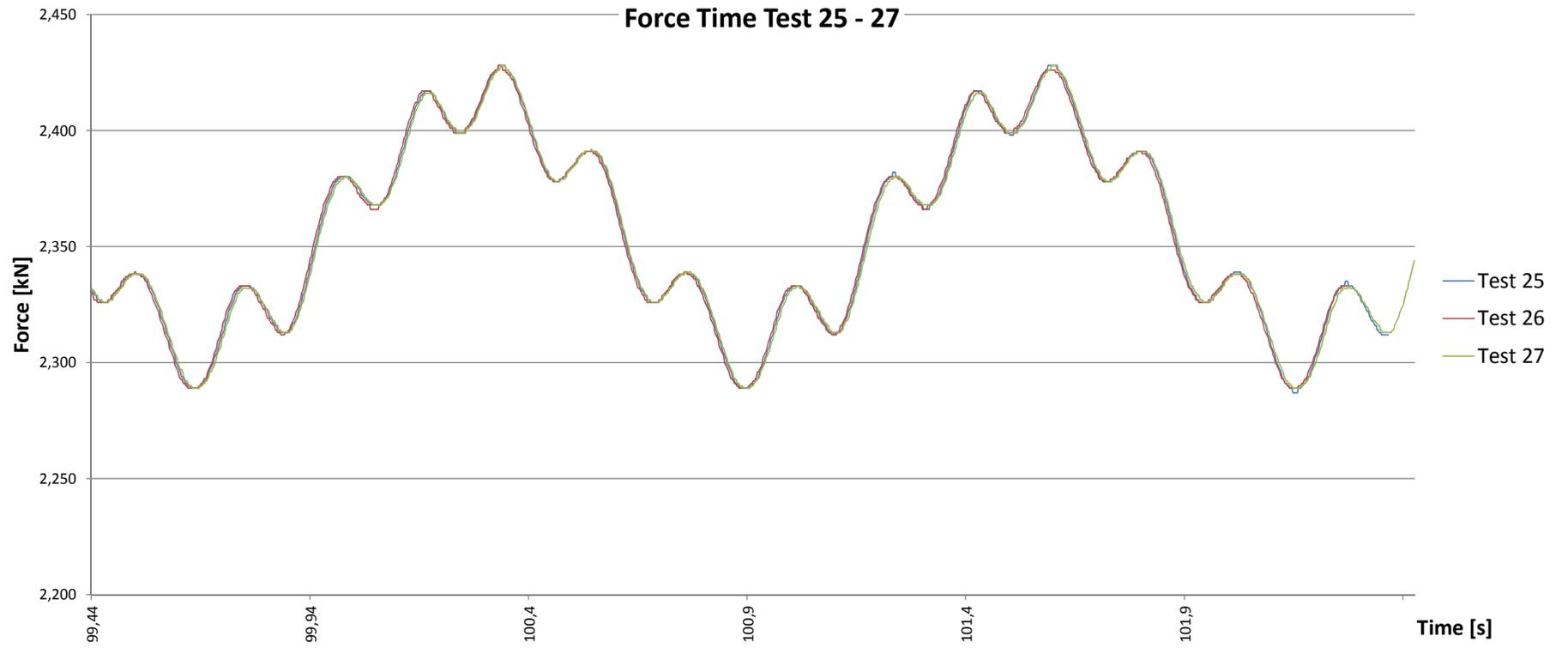
Analyse Force Frequency Test 19 – 21



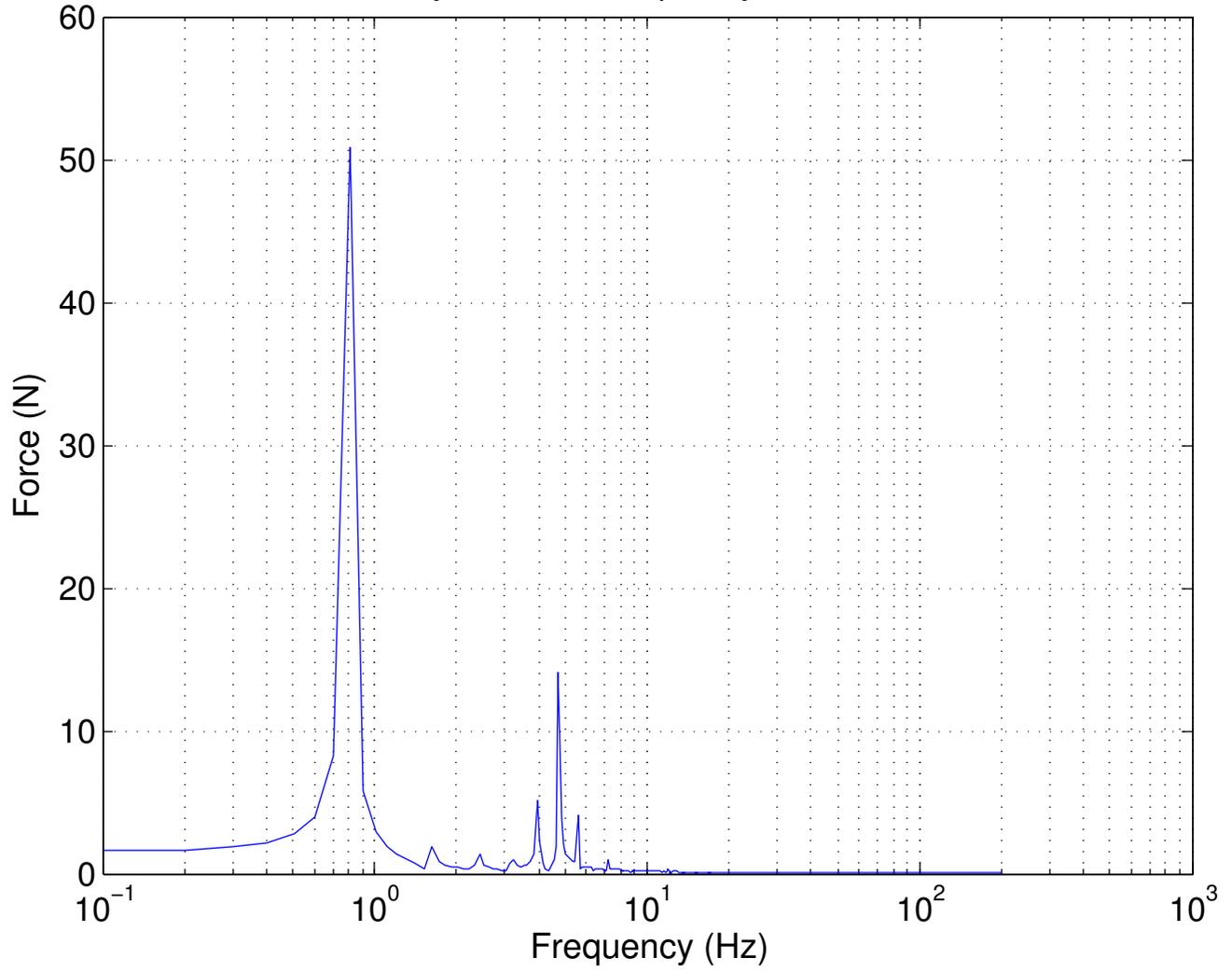


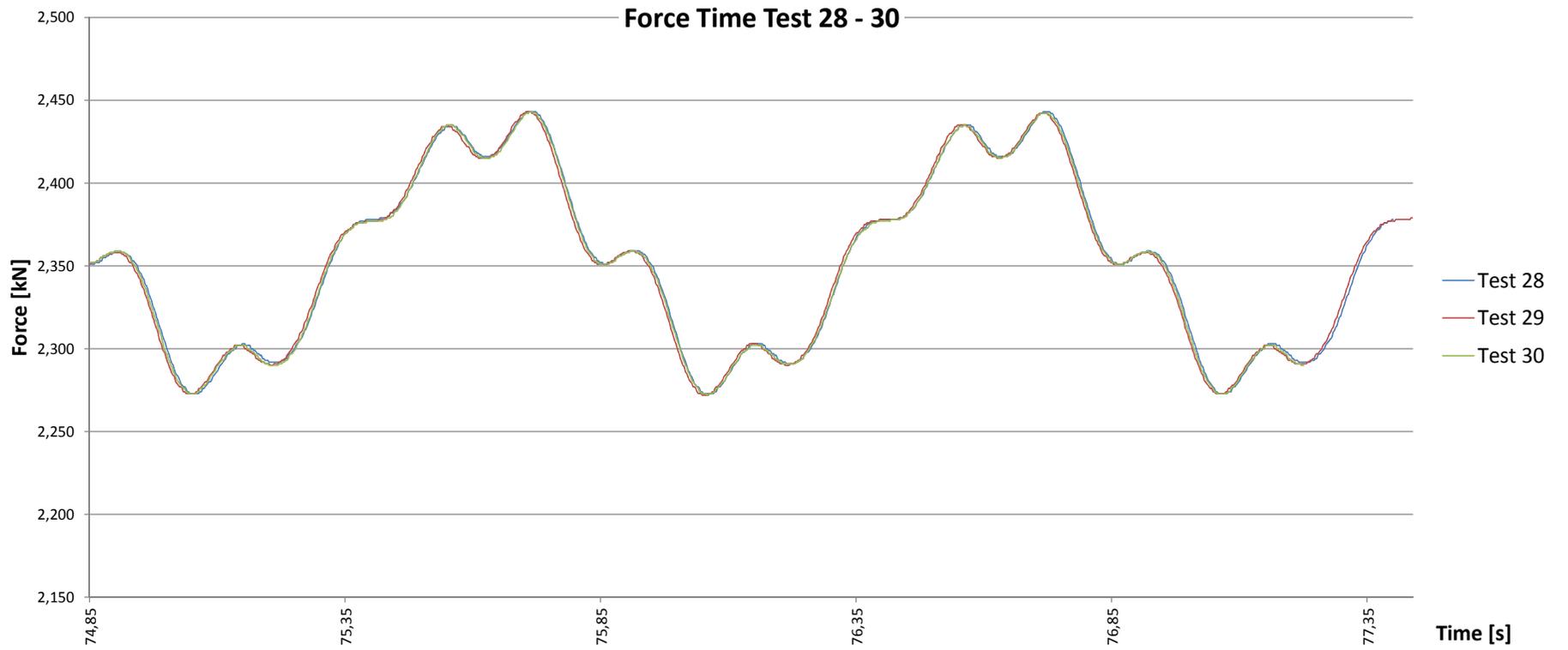
Analyse Force Frequency Test 22 – 24



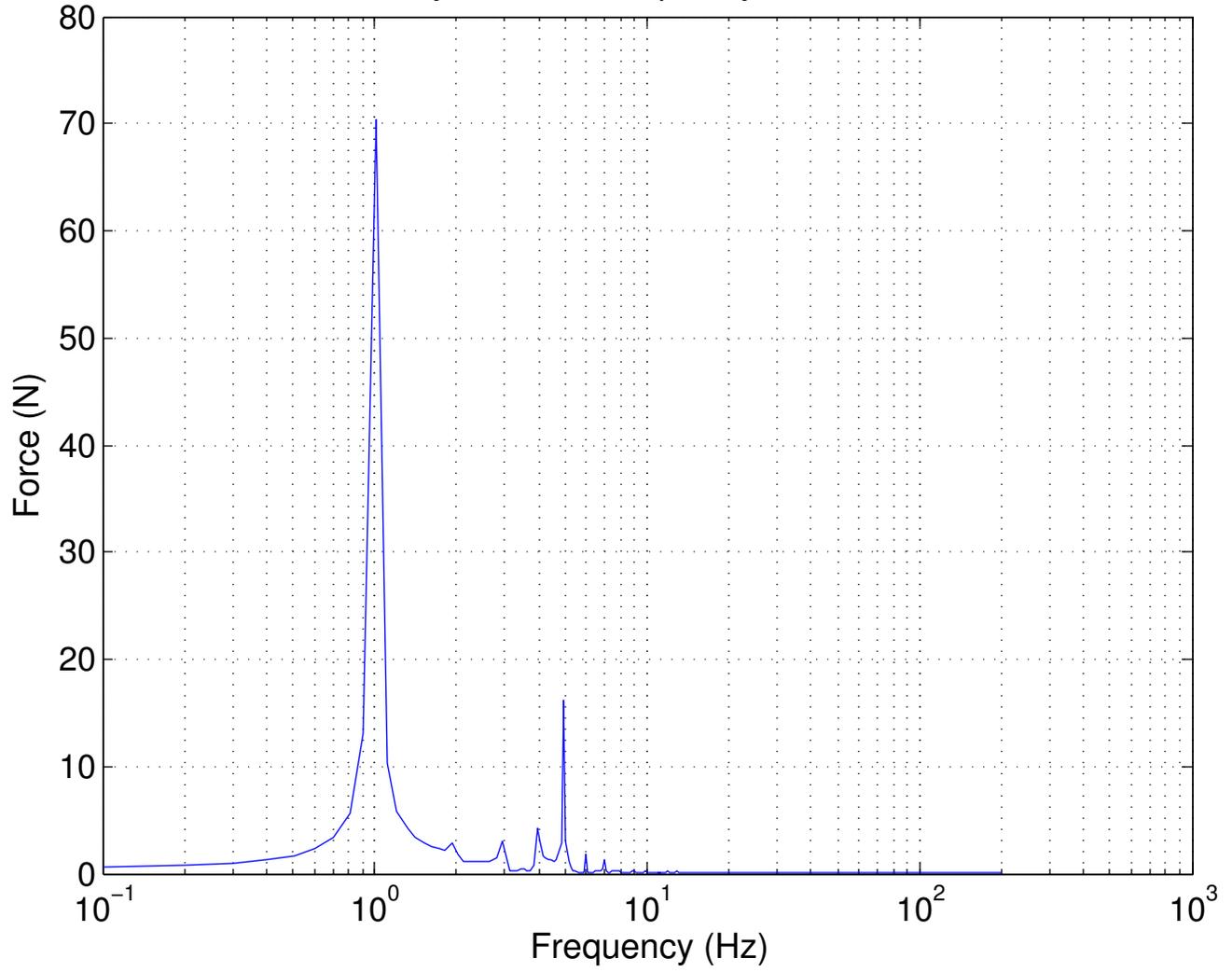


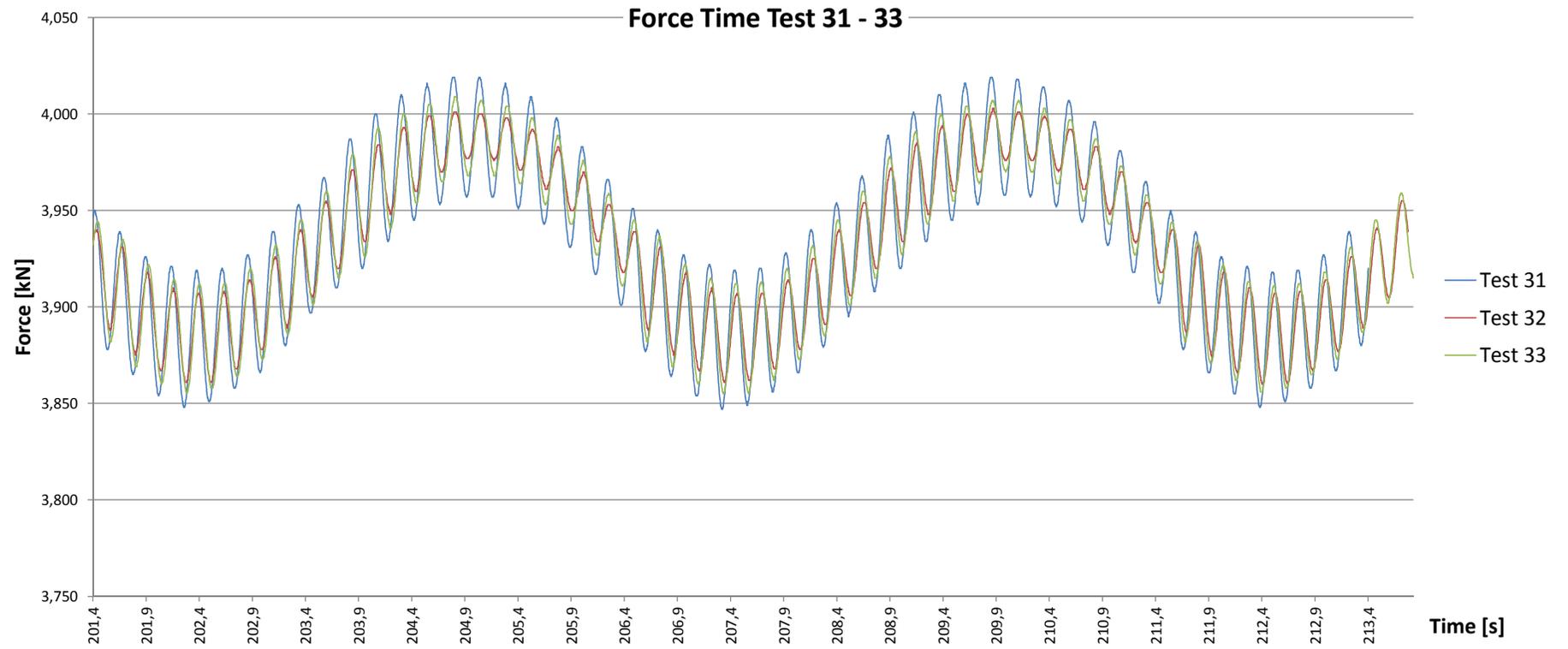
Analyse Force Frequency Test 25 – 27



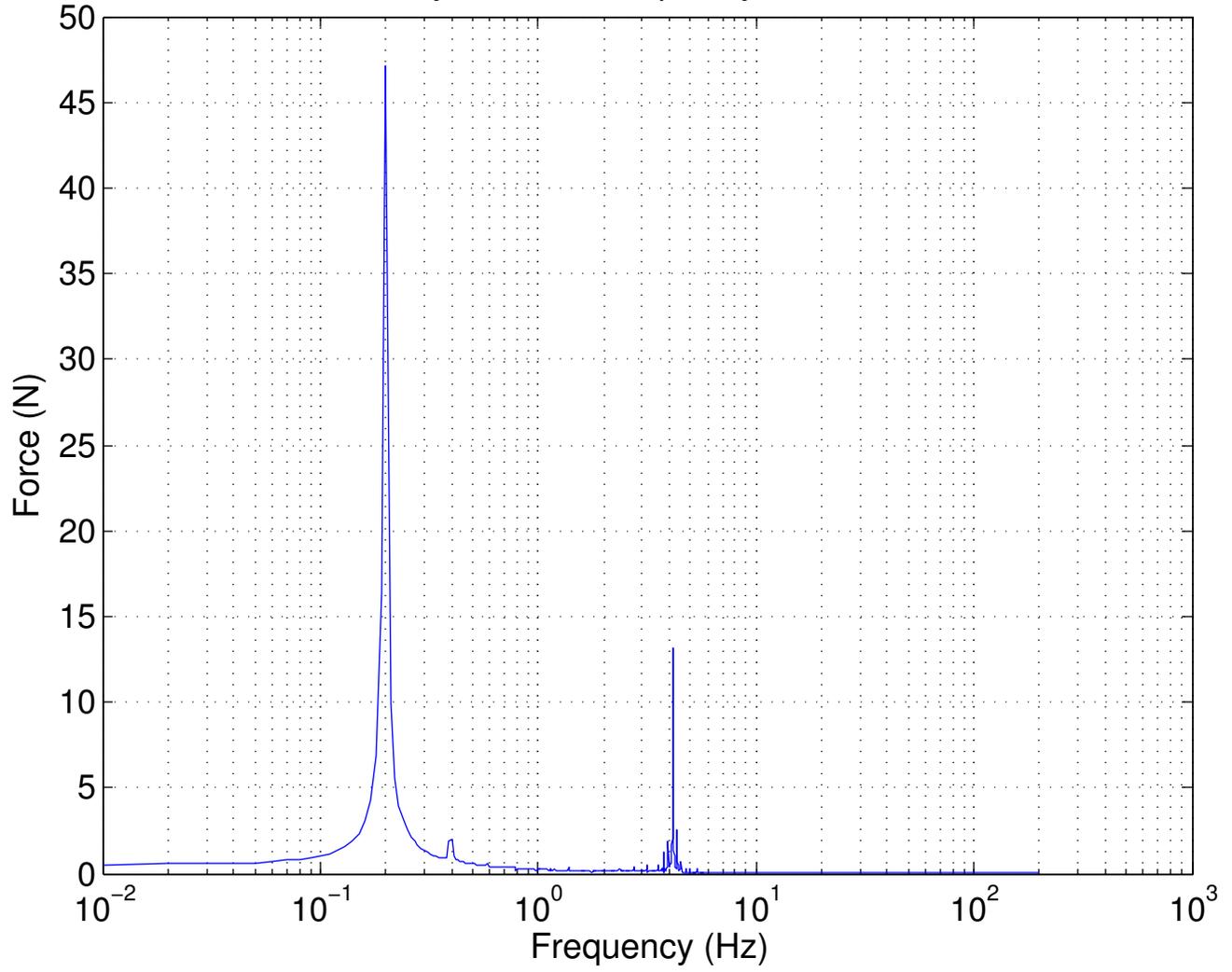


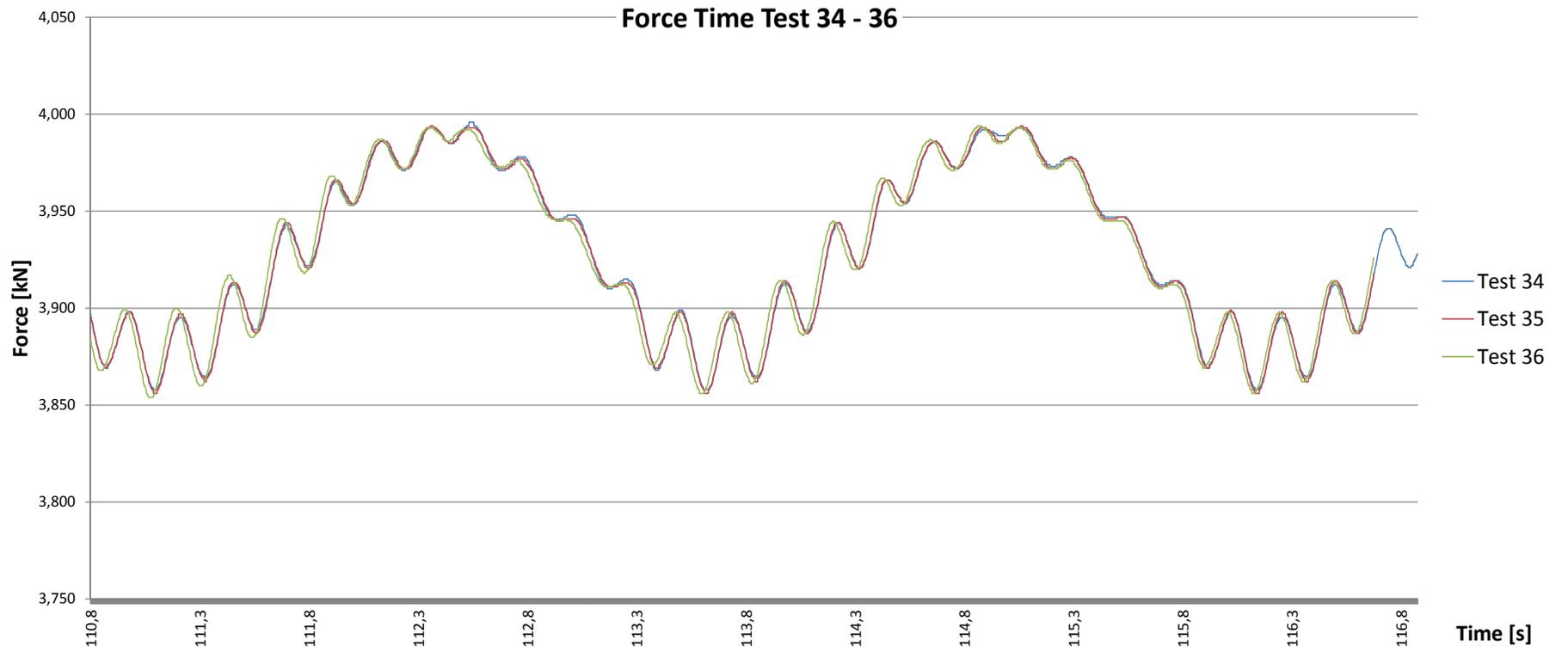
Analyse Force Frequency Test 28 – 30



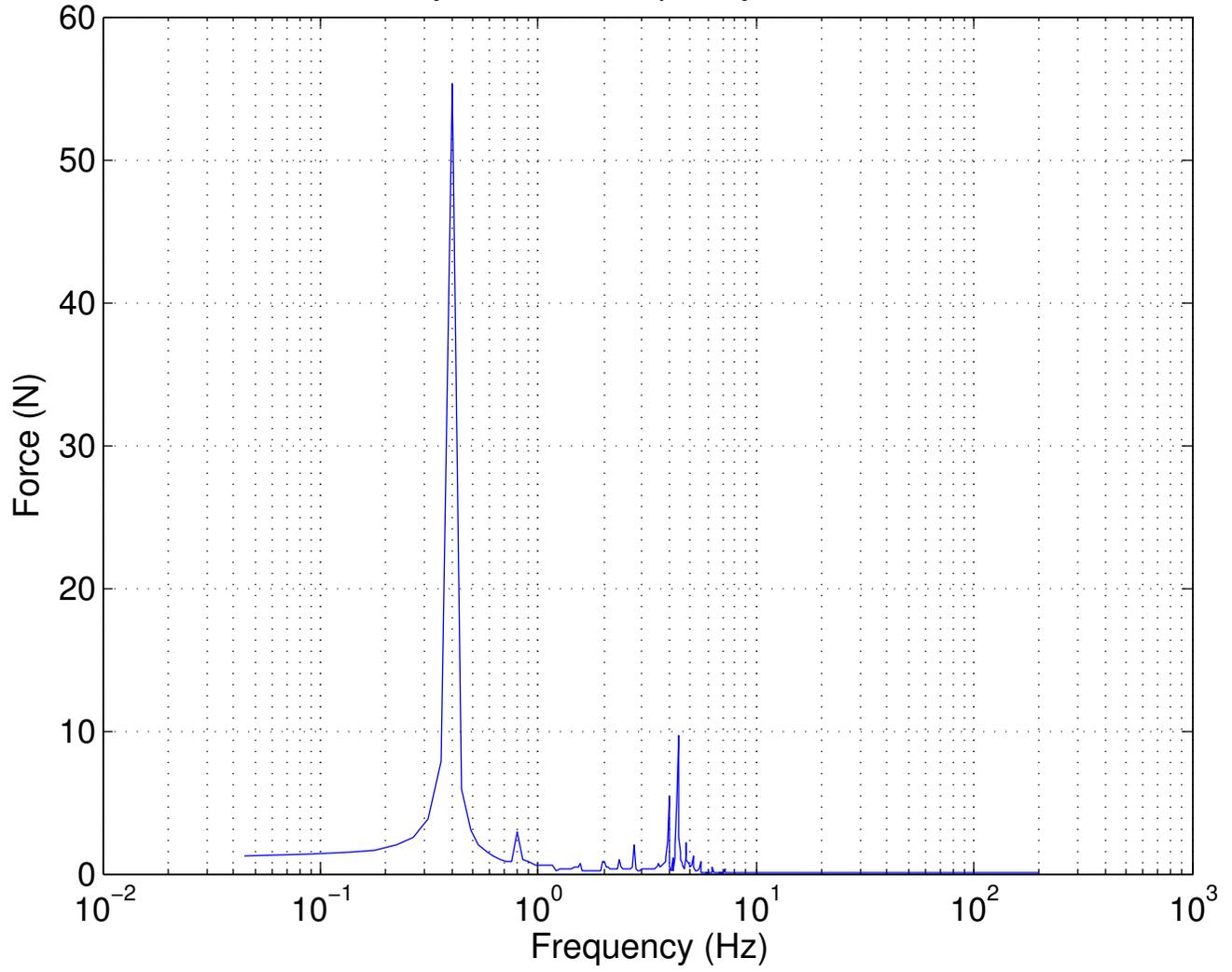


Analyse Force Frequency Test 31 – 33



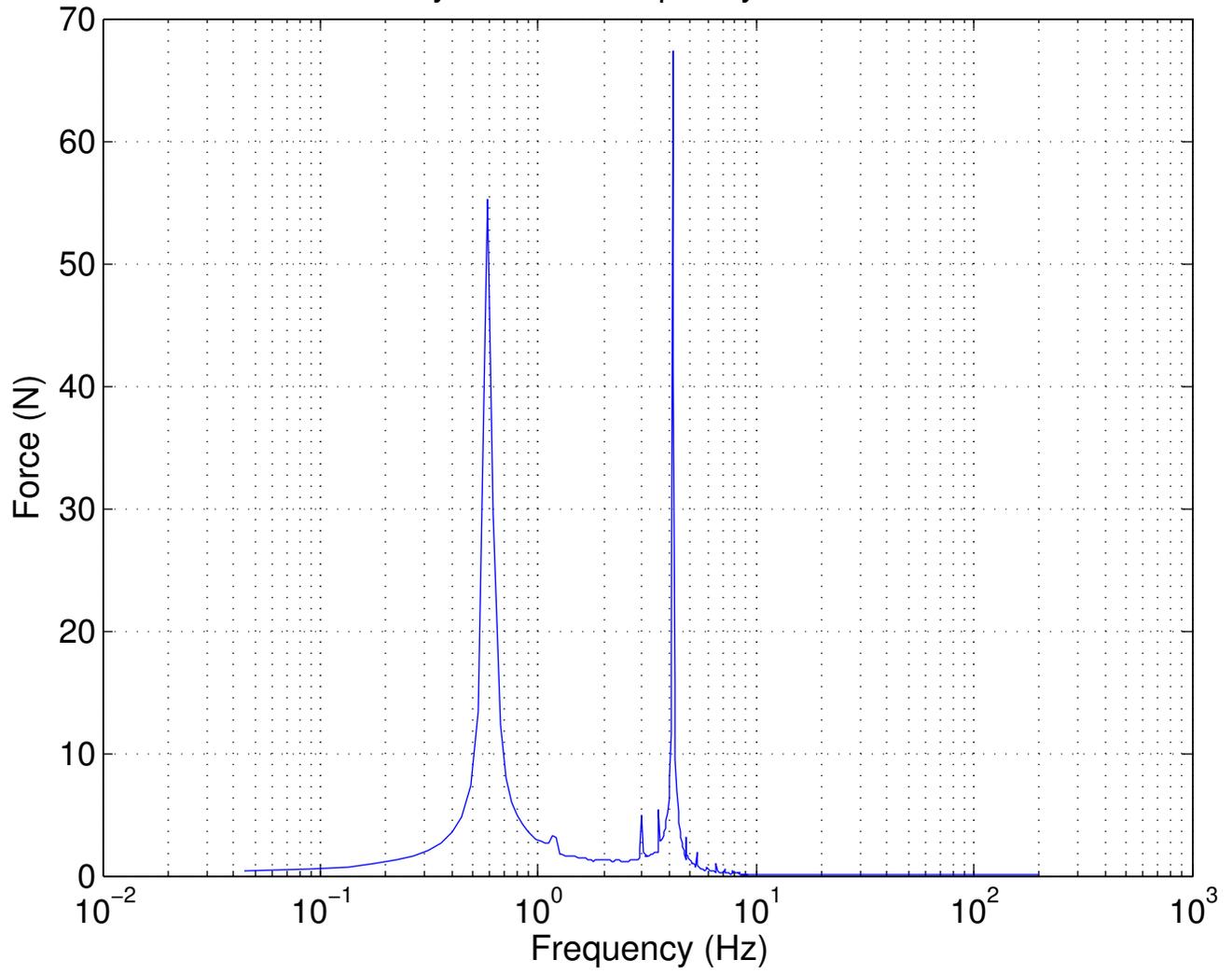


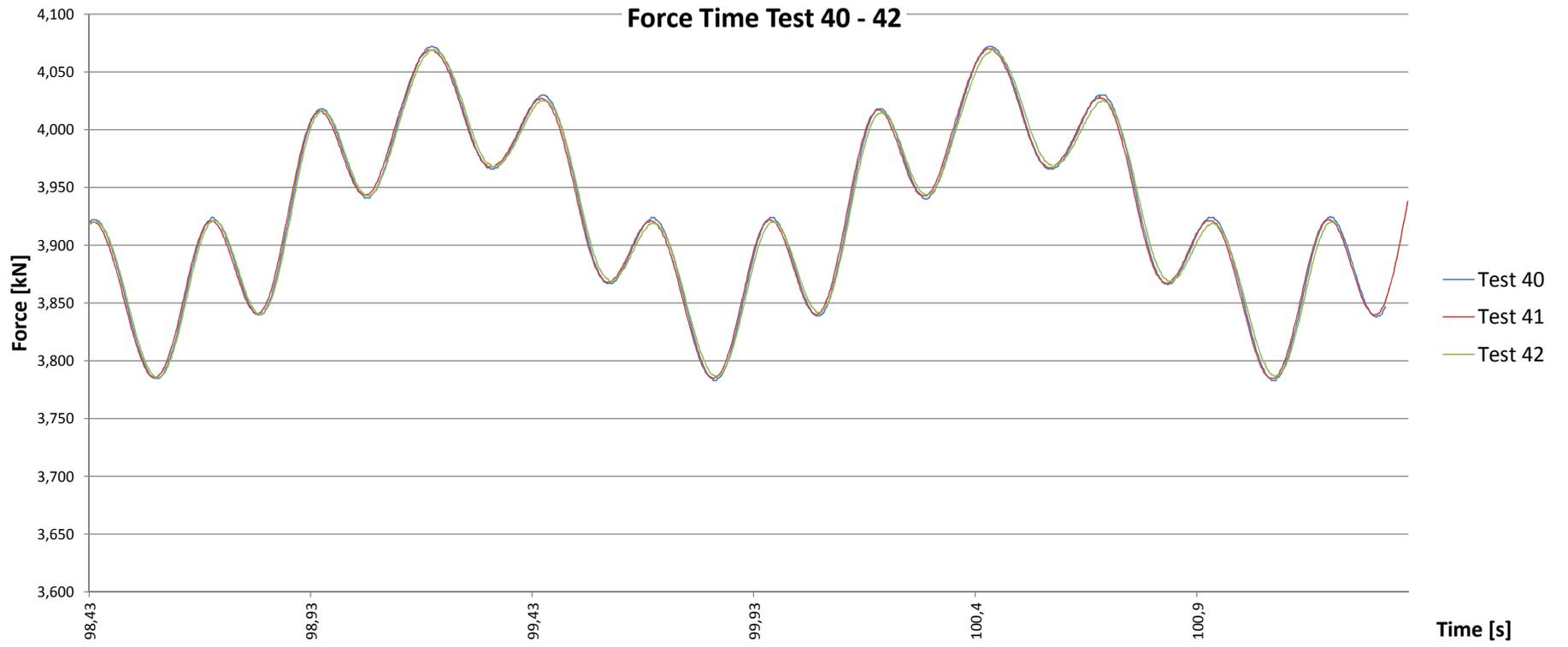
Analyse Force Frequency Test 34 – 36



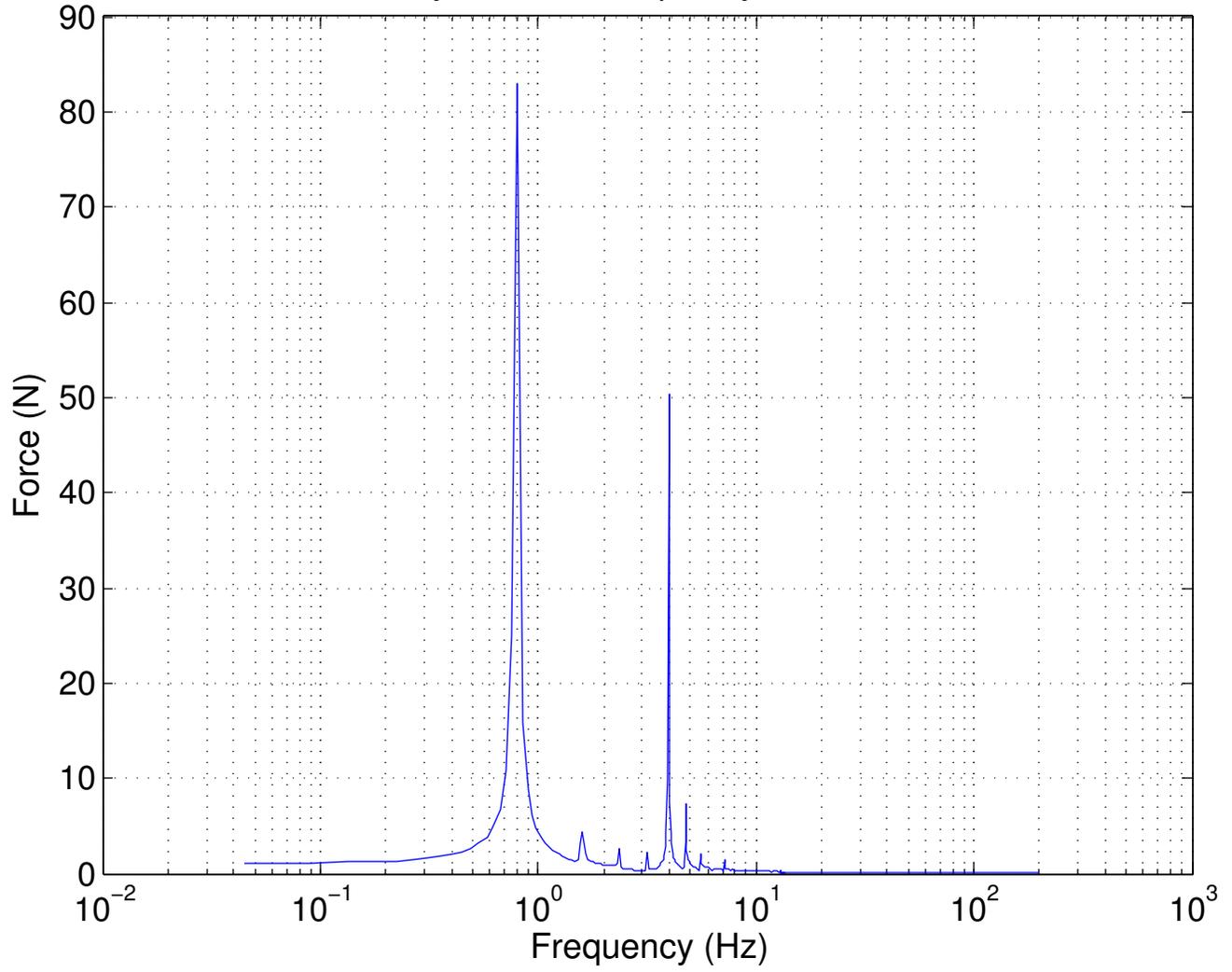


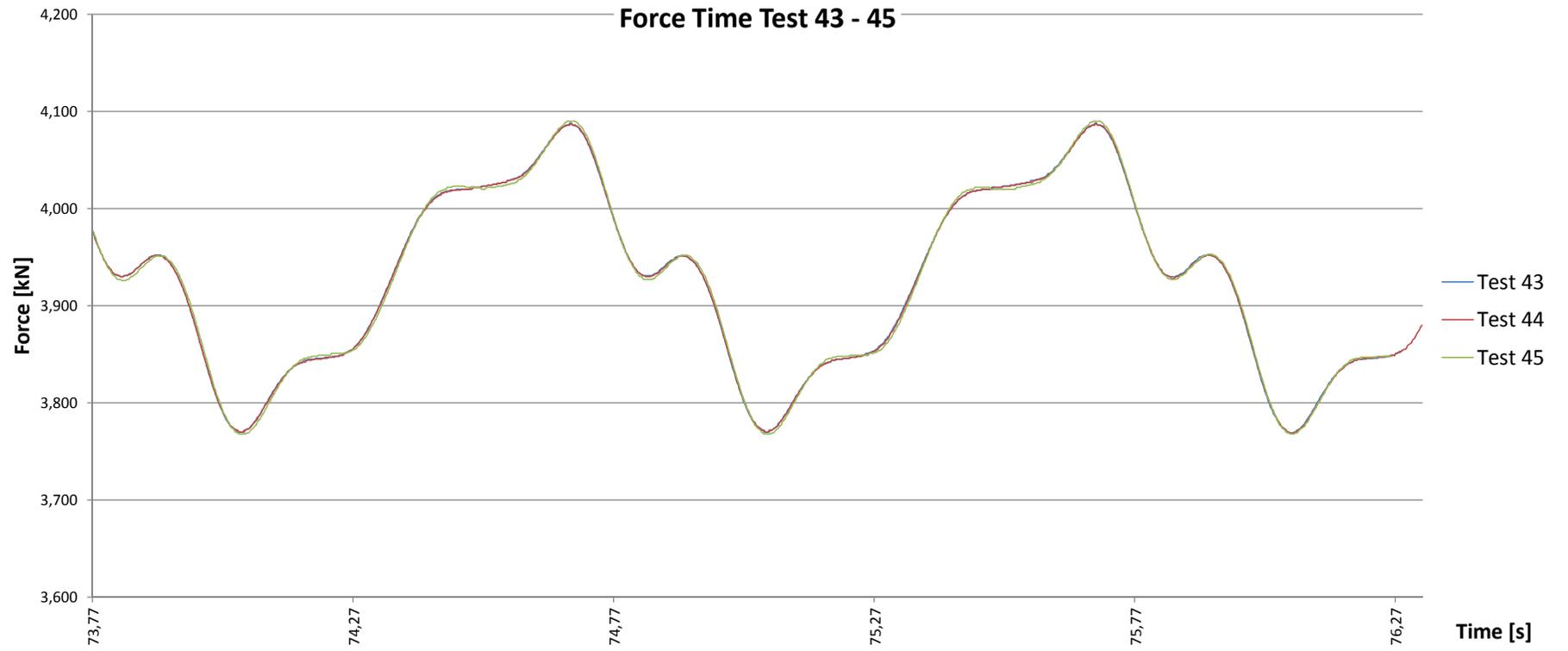
Analyse Force Frequency Test 37 – 39



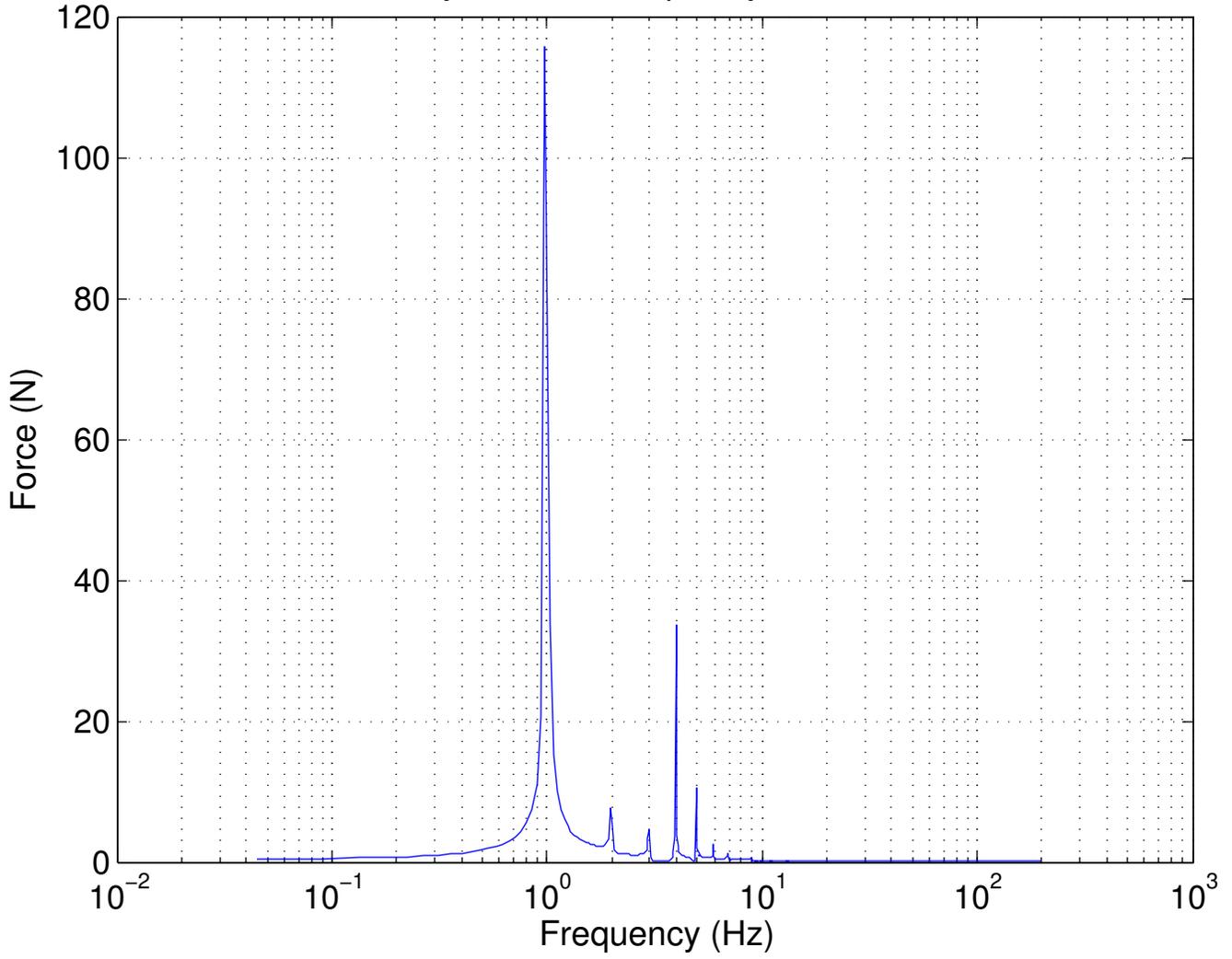


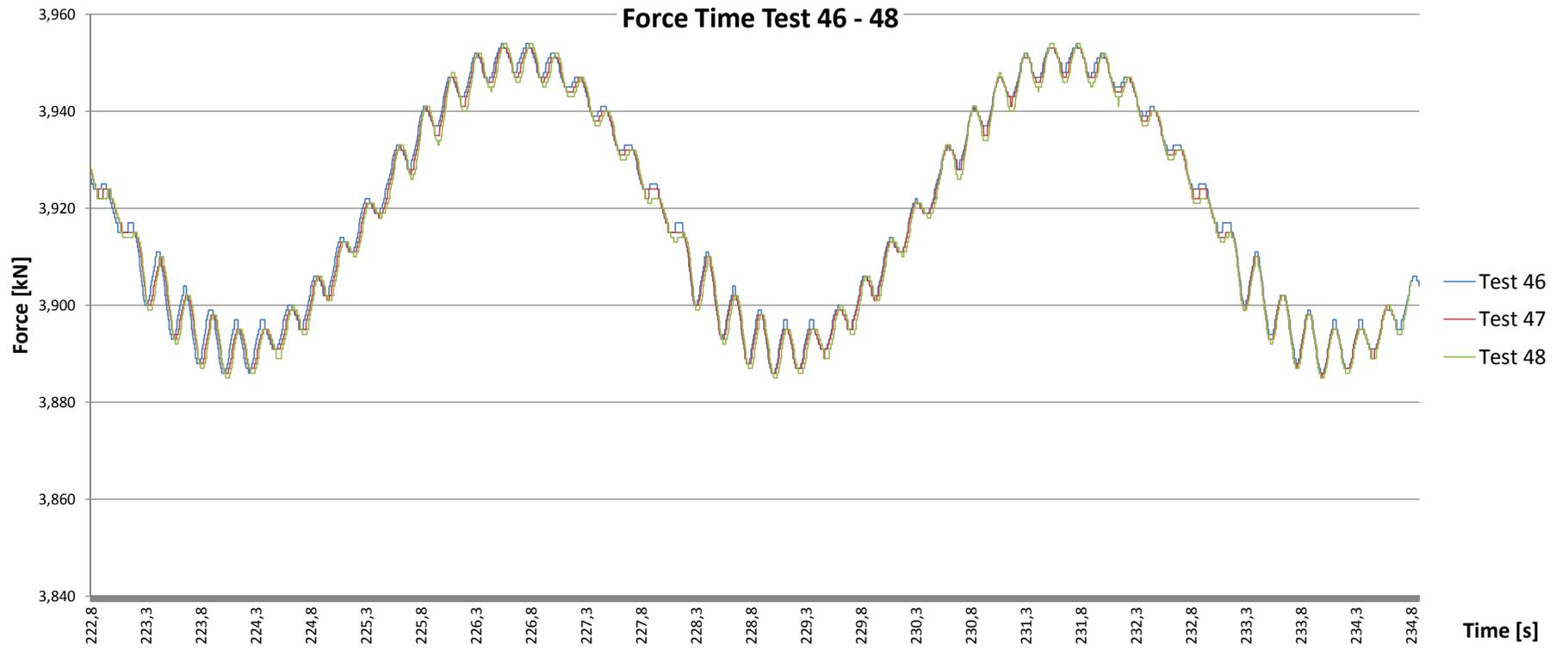
Analyse Force Frequency Test 40 – 42



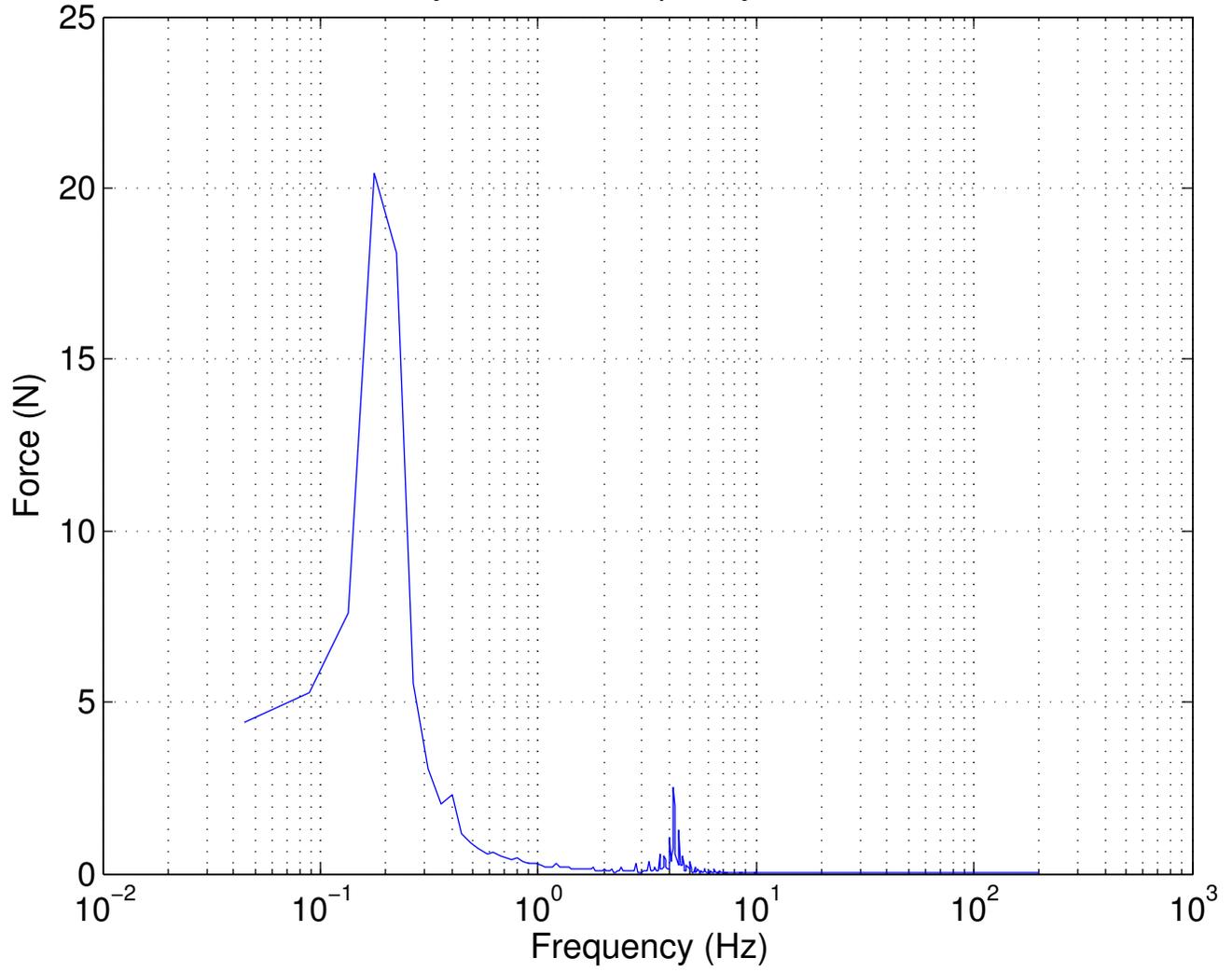


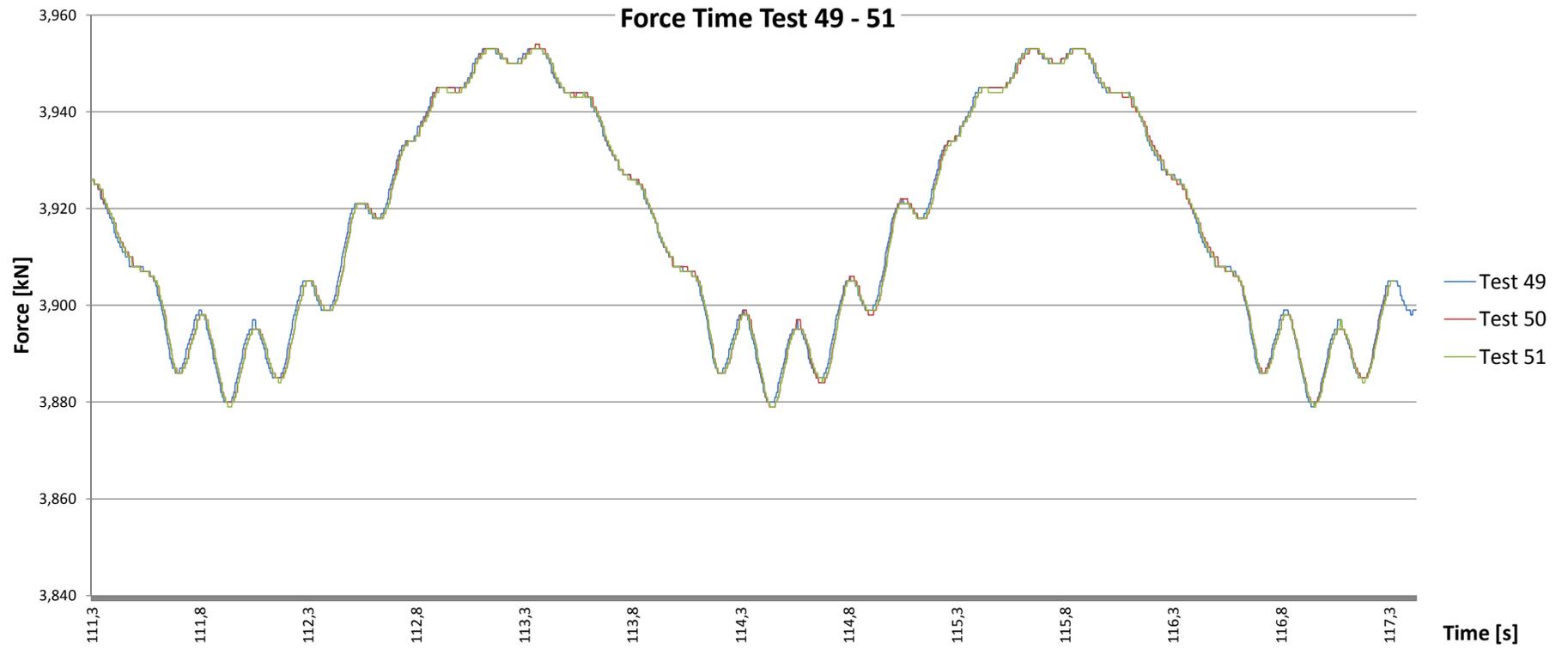
Analyse Force Frequency Test 43 – 45



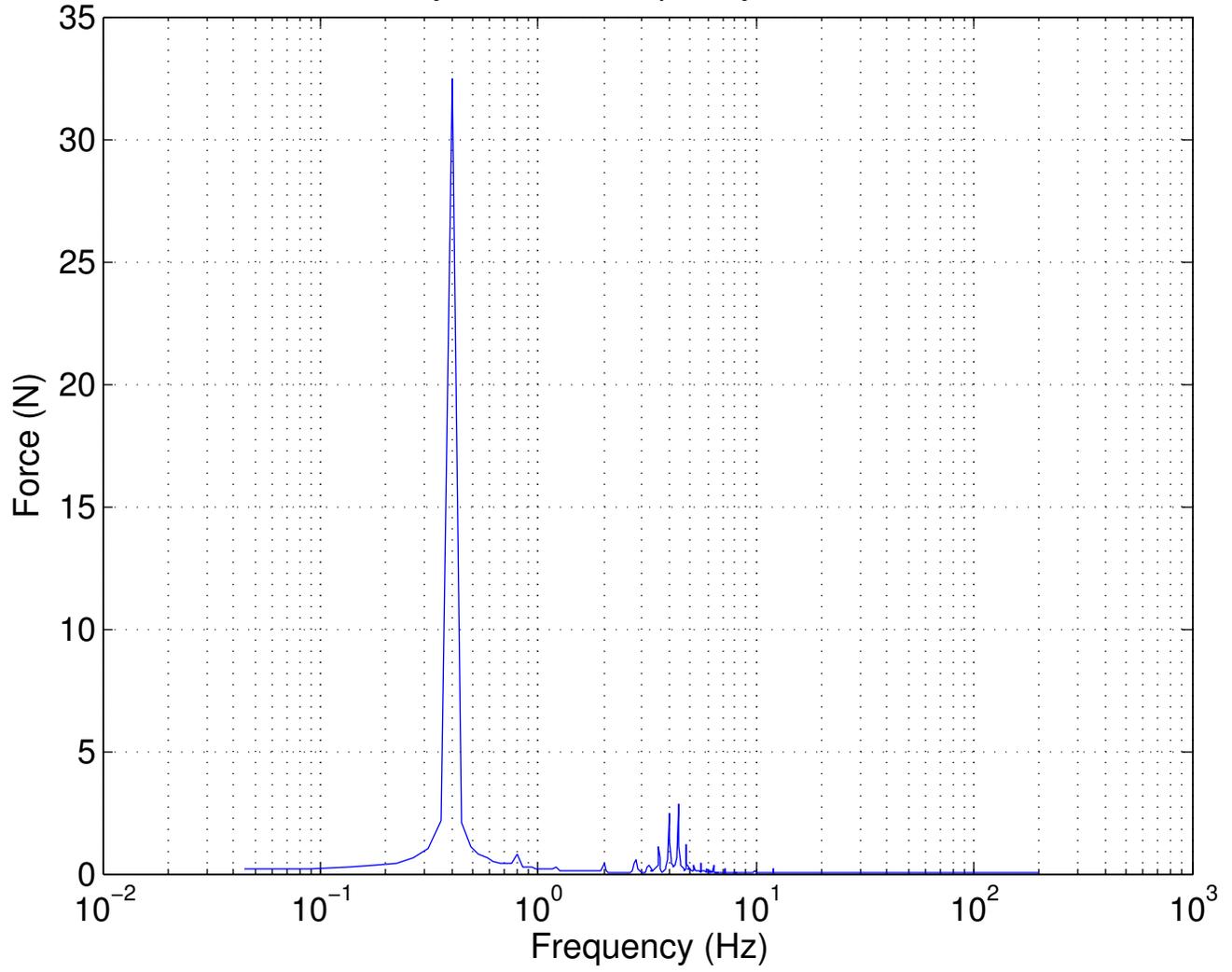


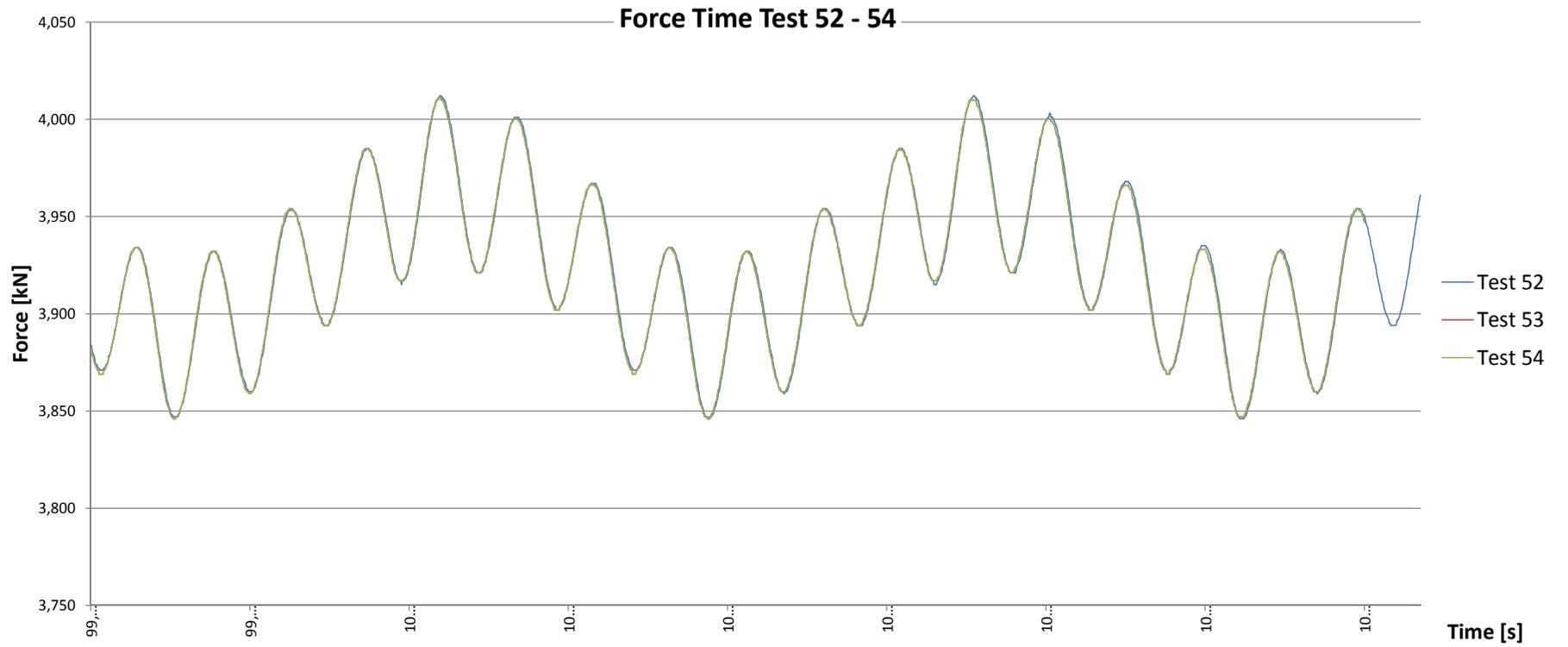
Analyse Force Frequency Test 46 – 48



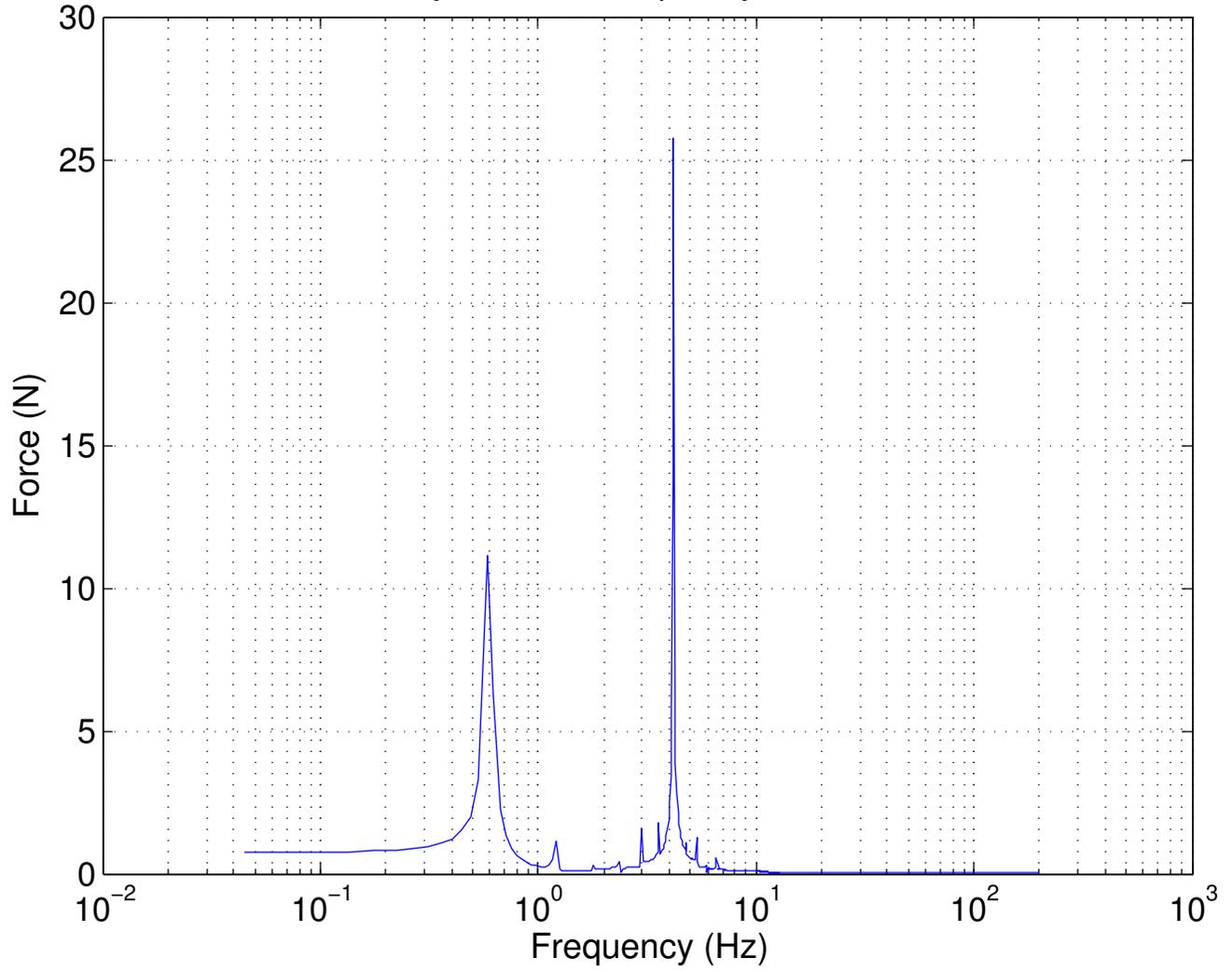


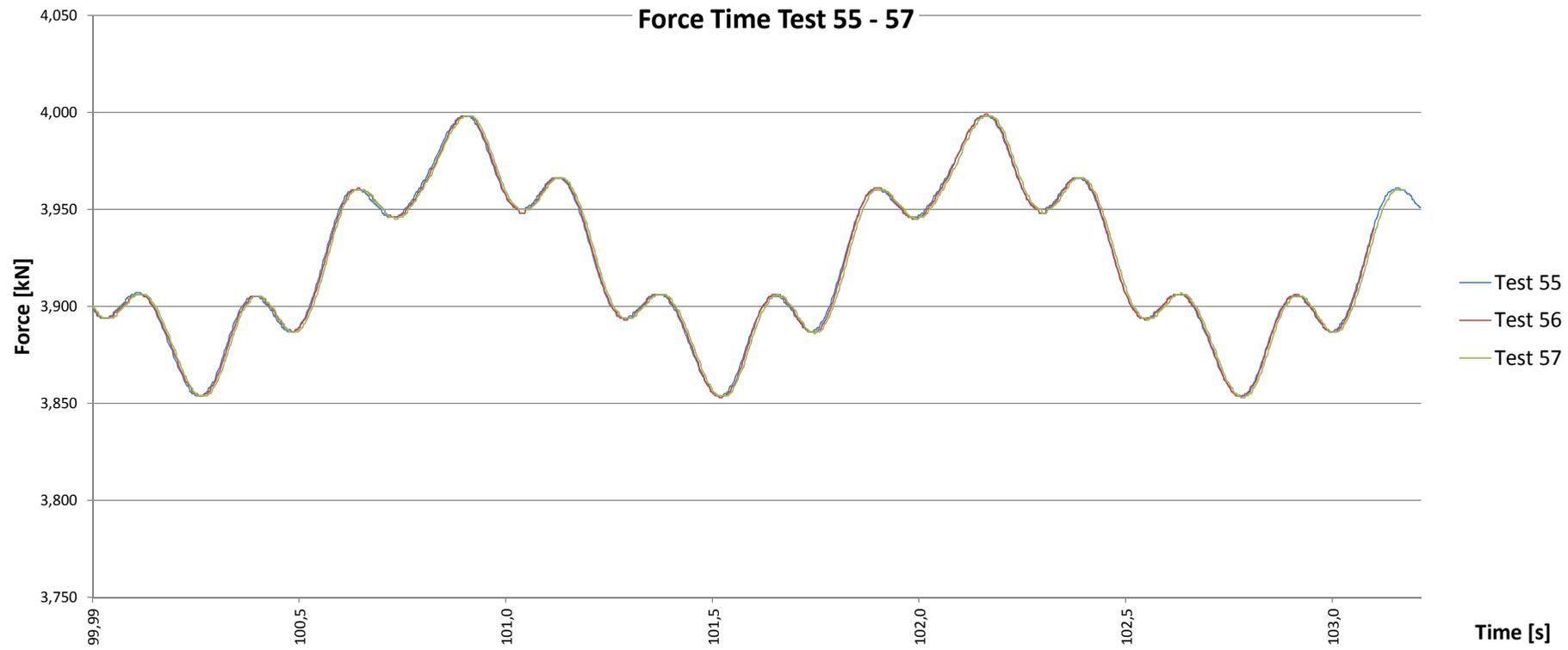
Analyse Force Frequency Test 49 – 51



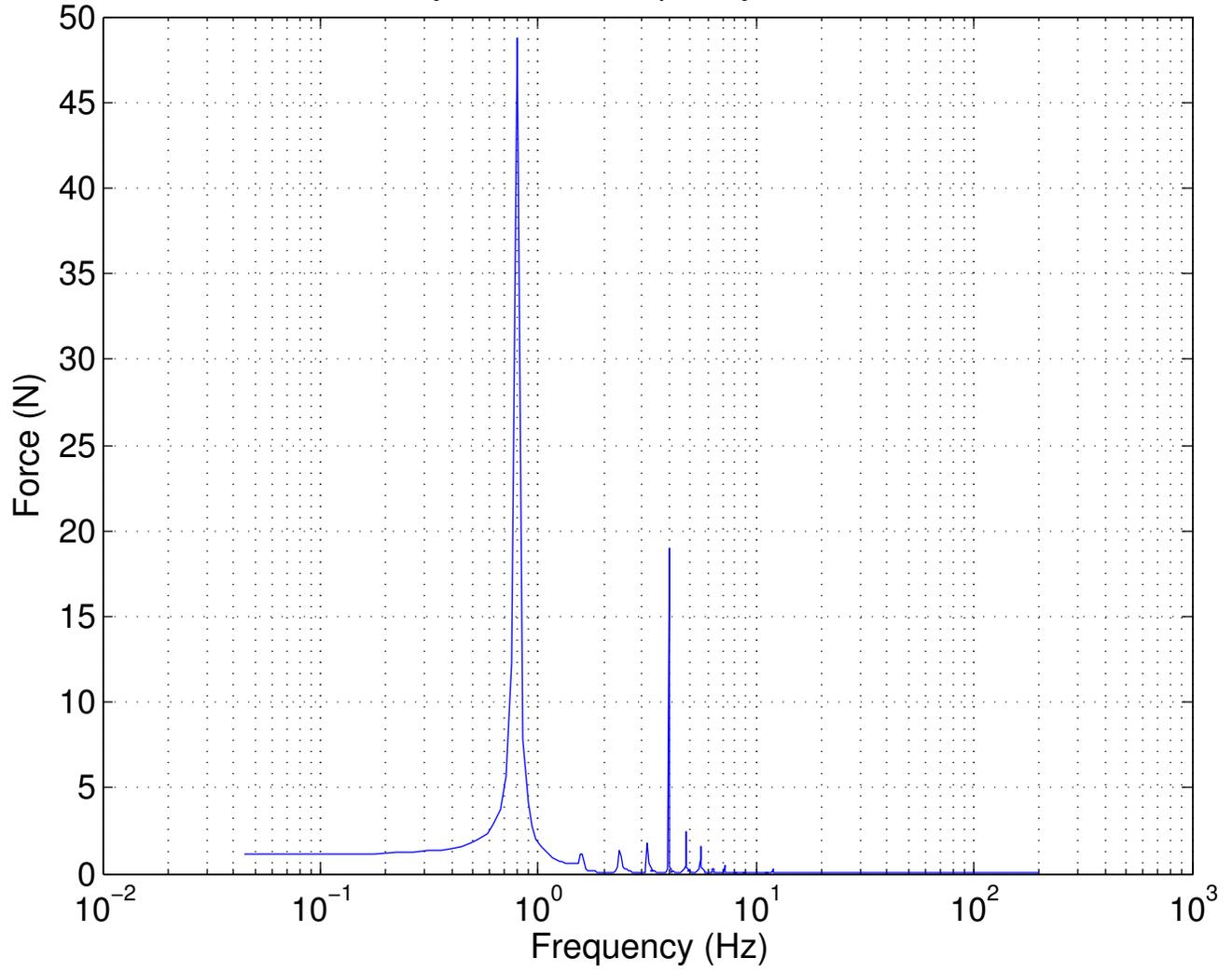


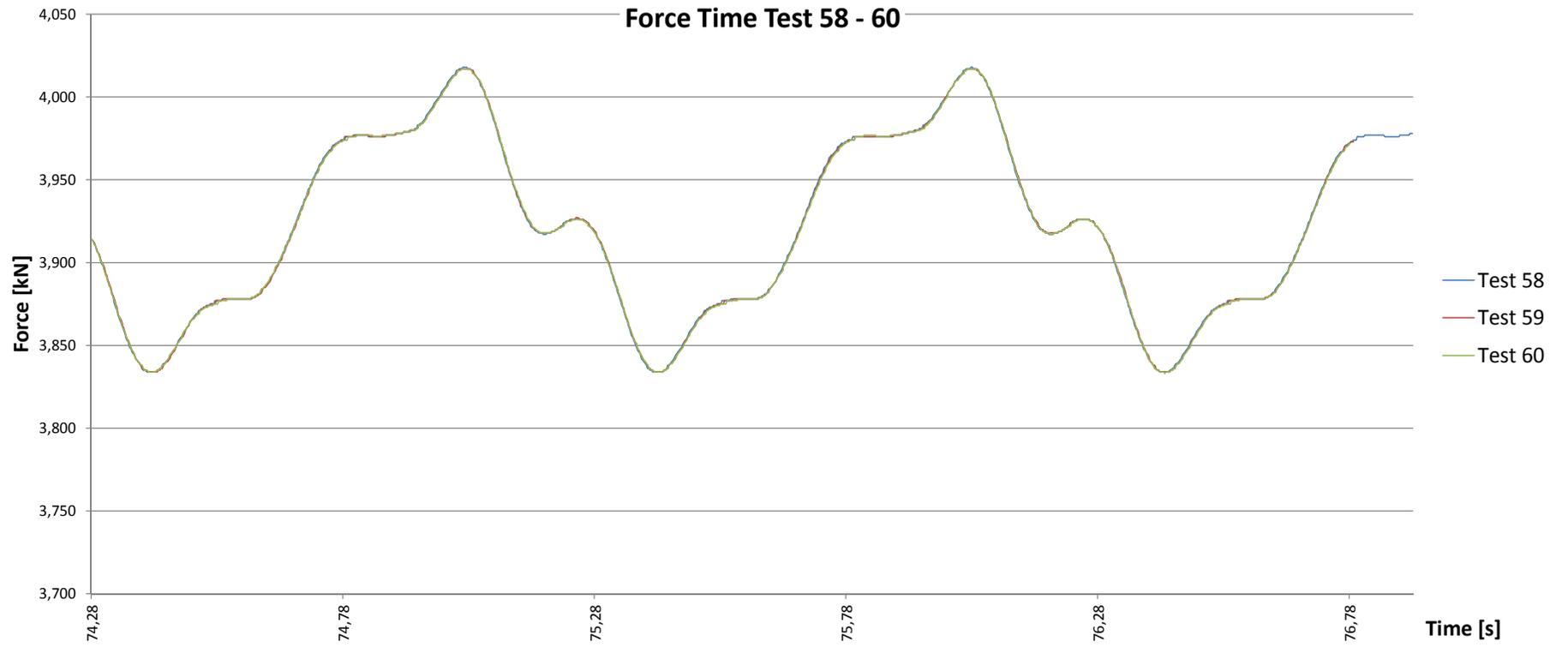
Analyse Force Frequency Test 52 – 54



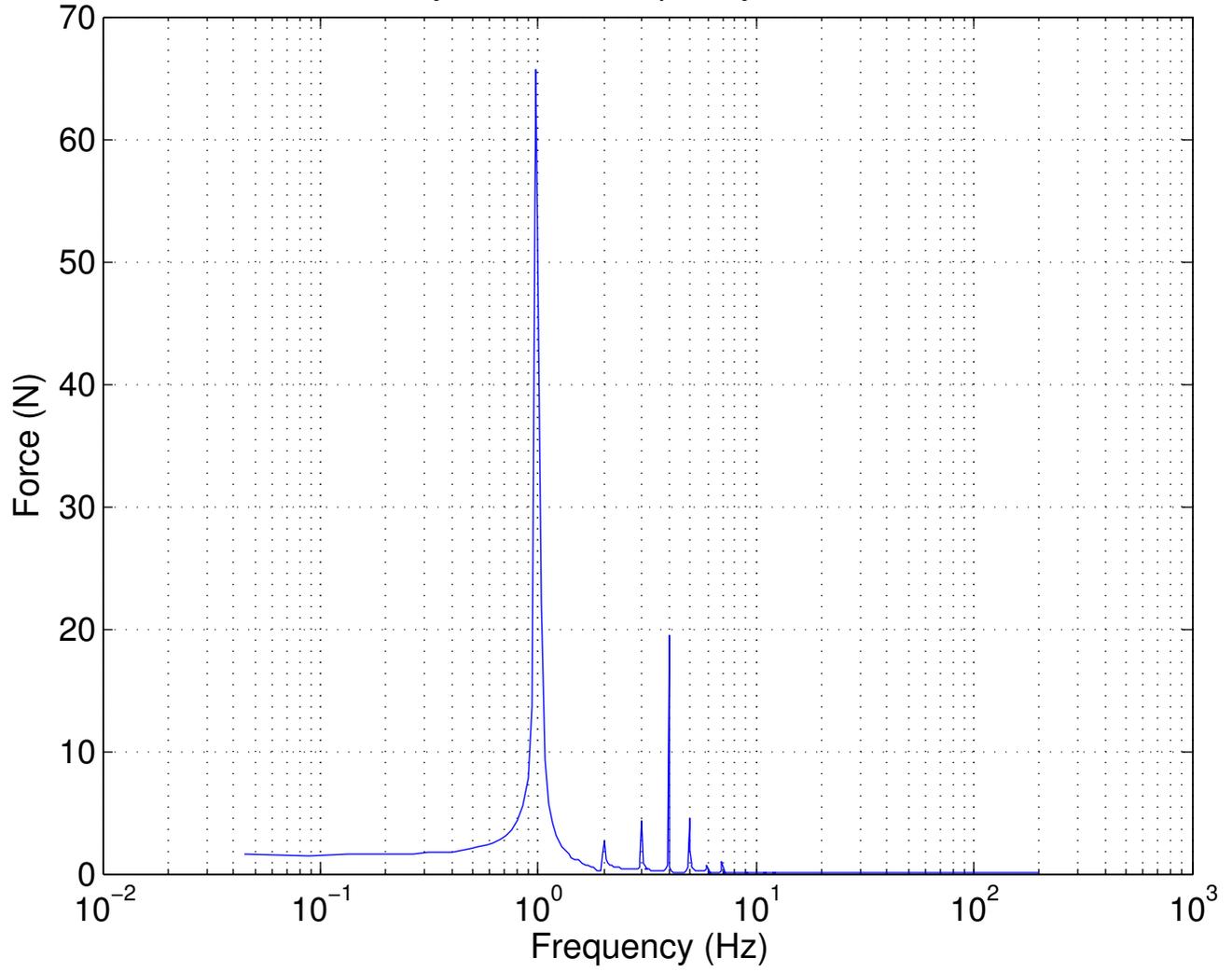


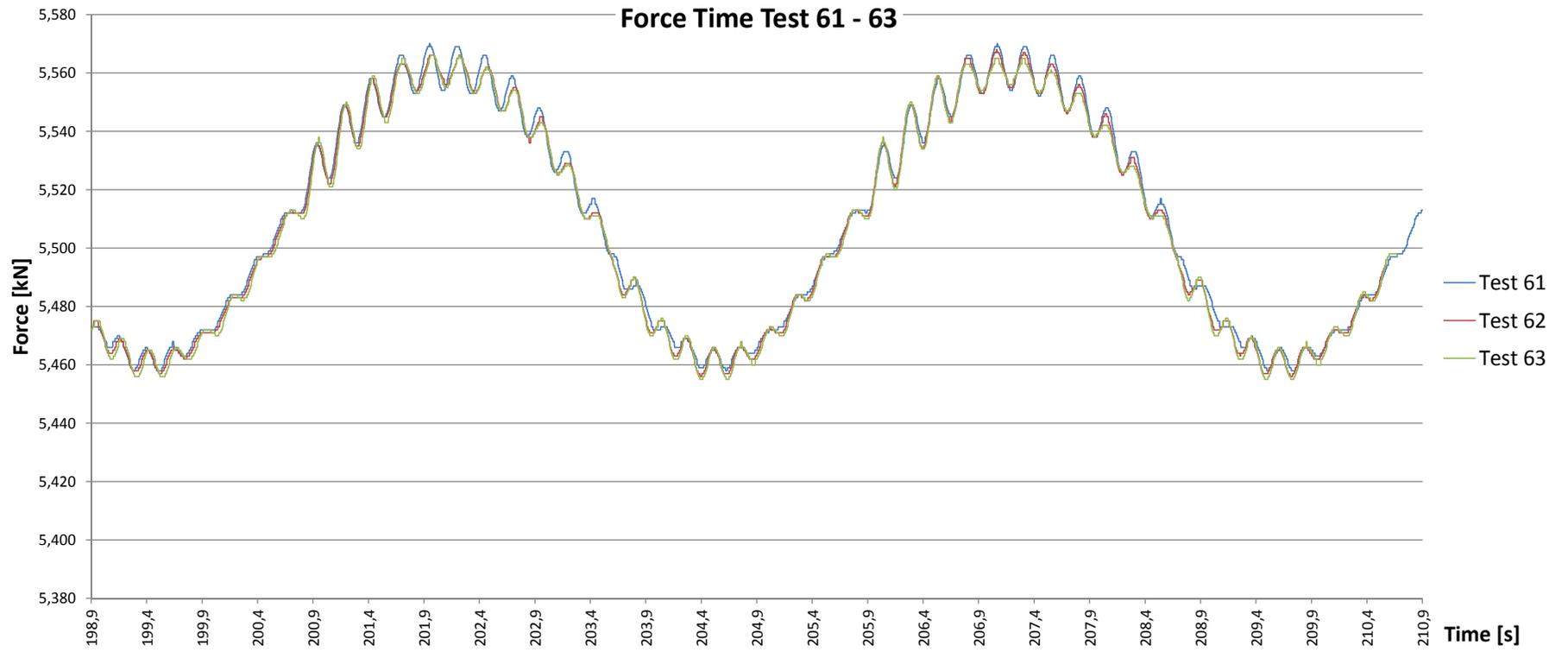
Analyse Force Frequency Test 55 – 57



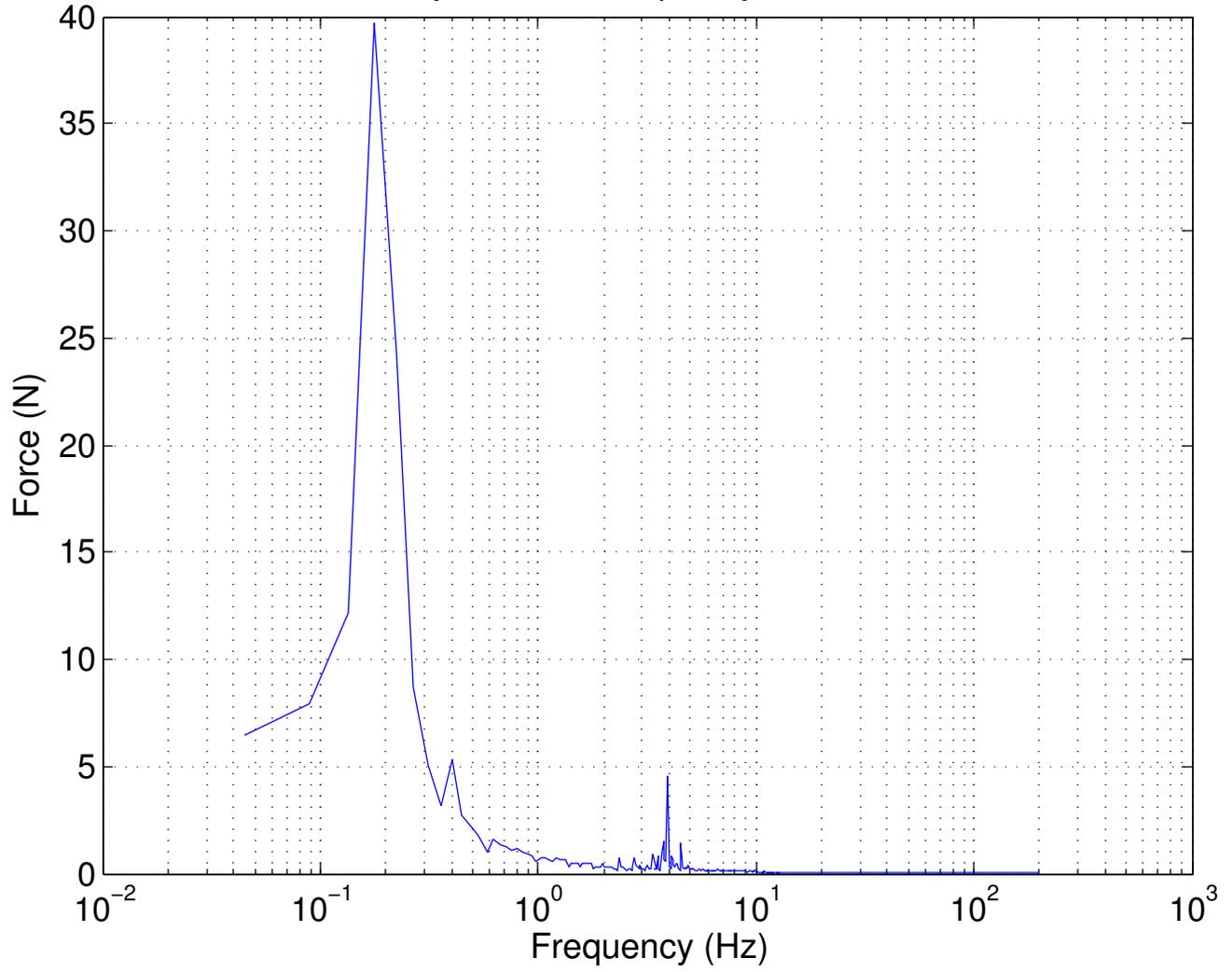


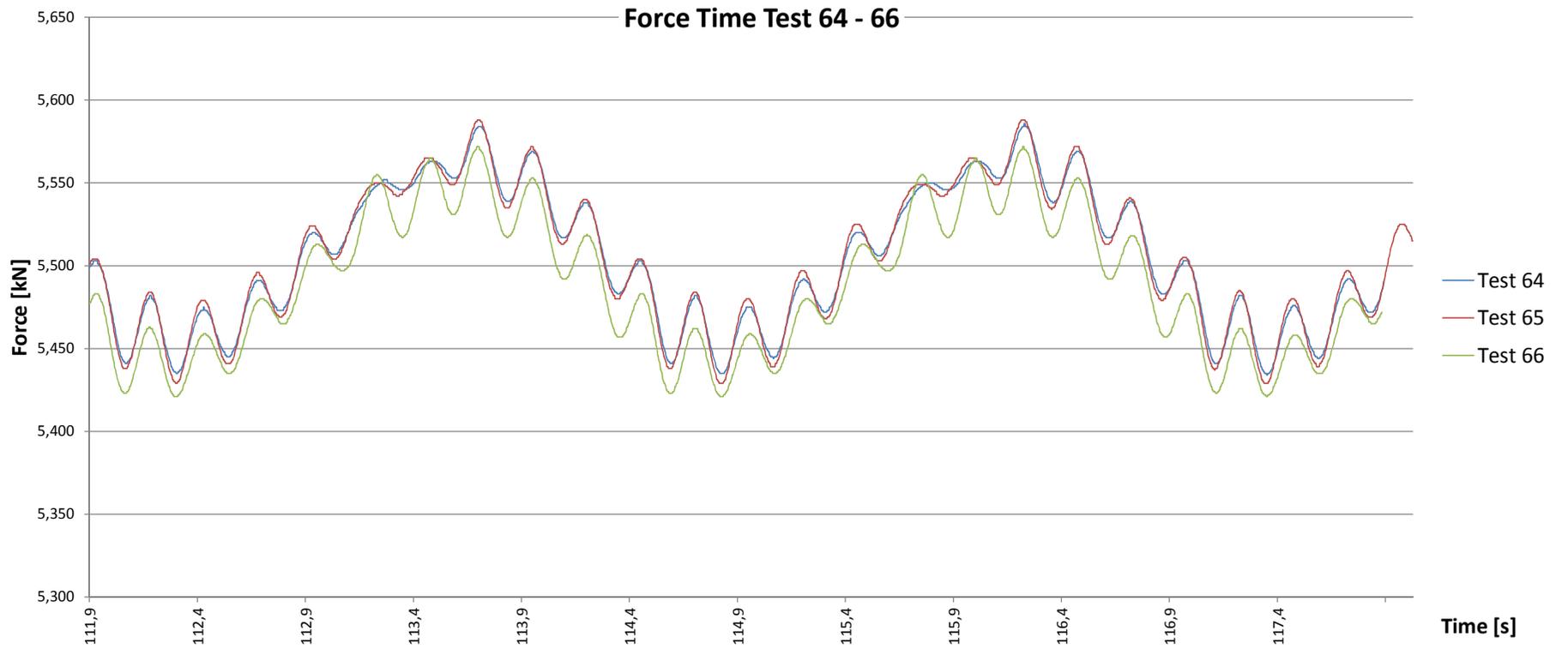
Analyse Force Frequency Test 58 – 60



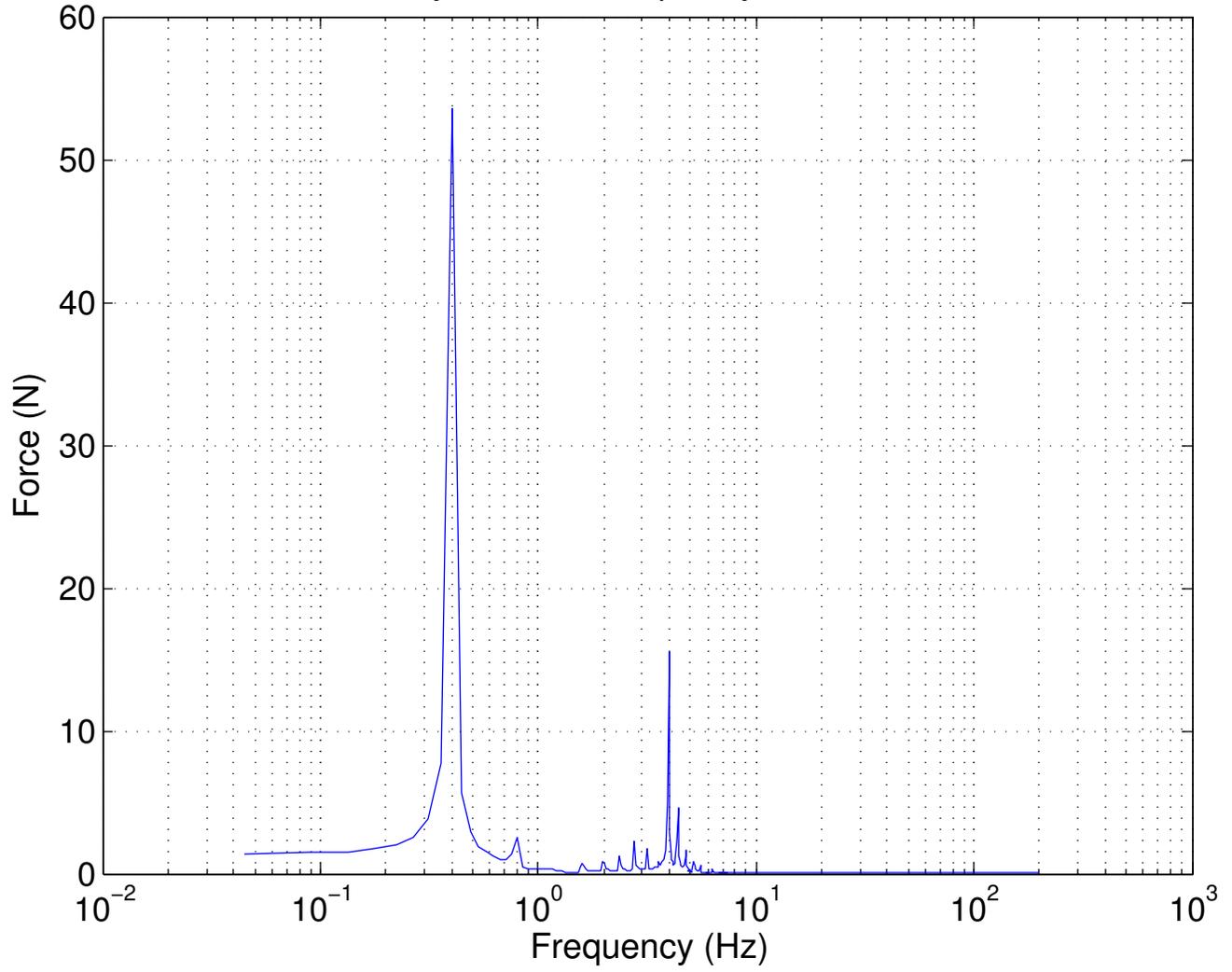


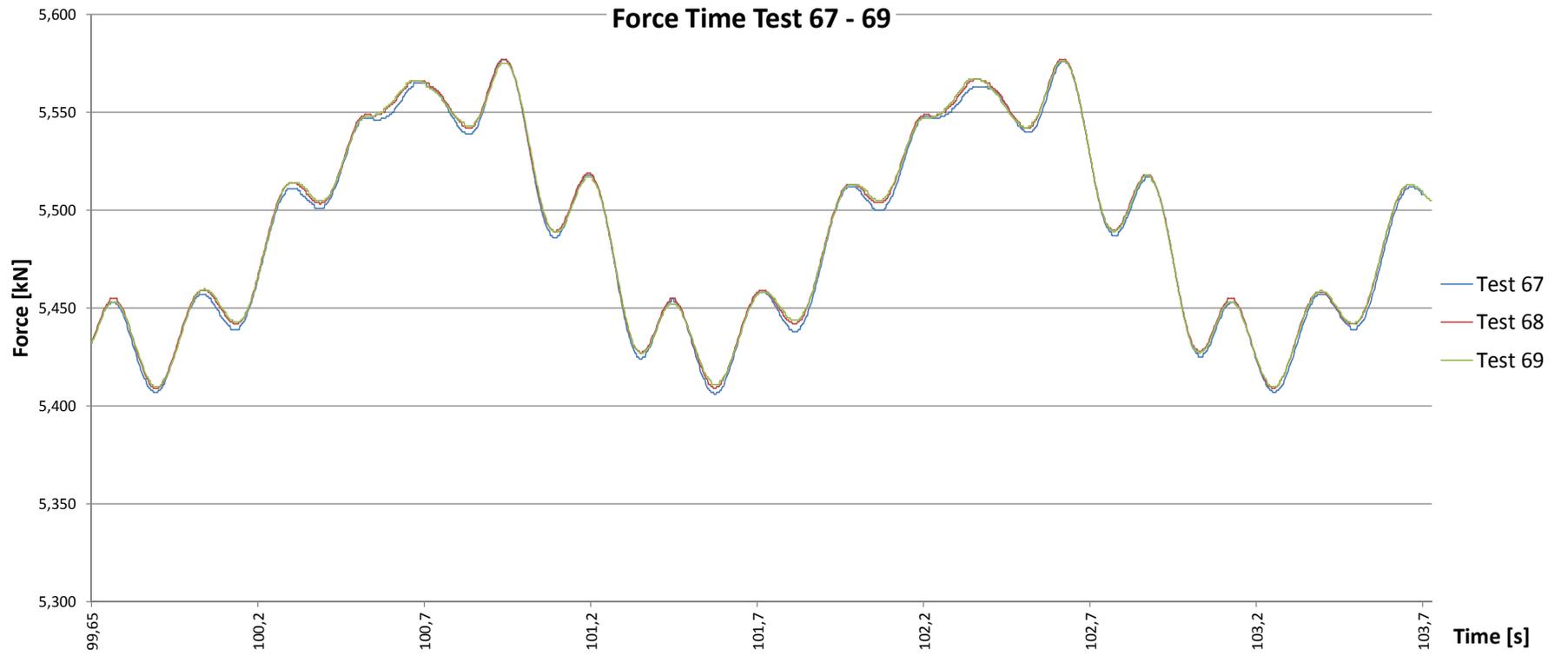
Analyse Force Frequency Test 61 – 63



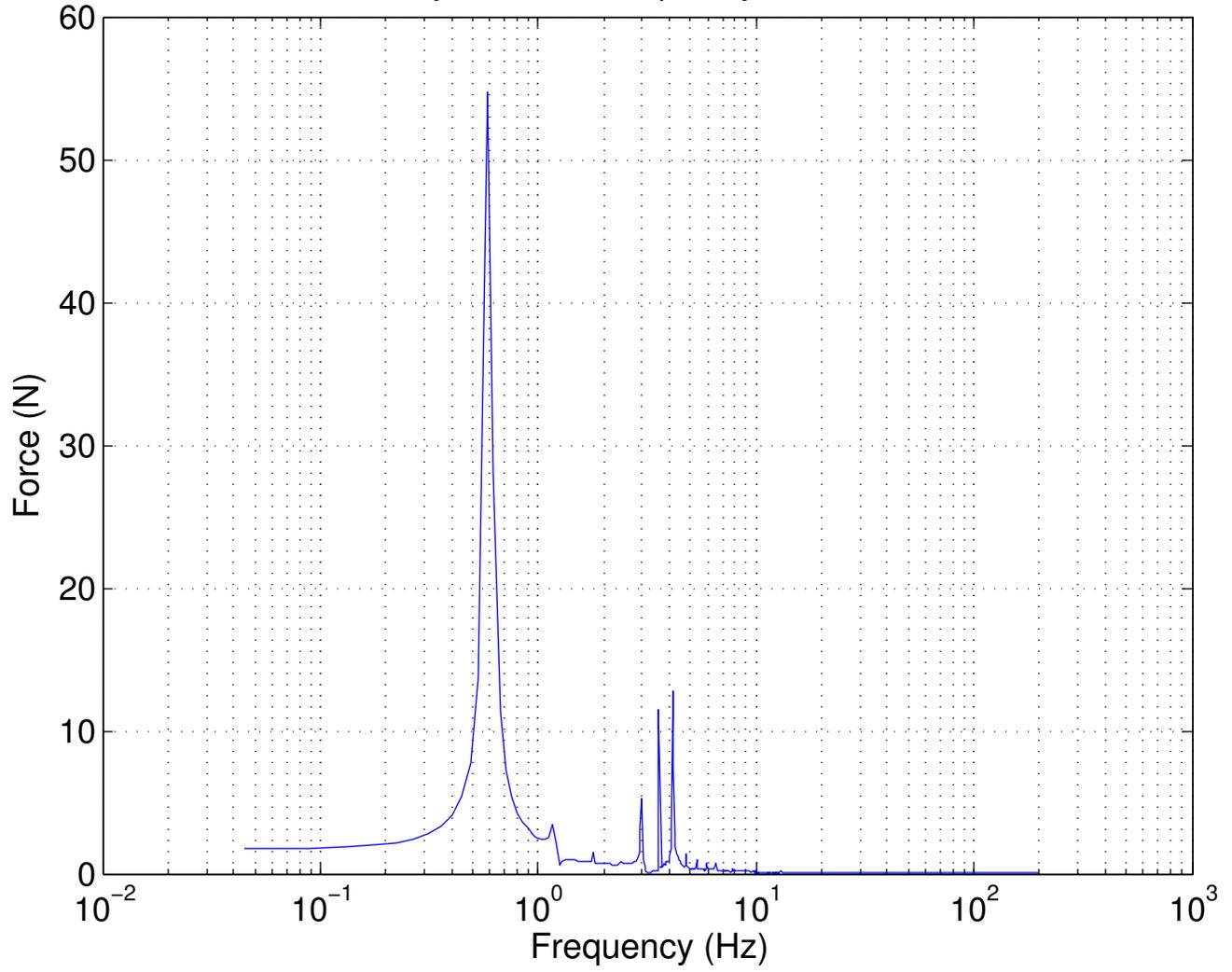


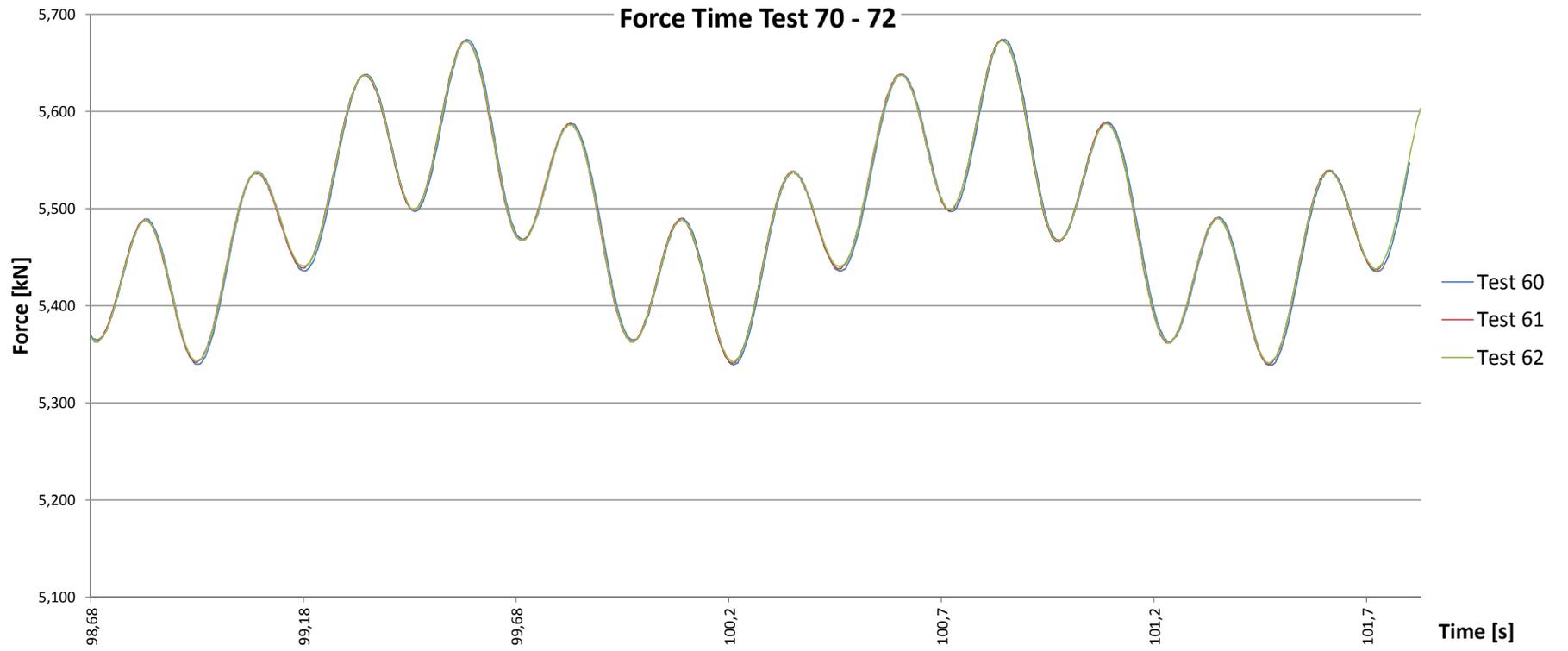
Analyse Force Frequency Test 64 – 66



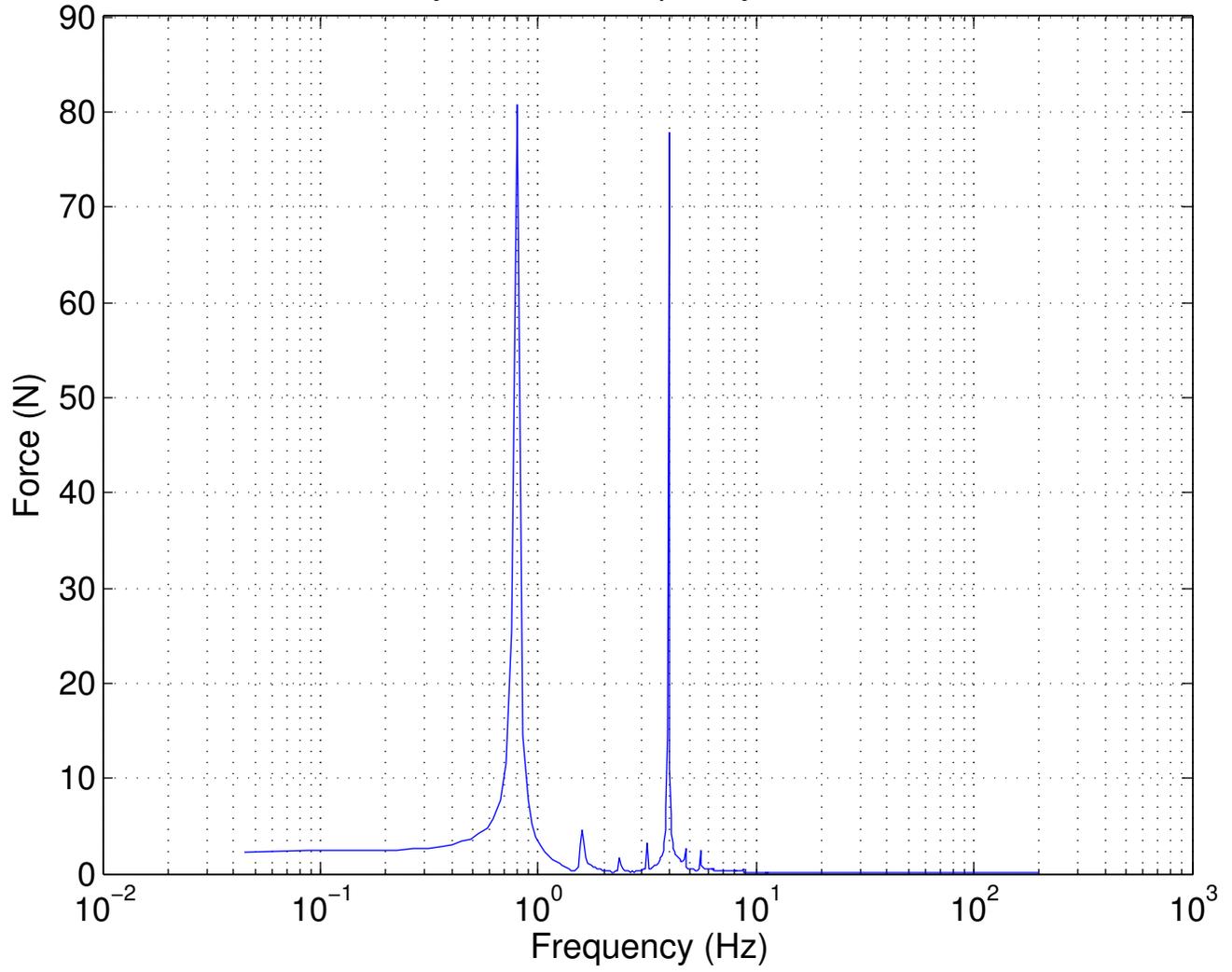


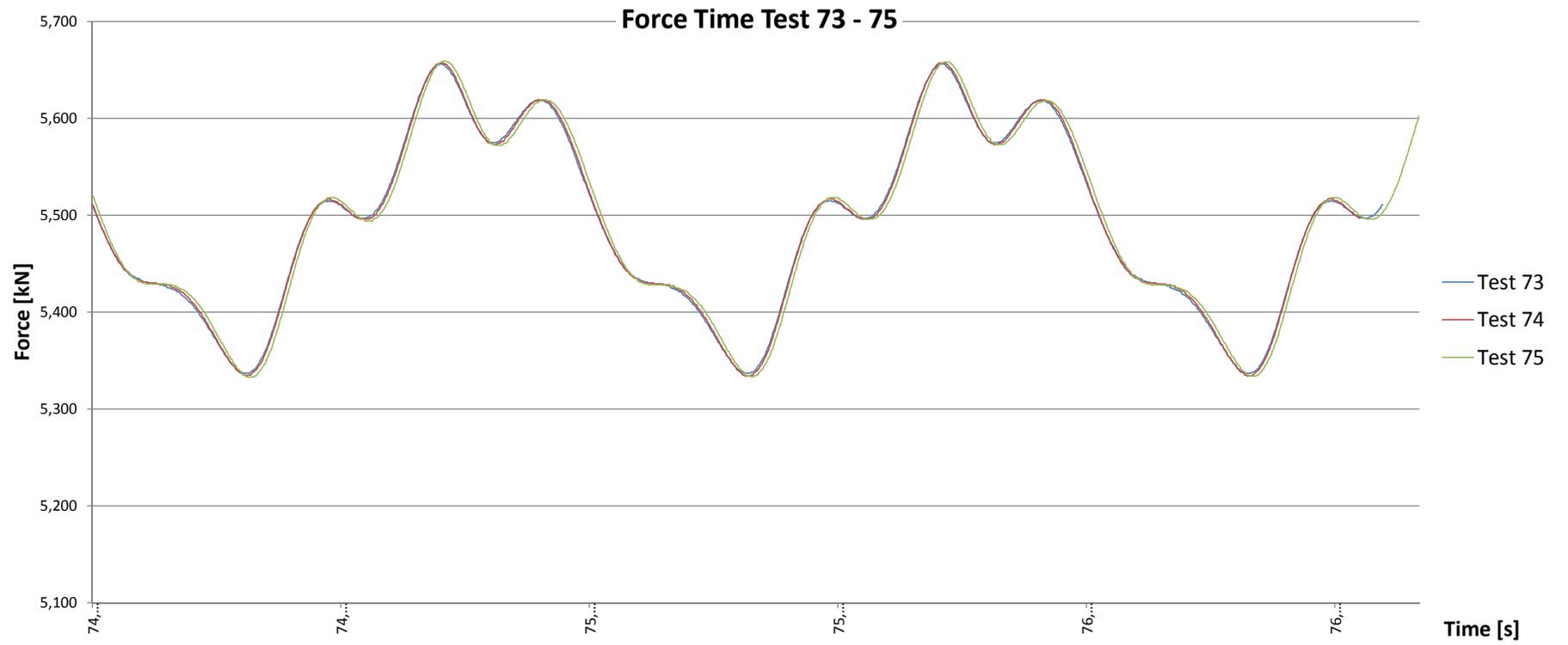
Analyse Force Frequency Test 67 – 69



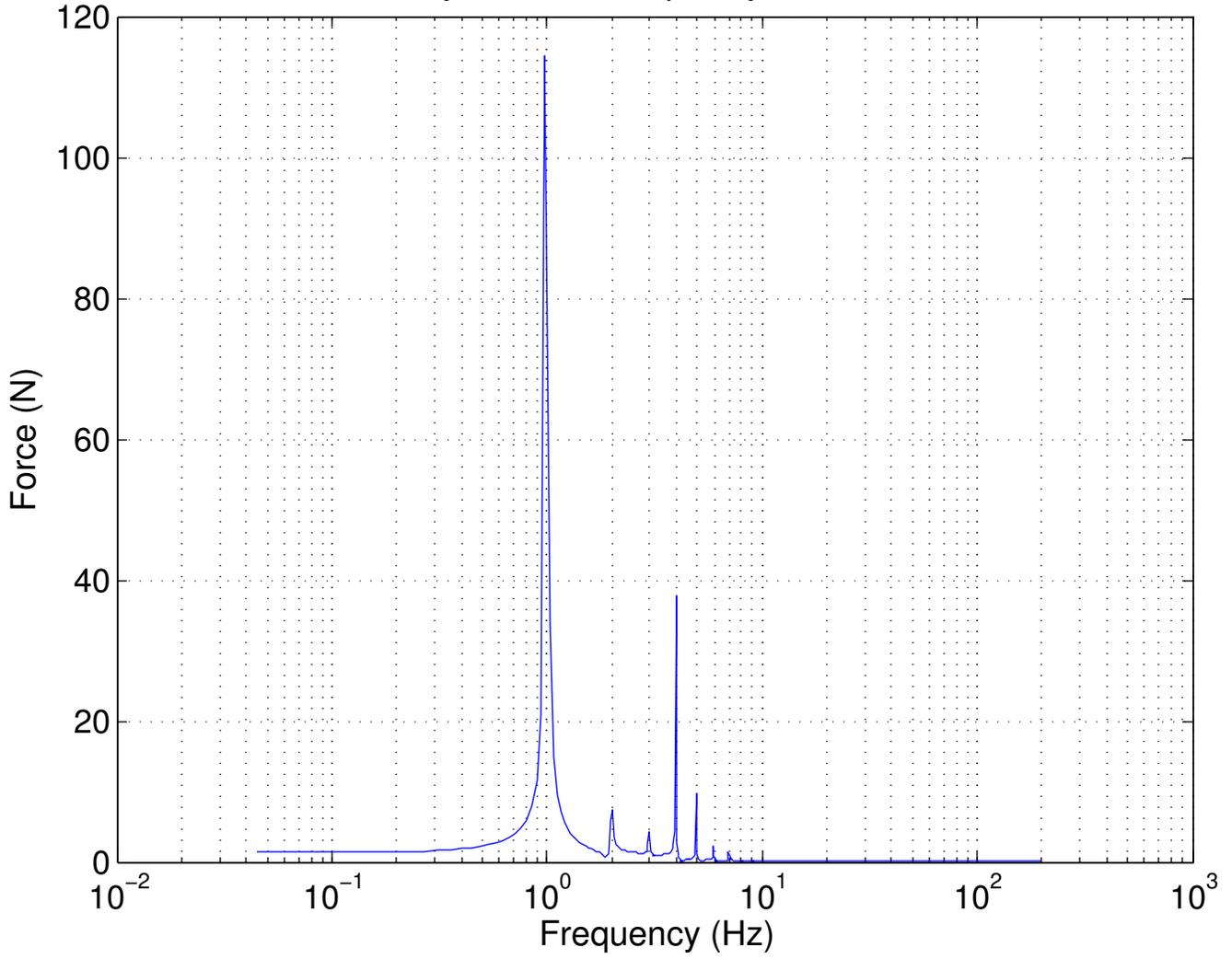


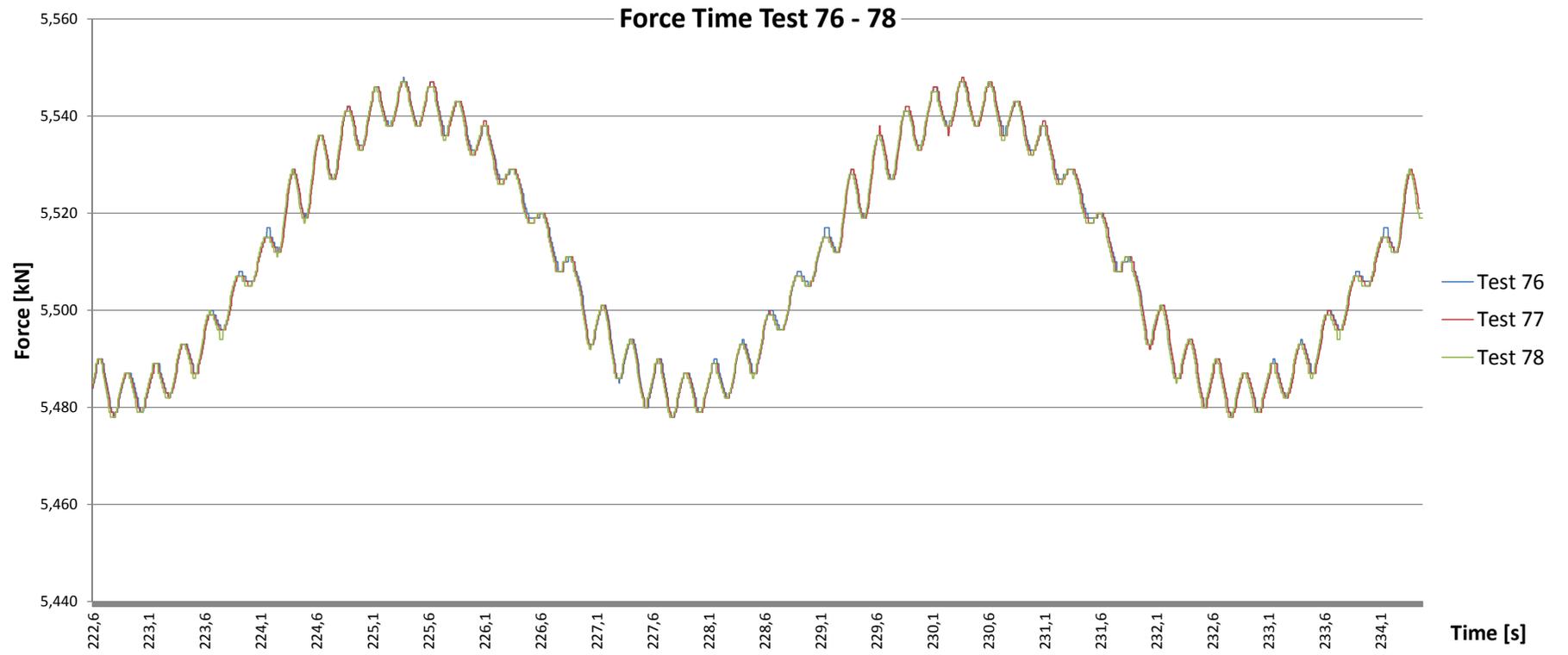
Analyse Force Frequency Test 70 – 72



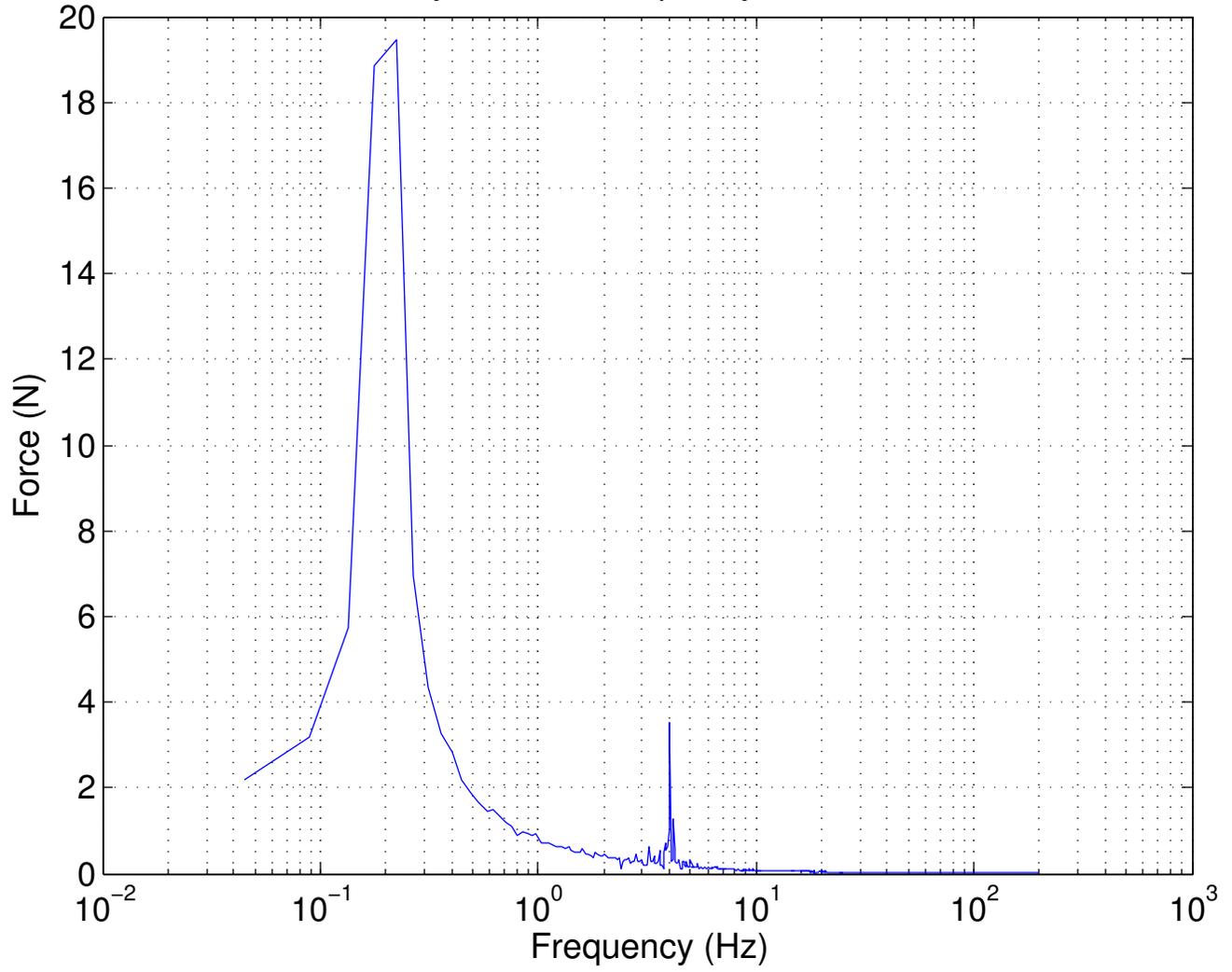


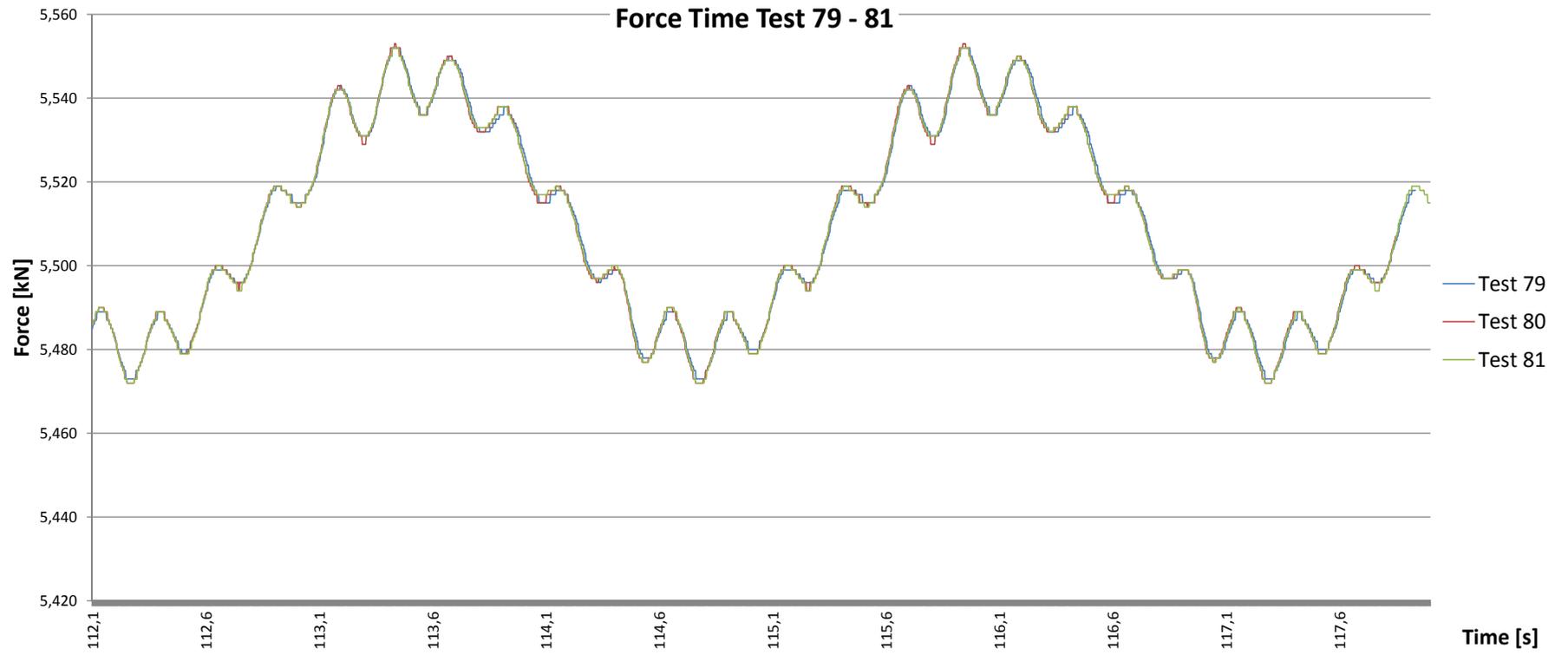
Analyse Force Frequency Test 73 – 75



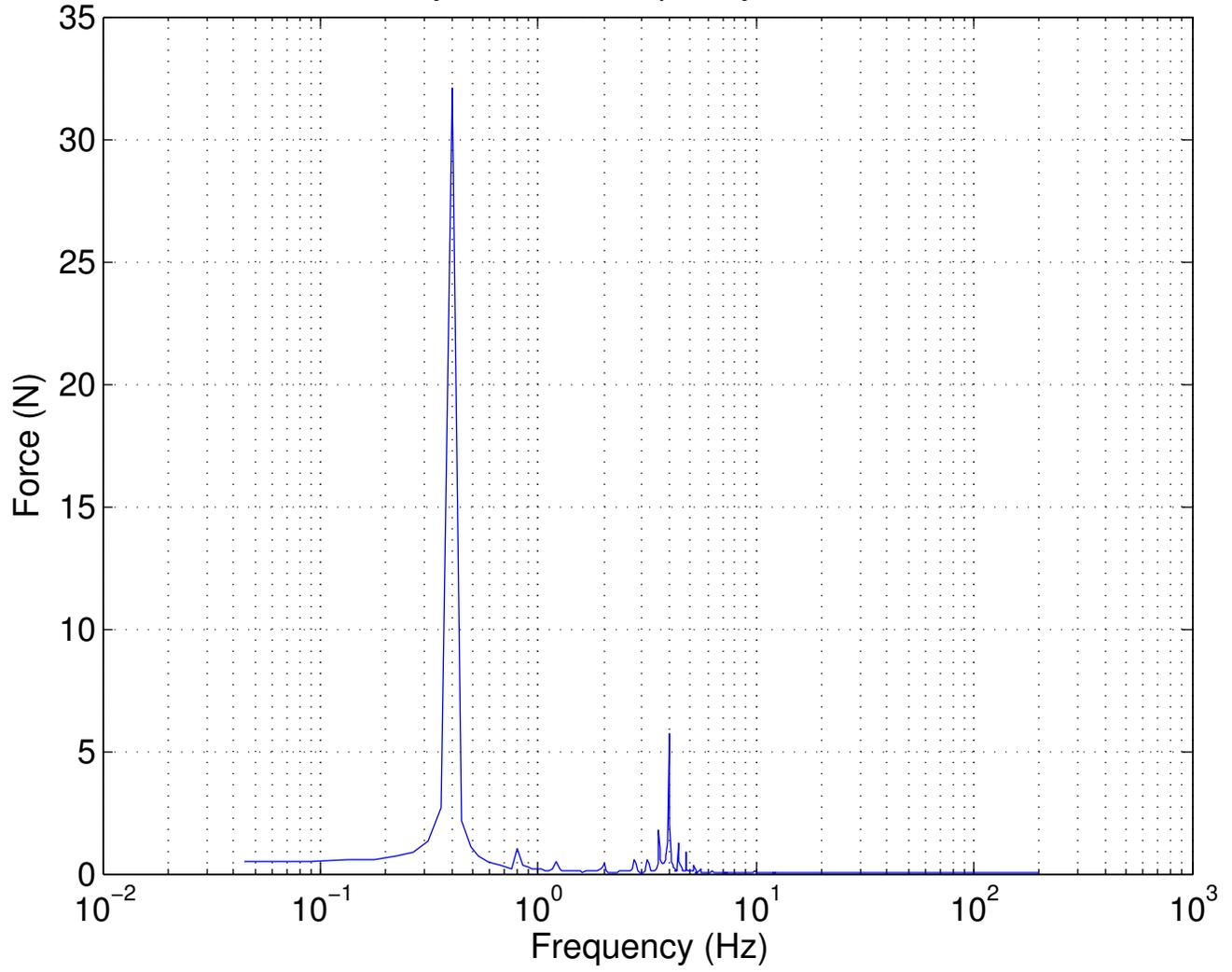


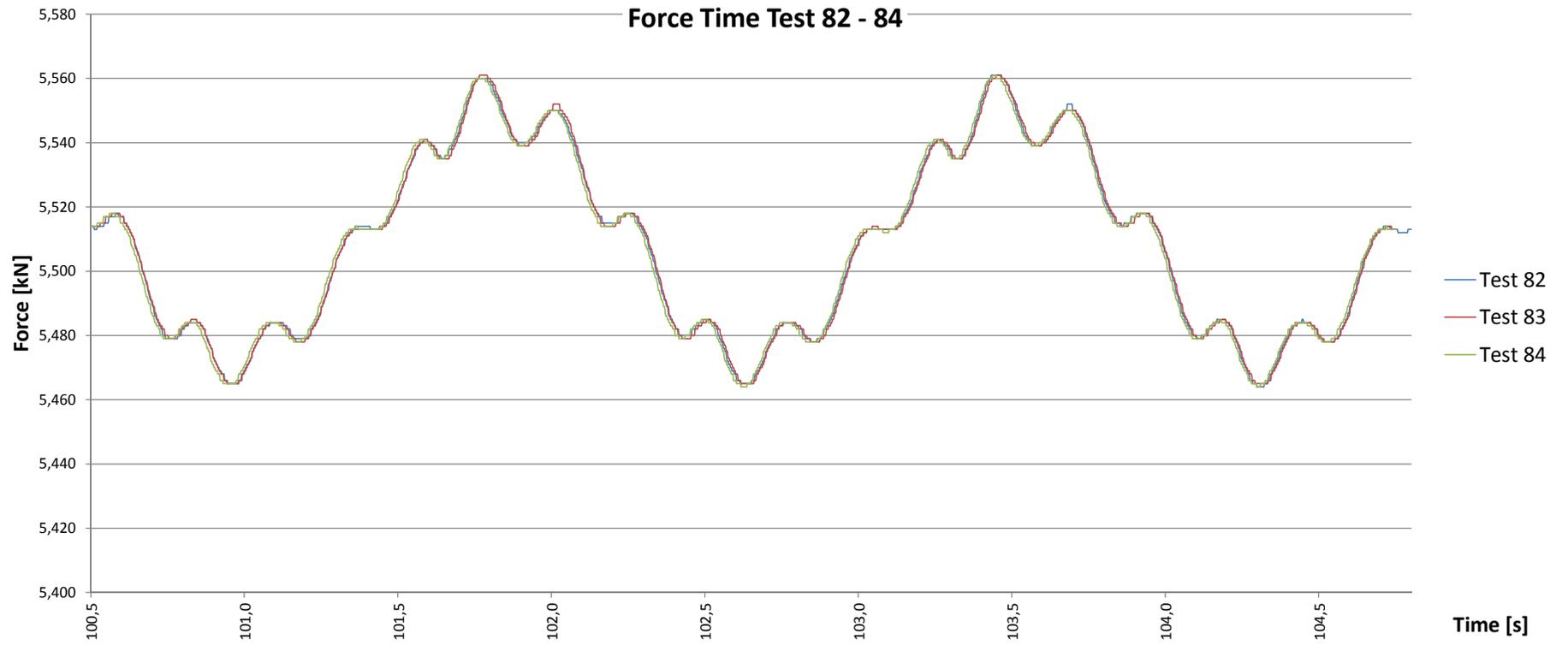
Analyse Force Frequency Test 76 – 78



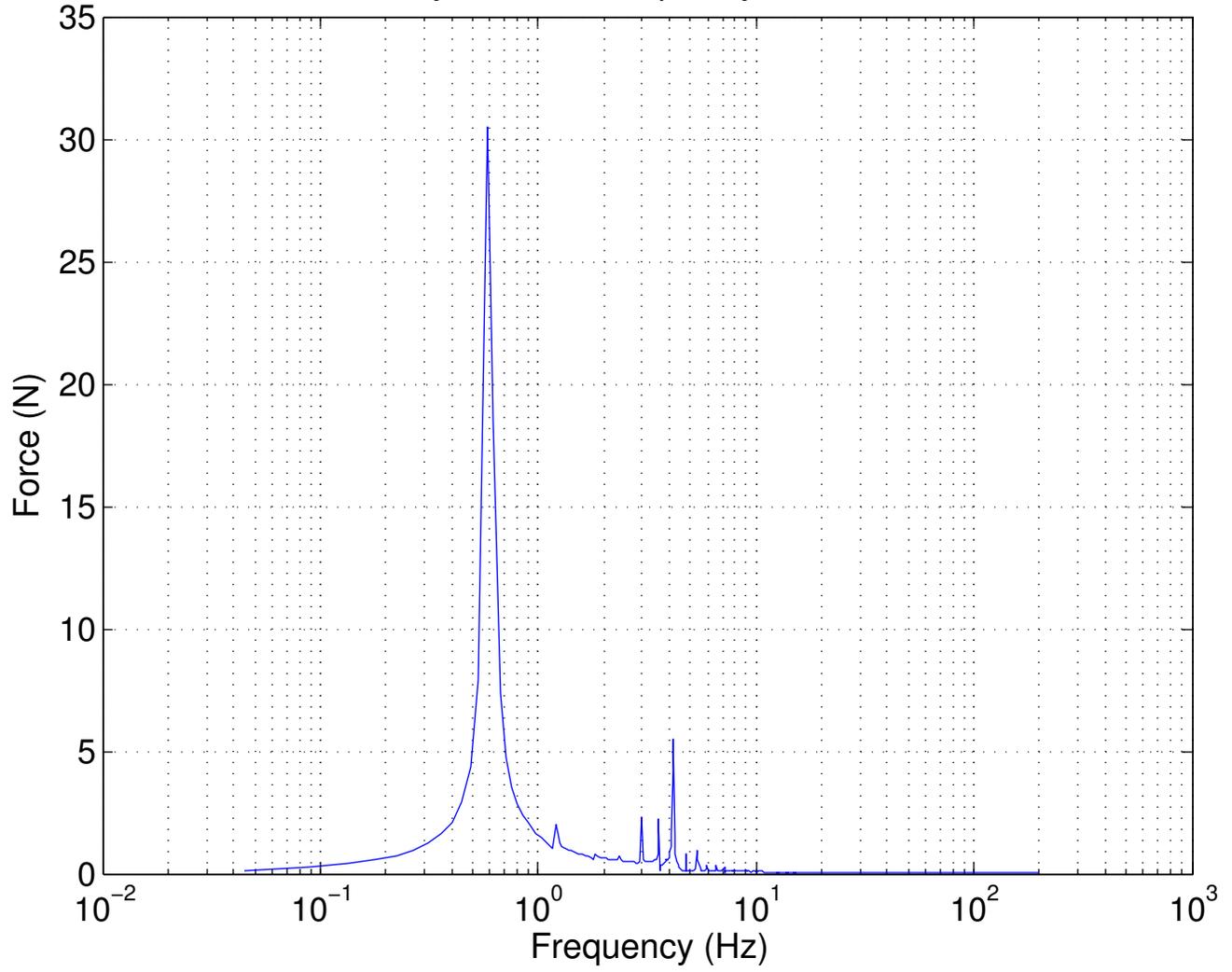


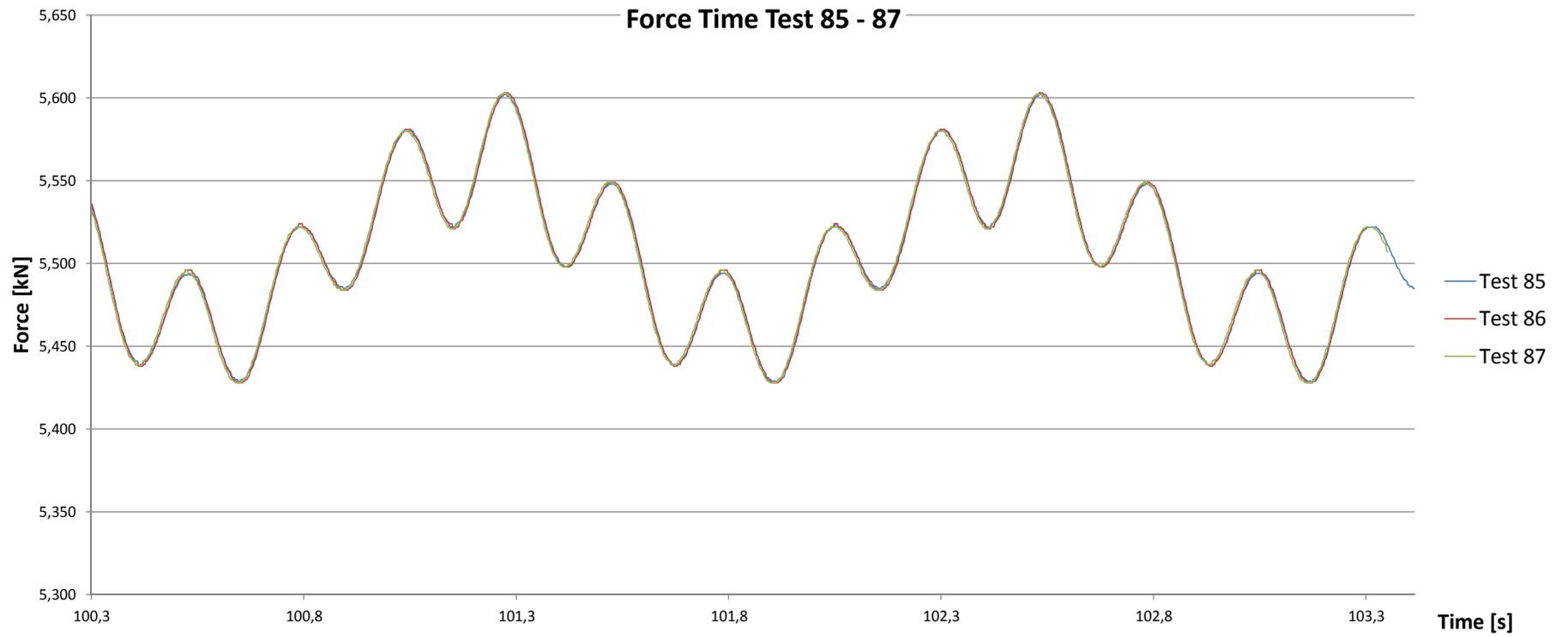
Analyse Force Frequency Test 79 – 81



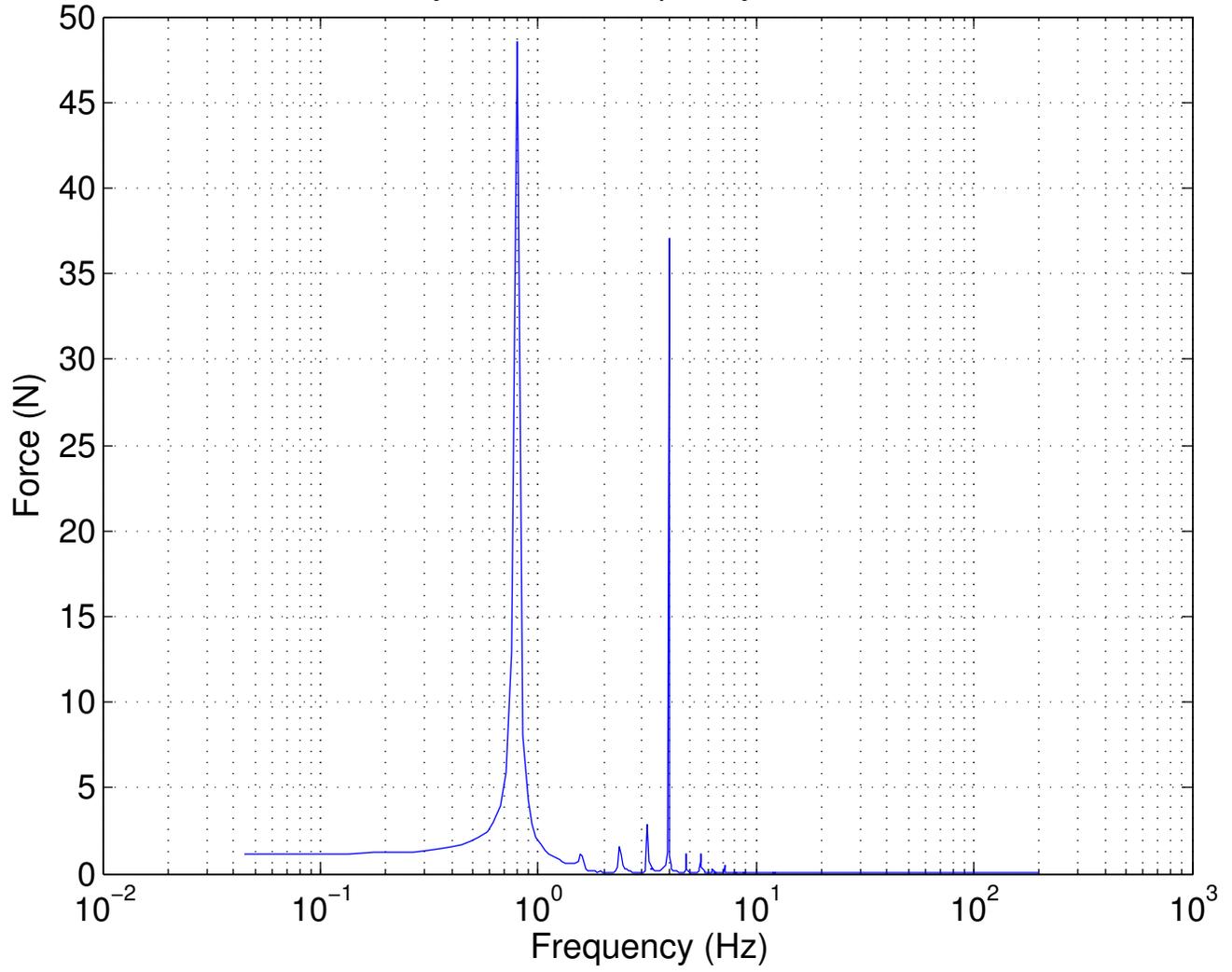


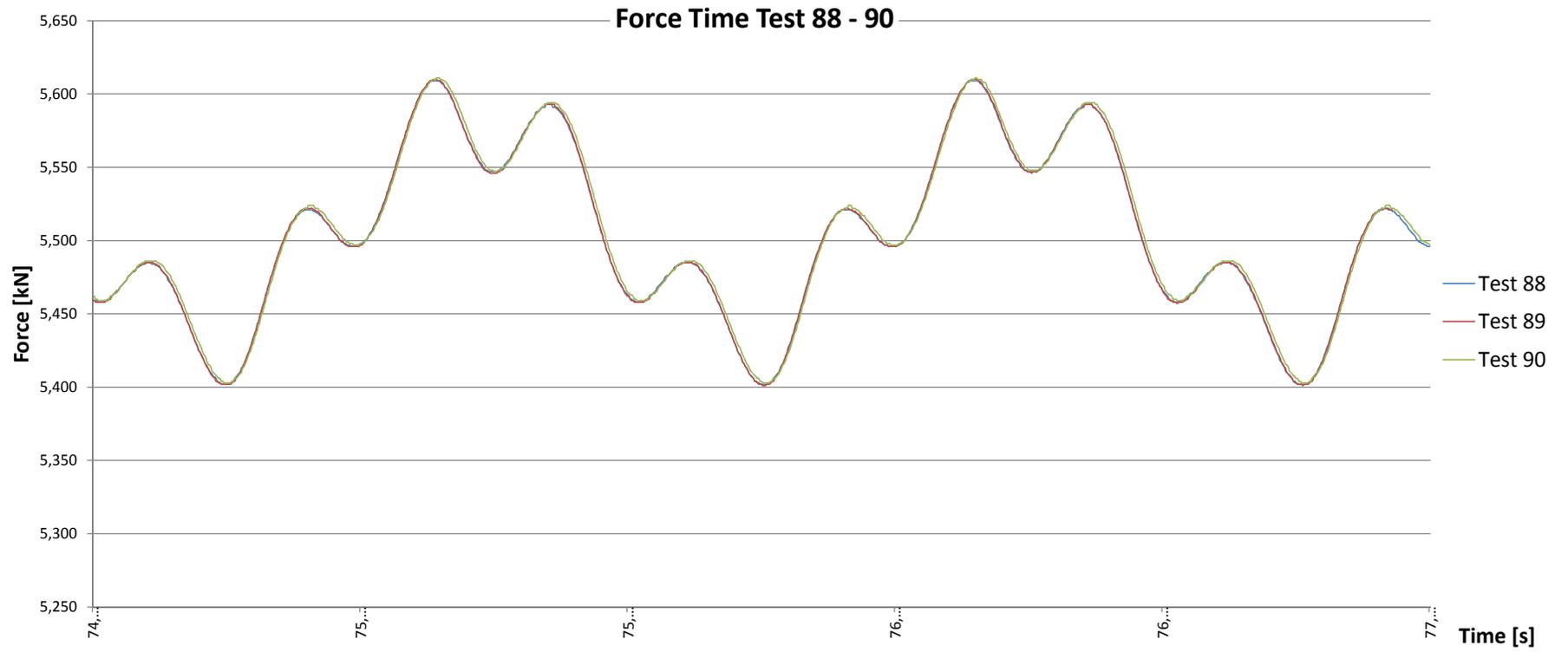
Analyse Force Frequency Test 82 – 84



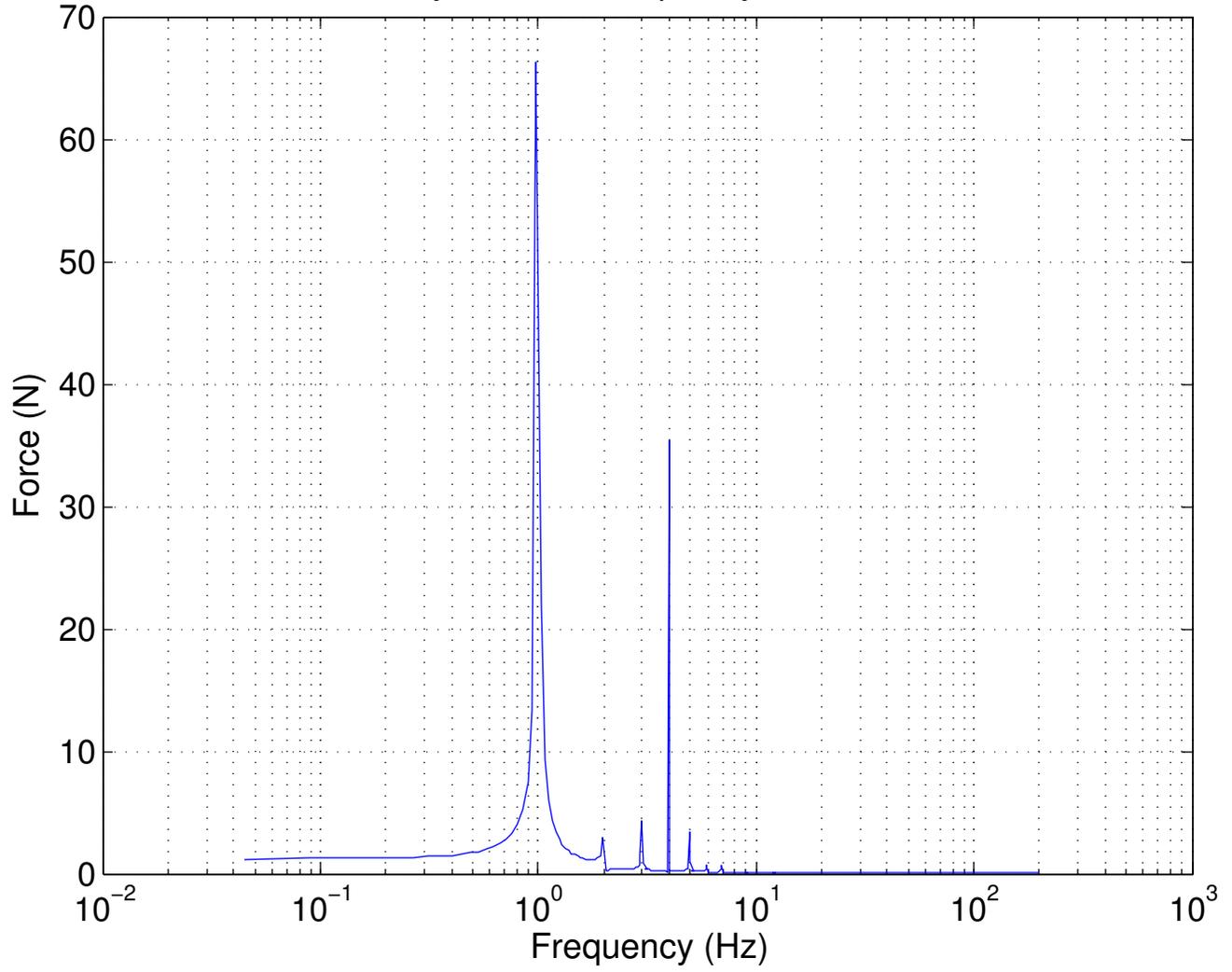


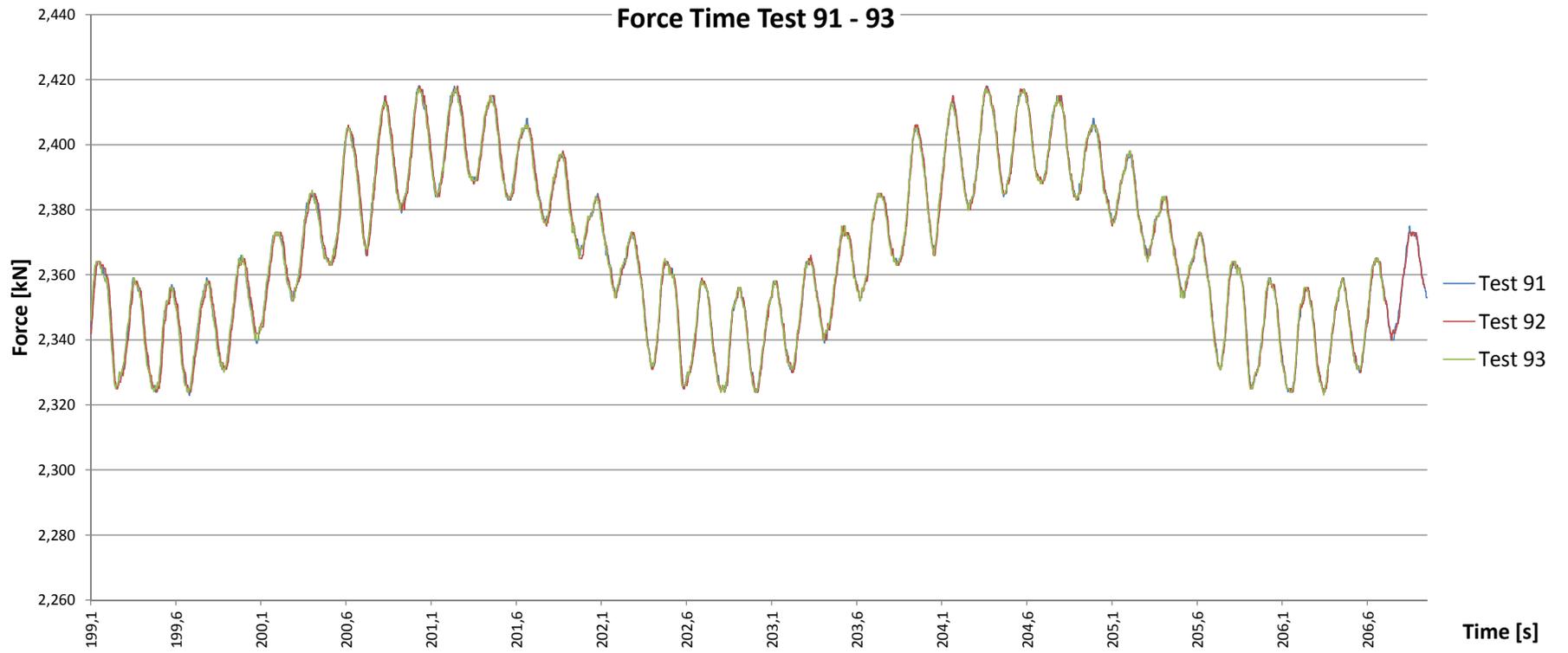
Analyse Force Frequency Test 85 – 87



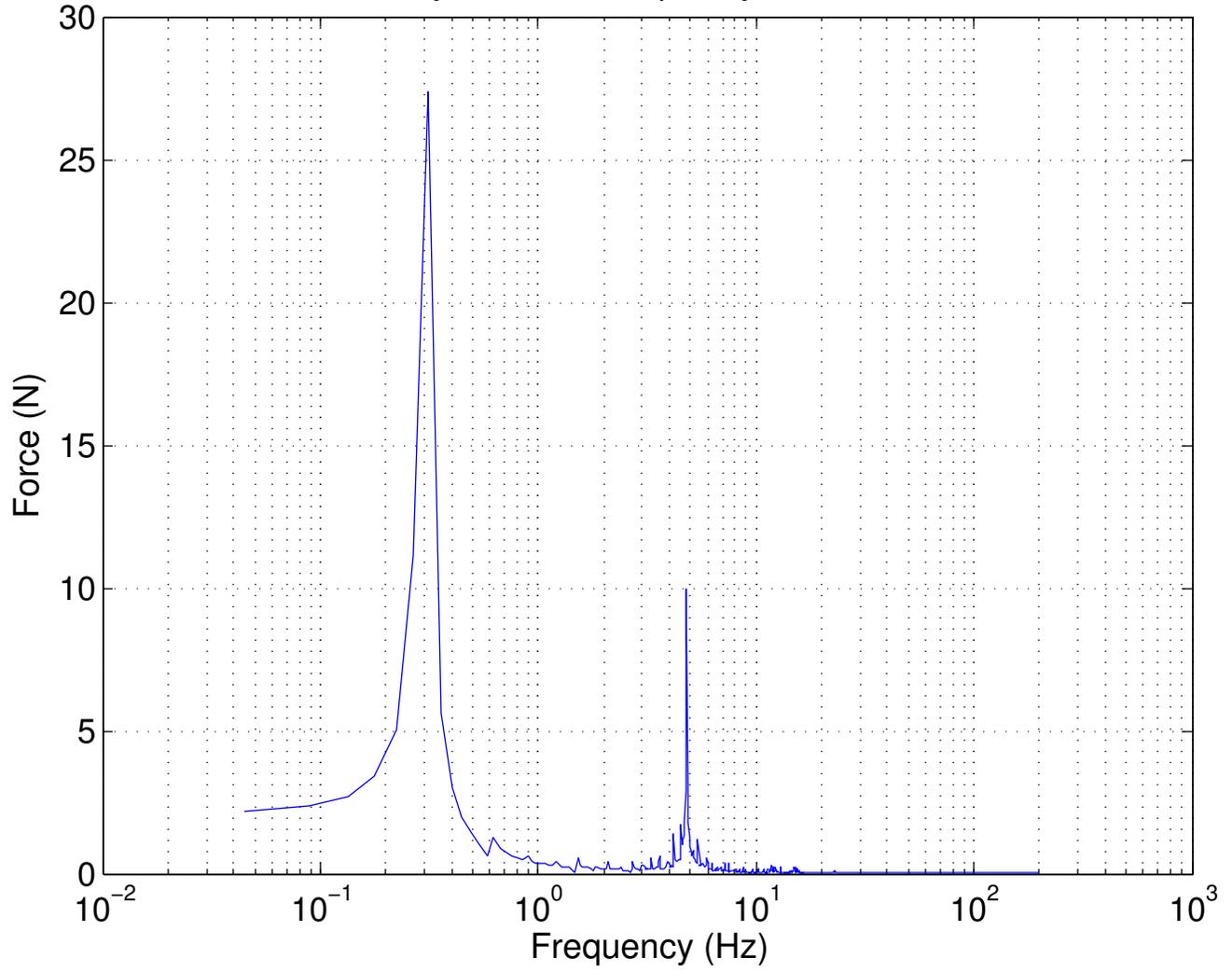


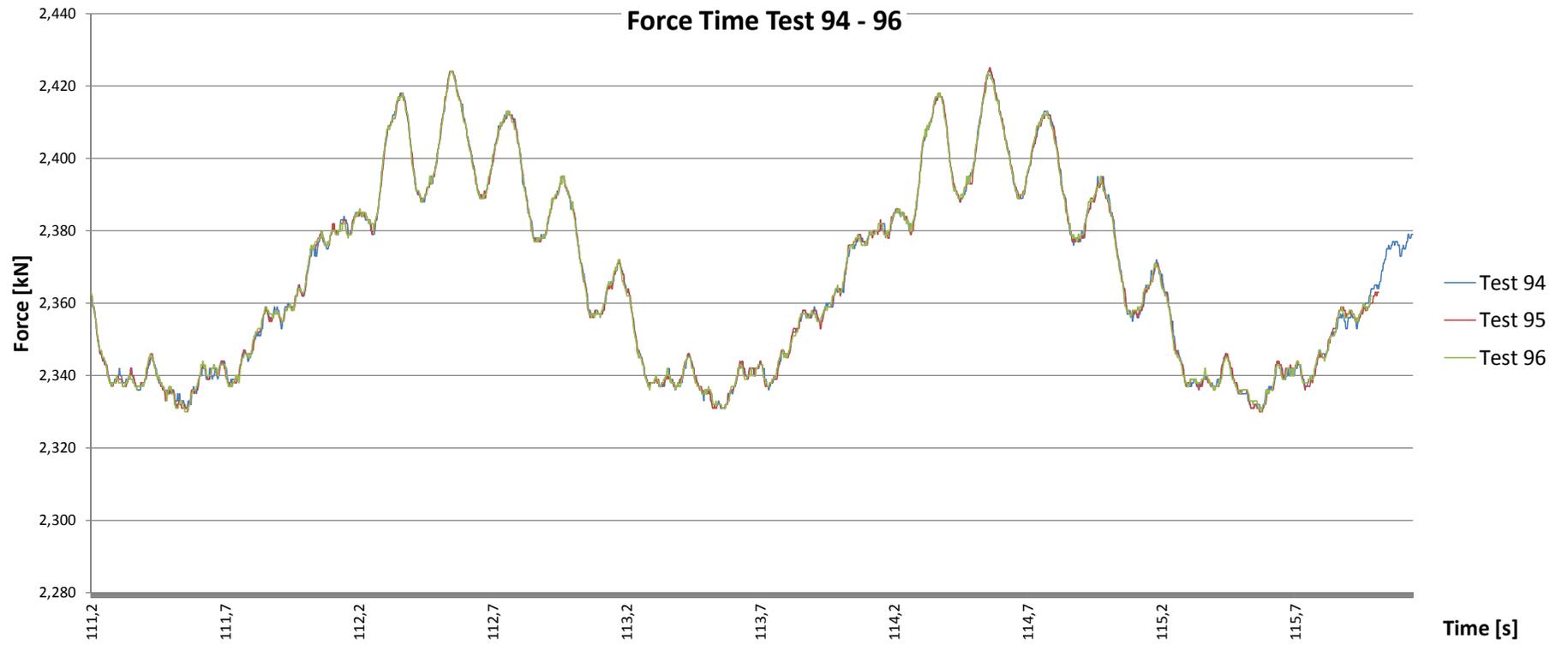
Analyse Force Frequency Test 88 – 90



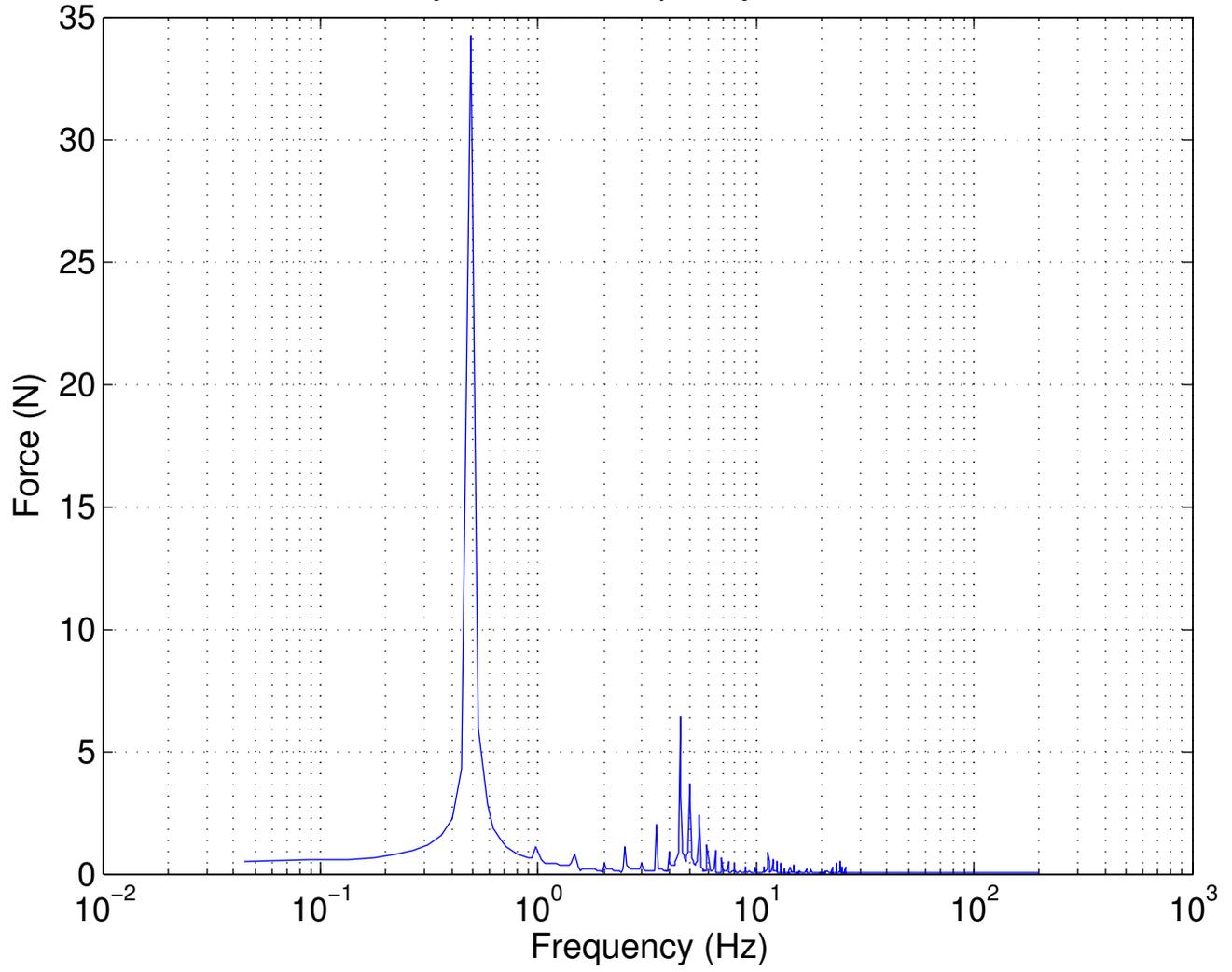


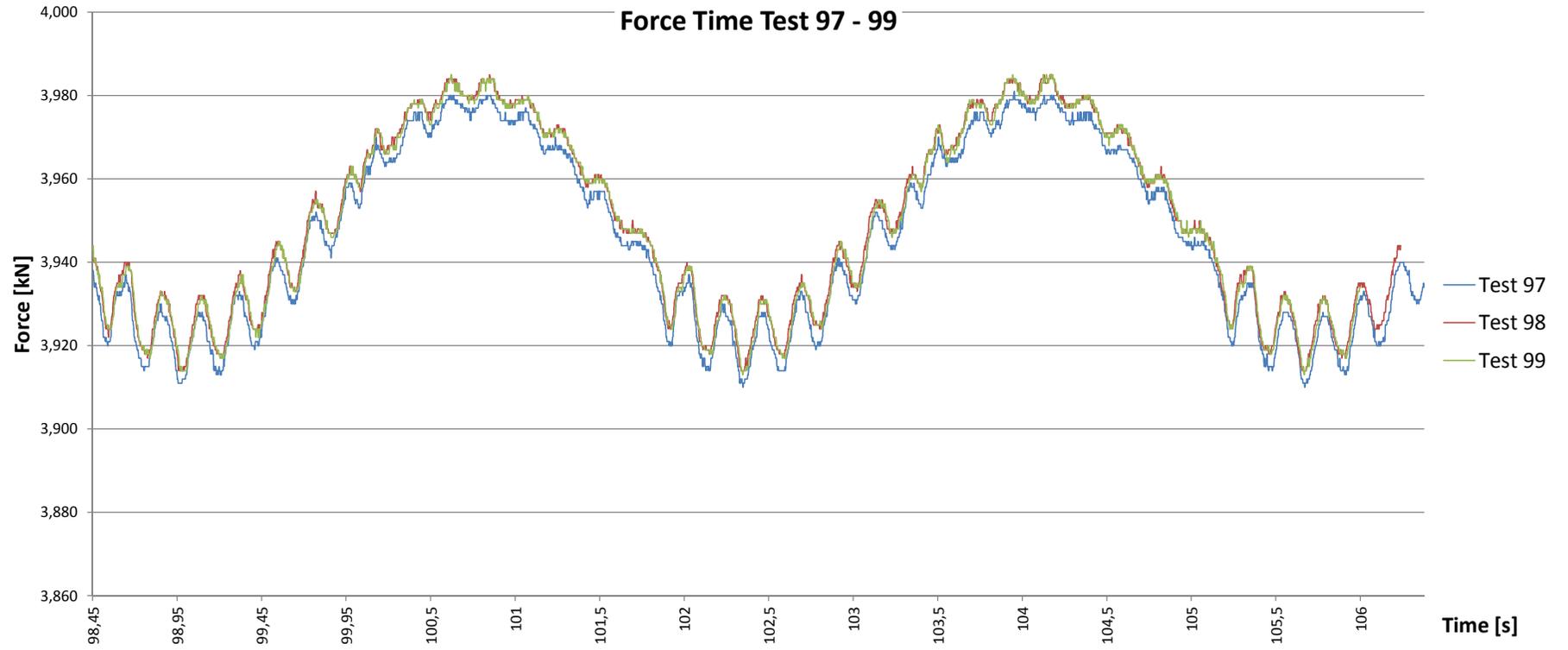
Analyse Force Frequency Test 91 – 93



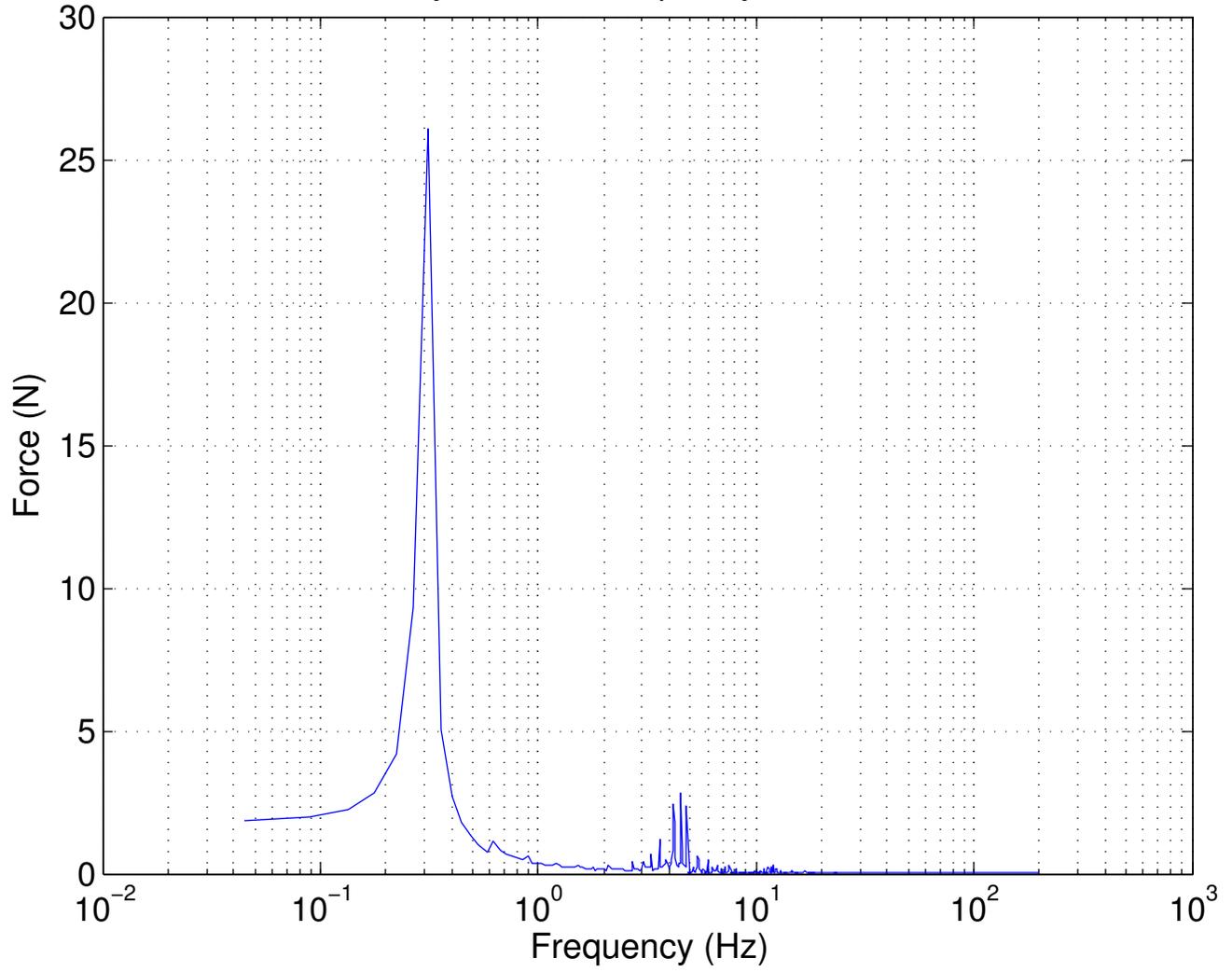


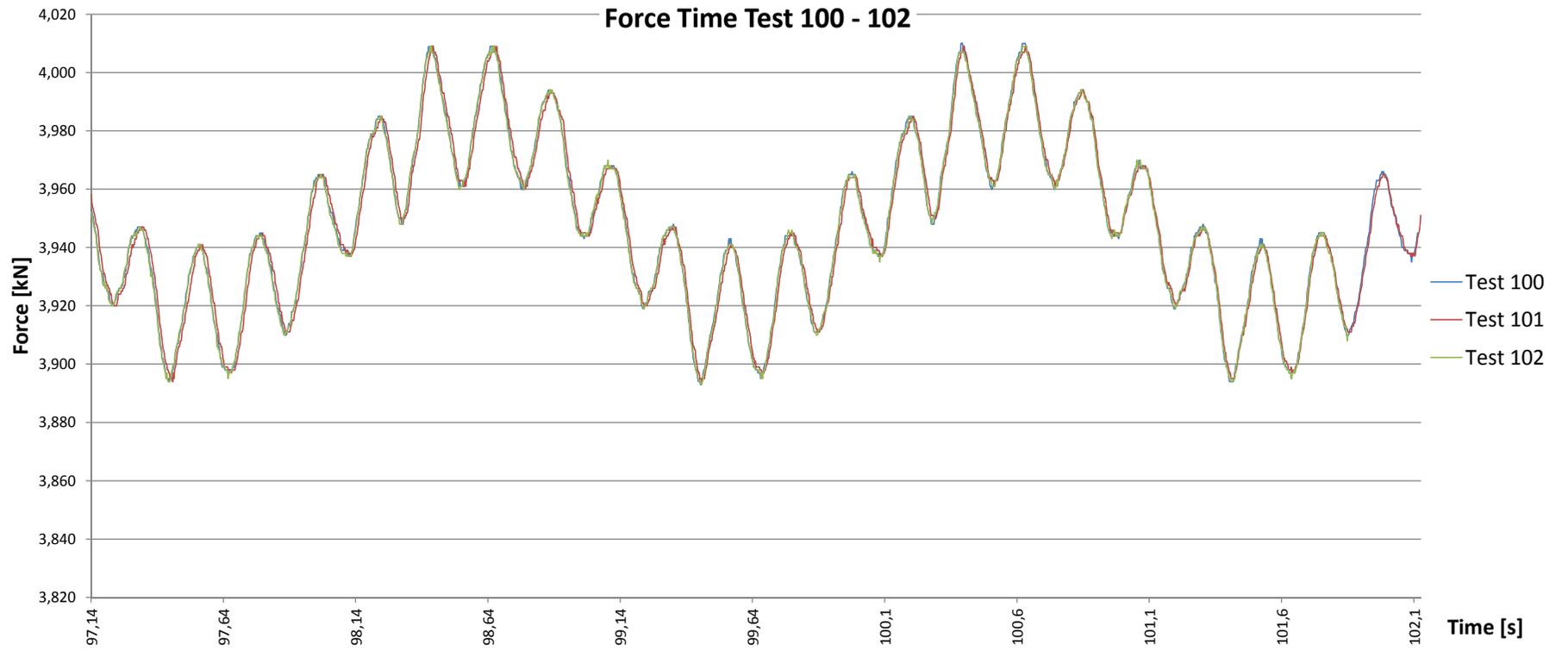
Analyse Force Frequency Test 94 – 96



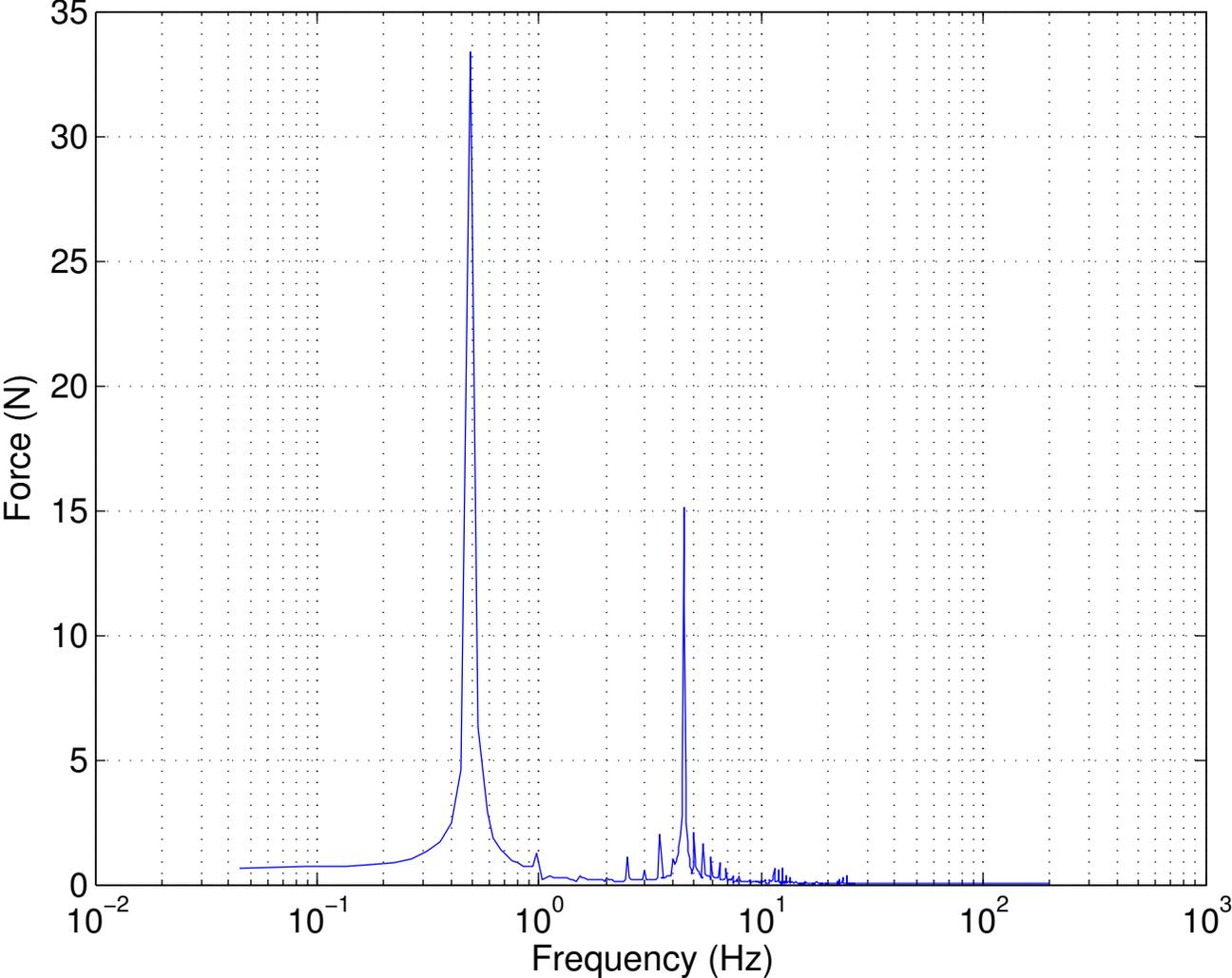


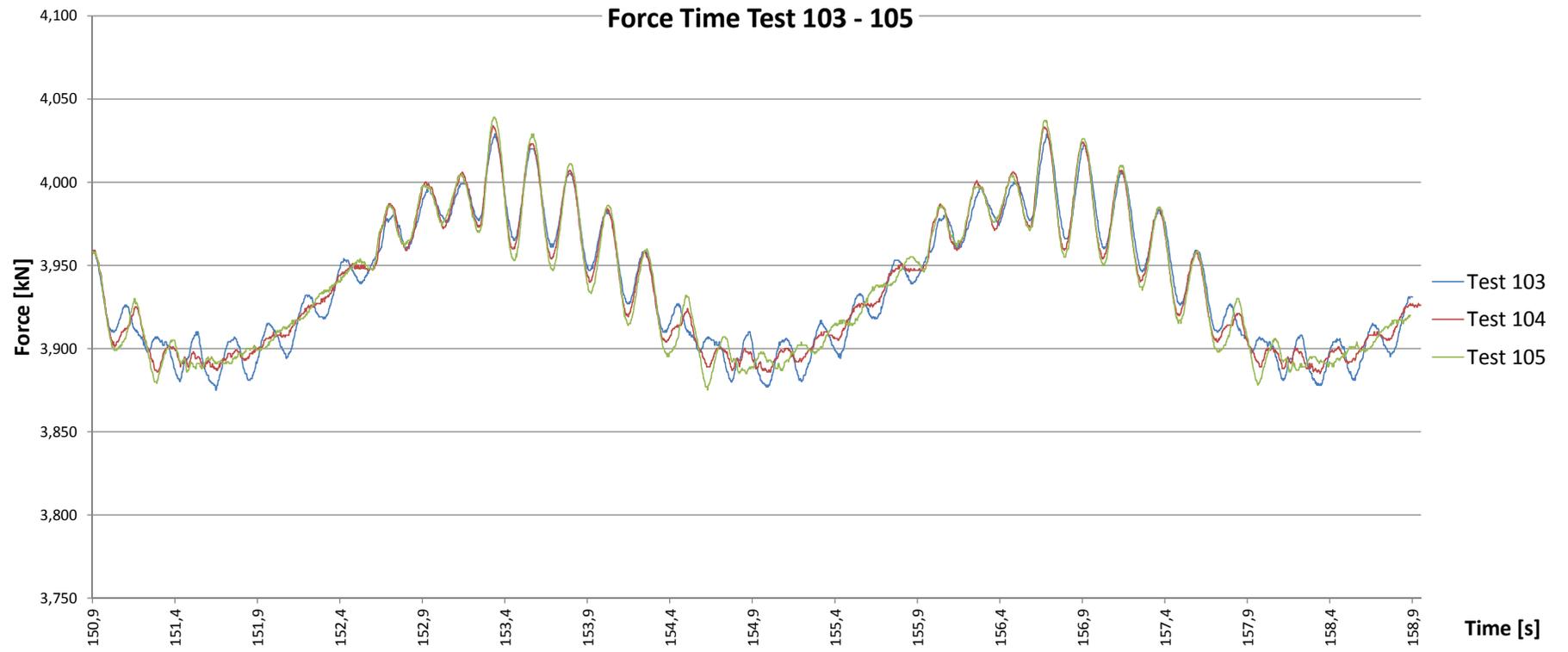
Analyse Force Frequency Test 97 – 99



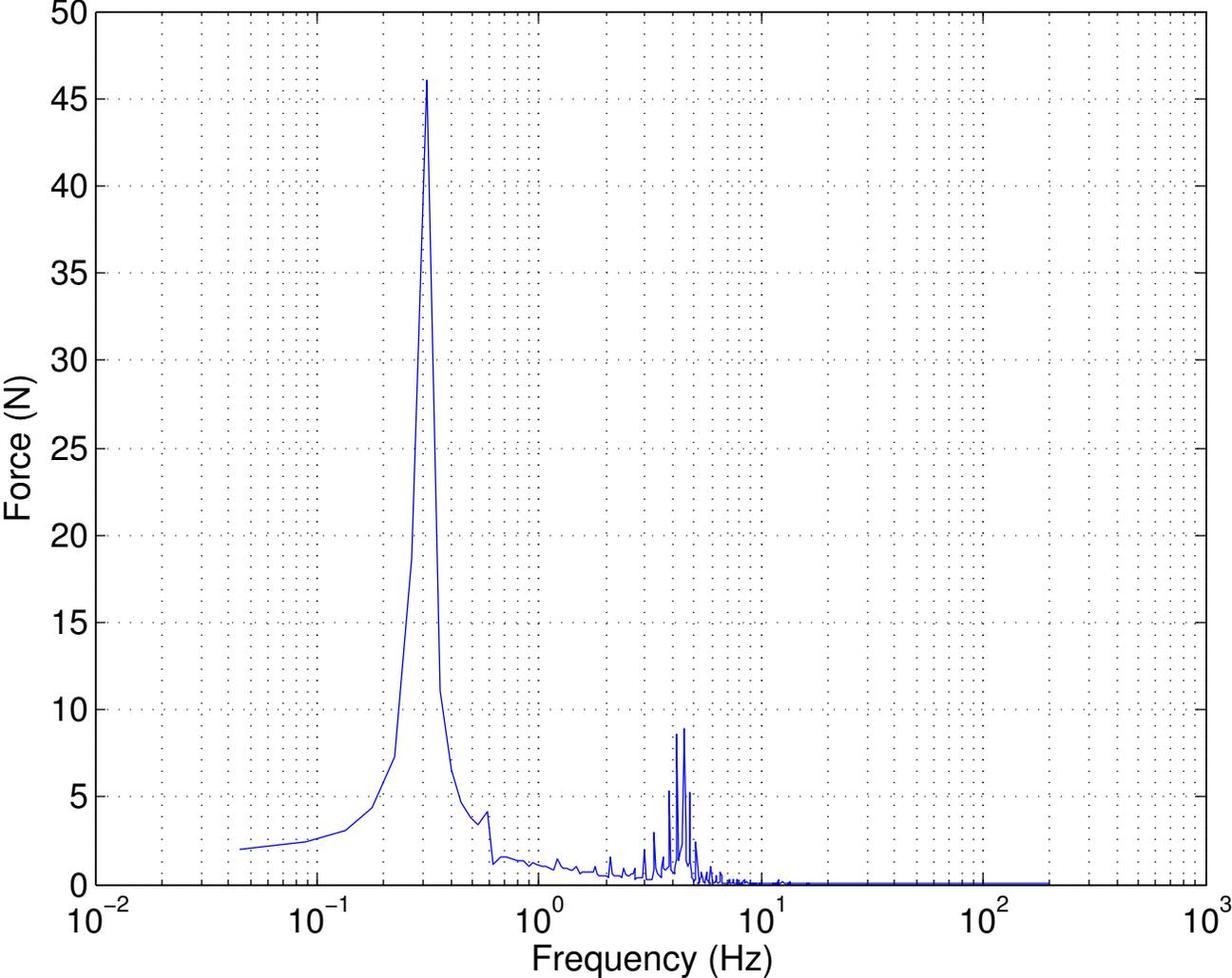


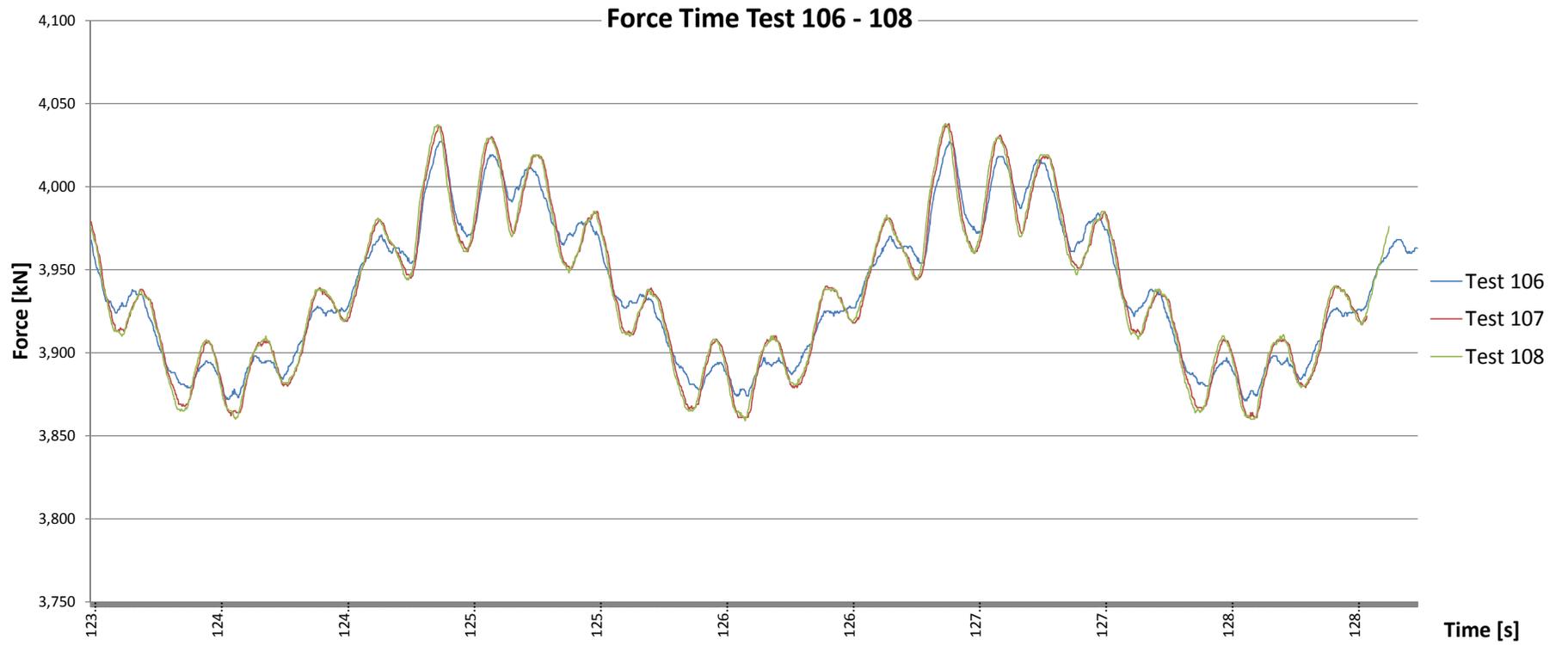
Analyse Force Frequency Test 100 – 102



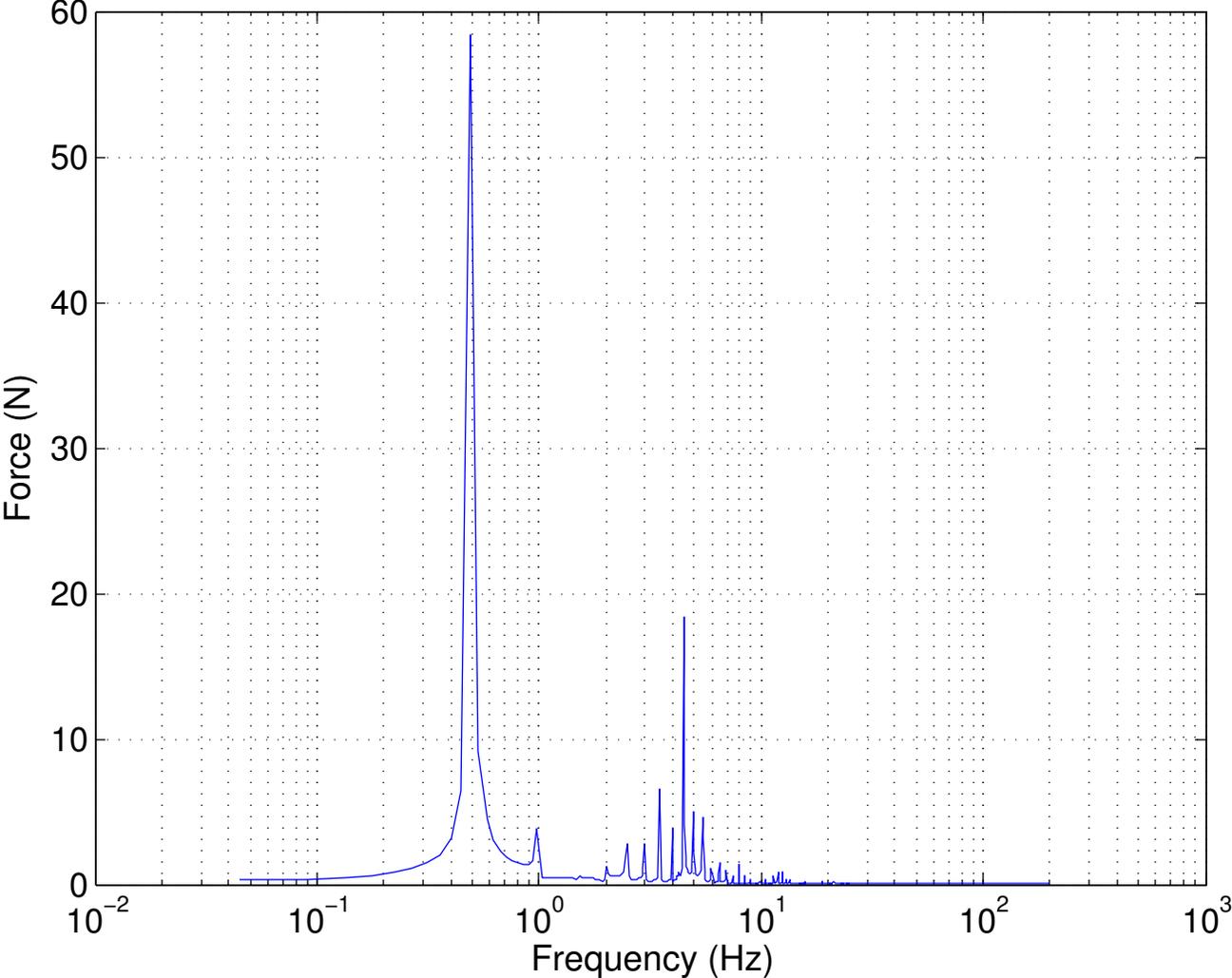


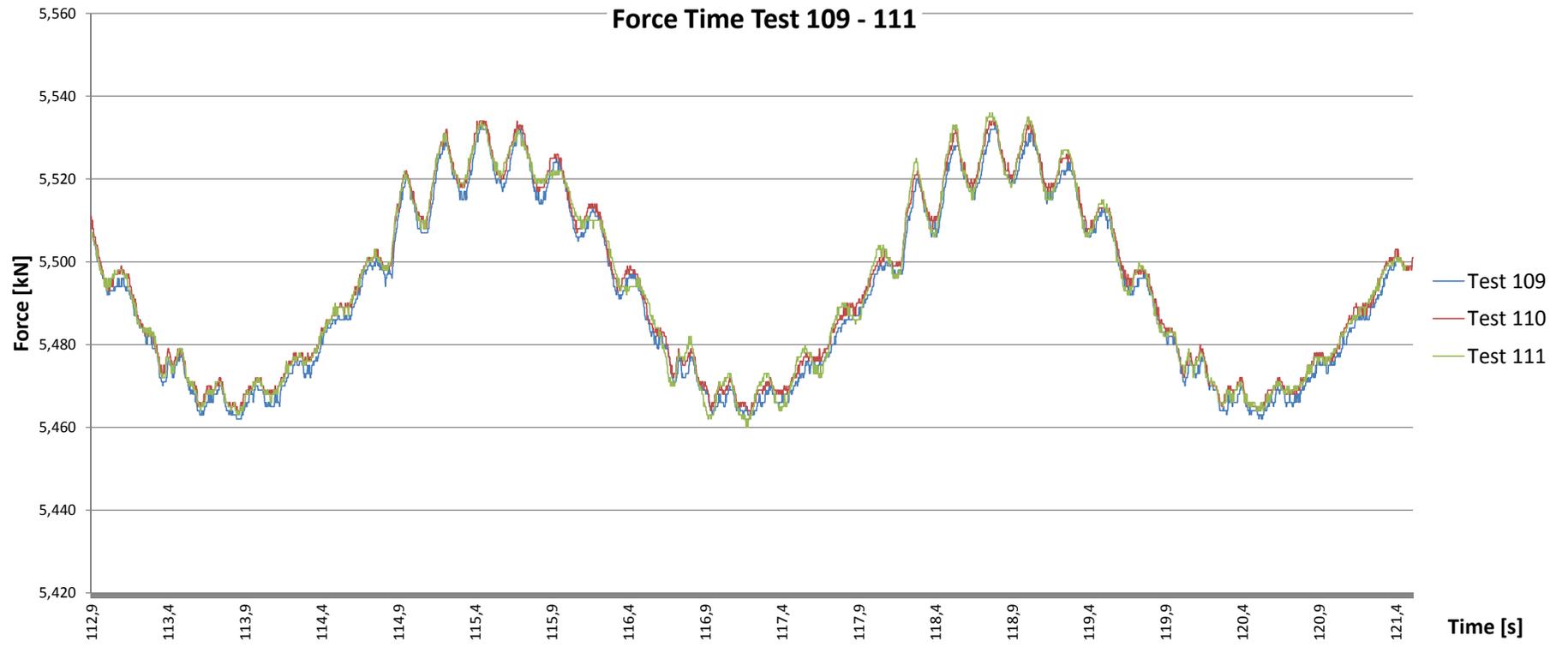
Analyse Force Frequency Test 103 – 105



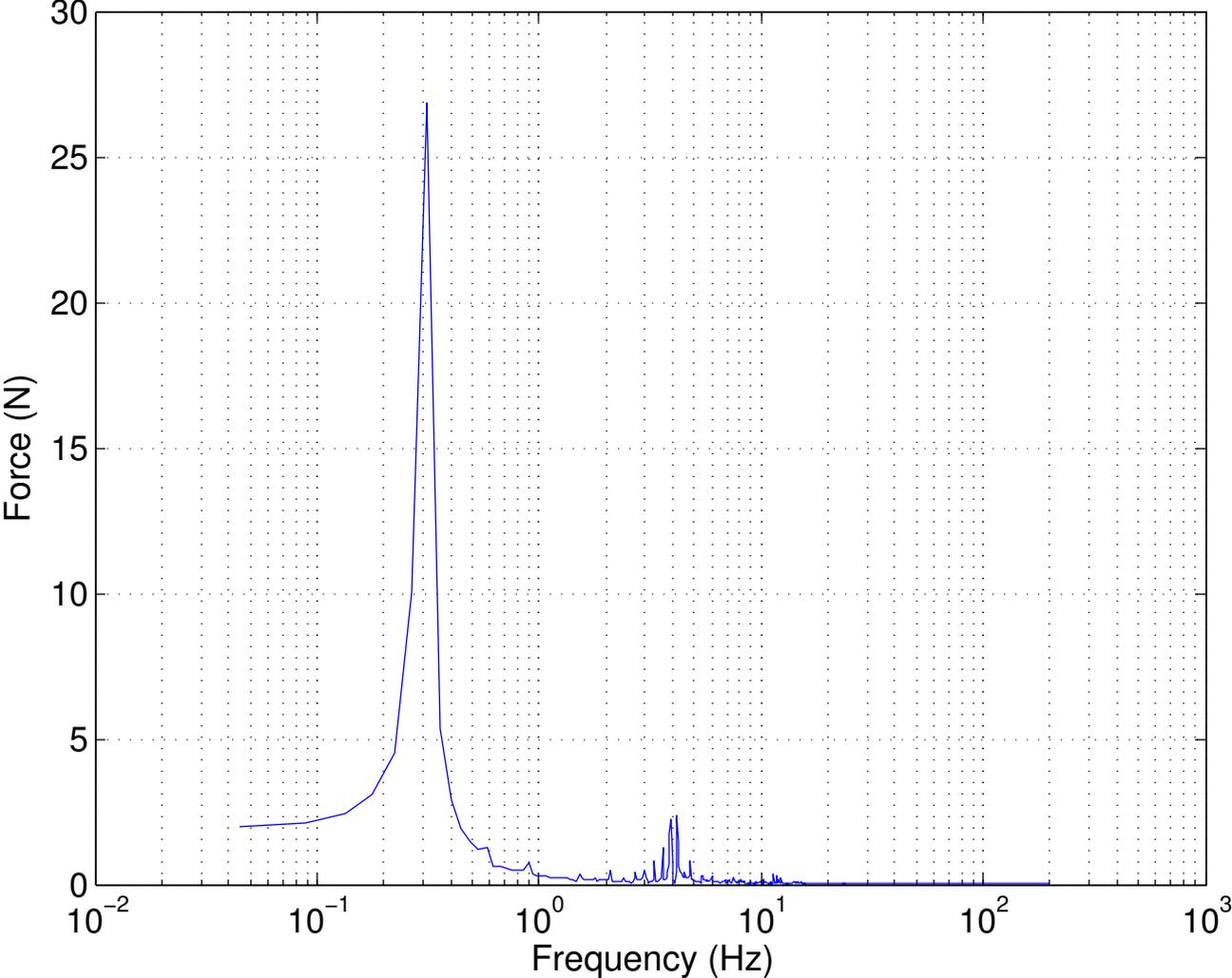


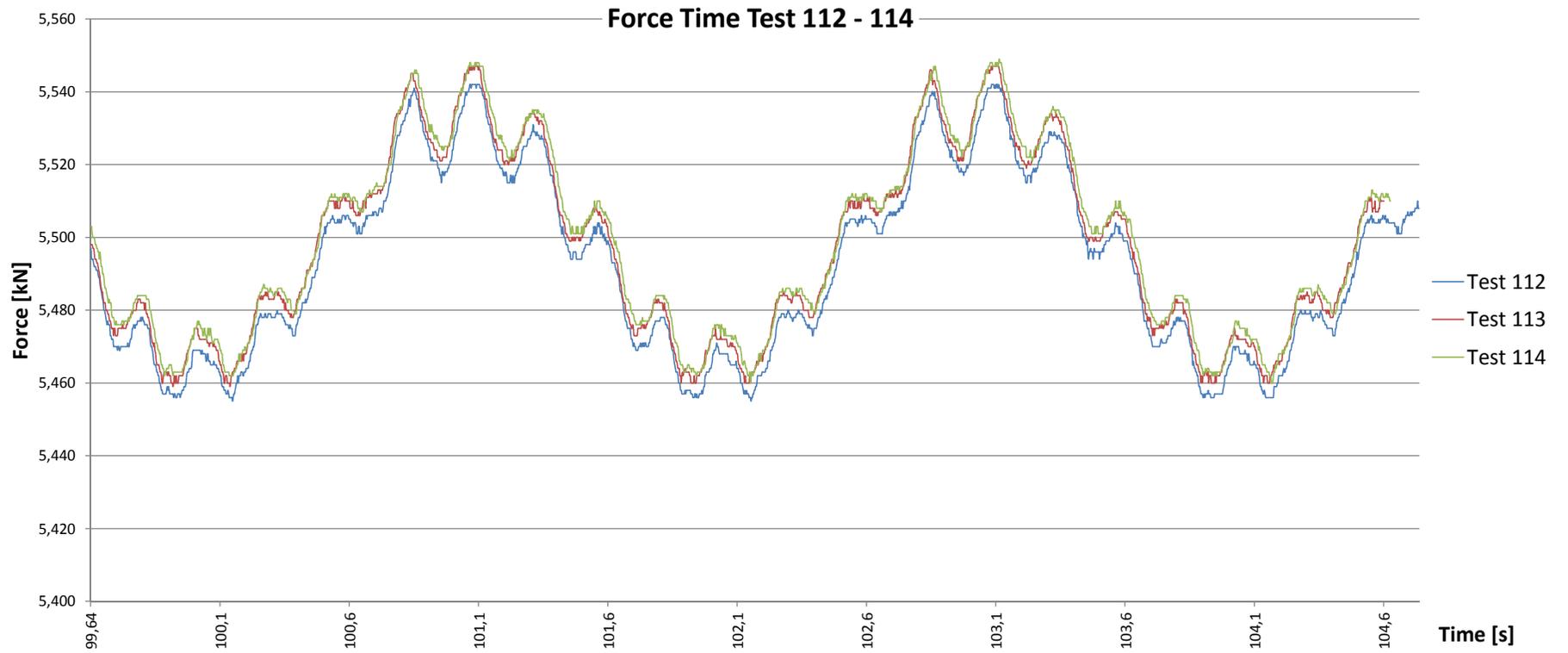
Analyse Force Frequency Test 106 – 108



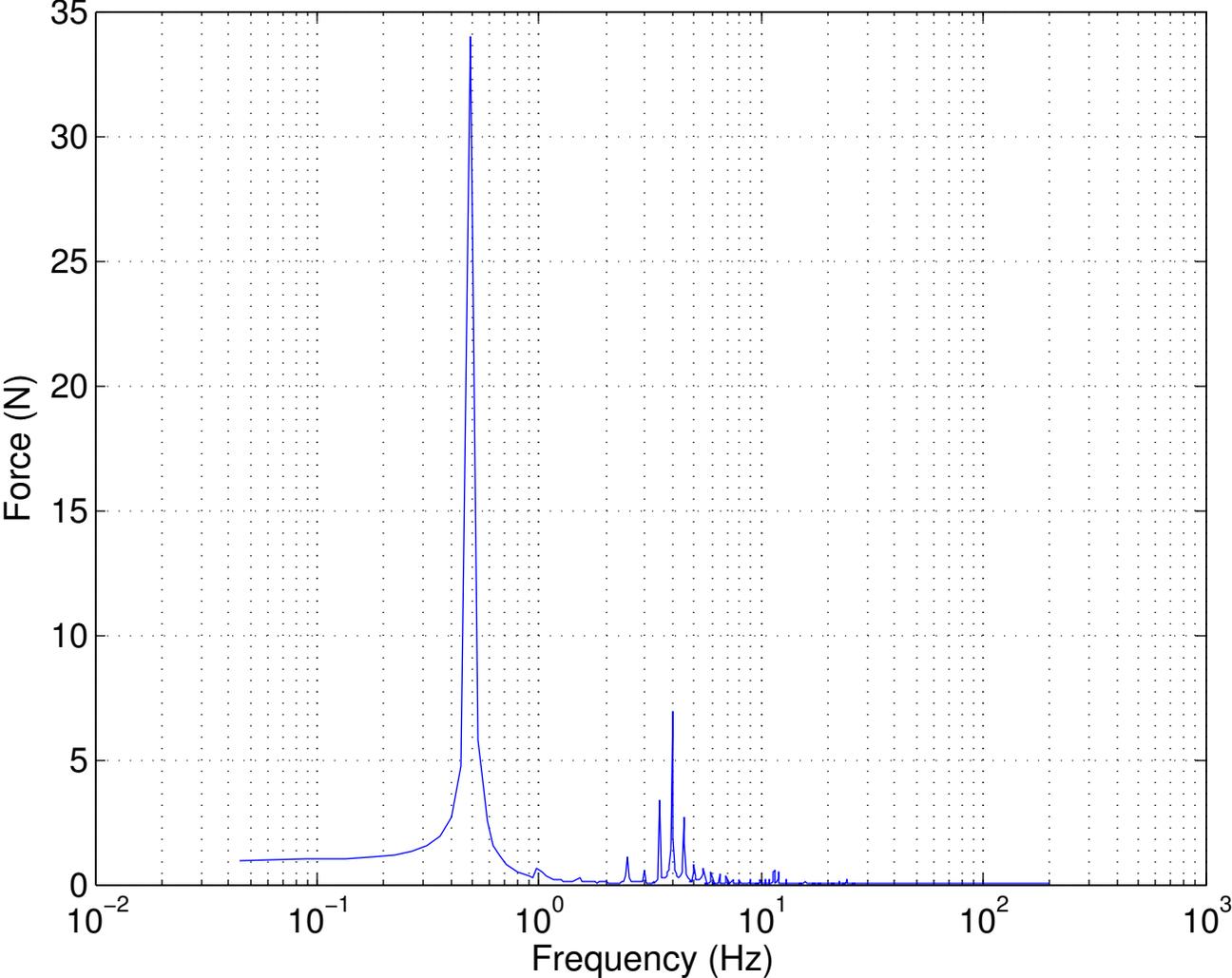


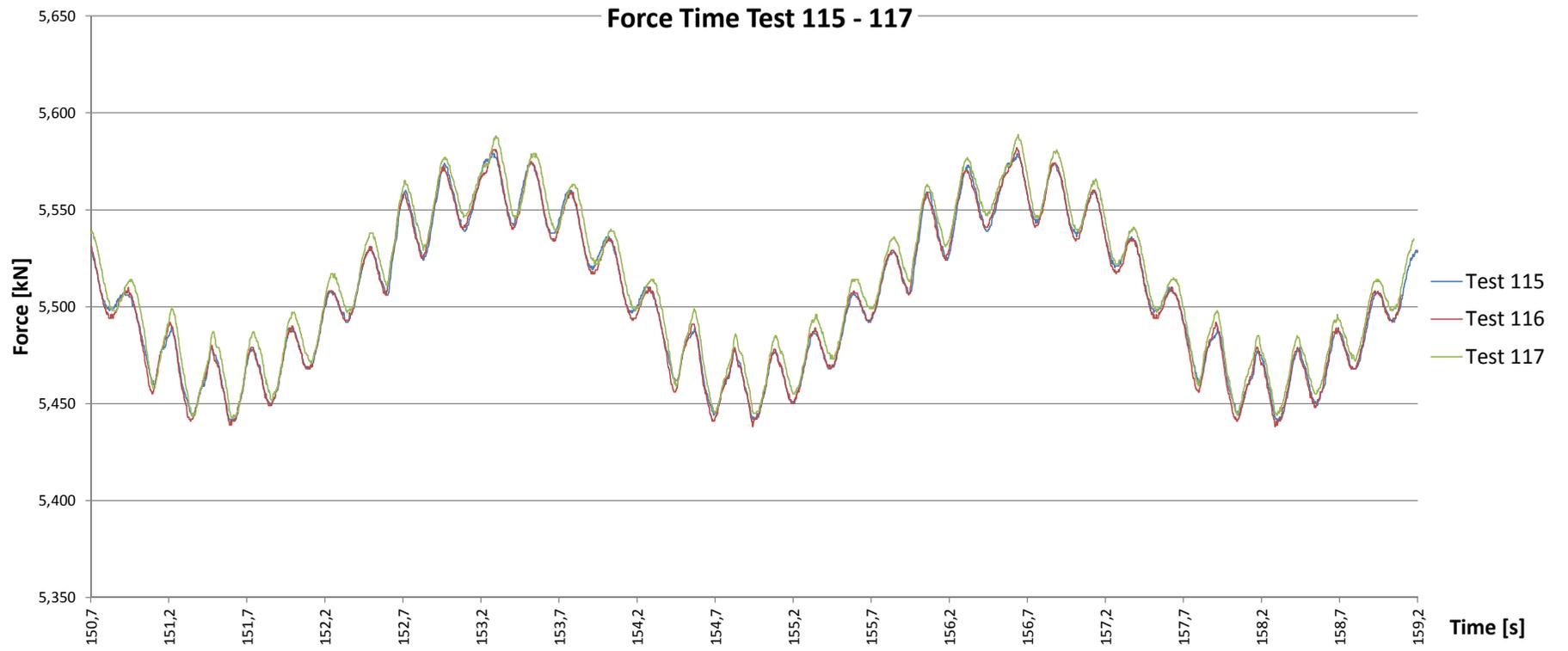
Analyse Force Frequency Test 109 – 111



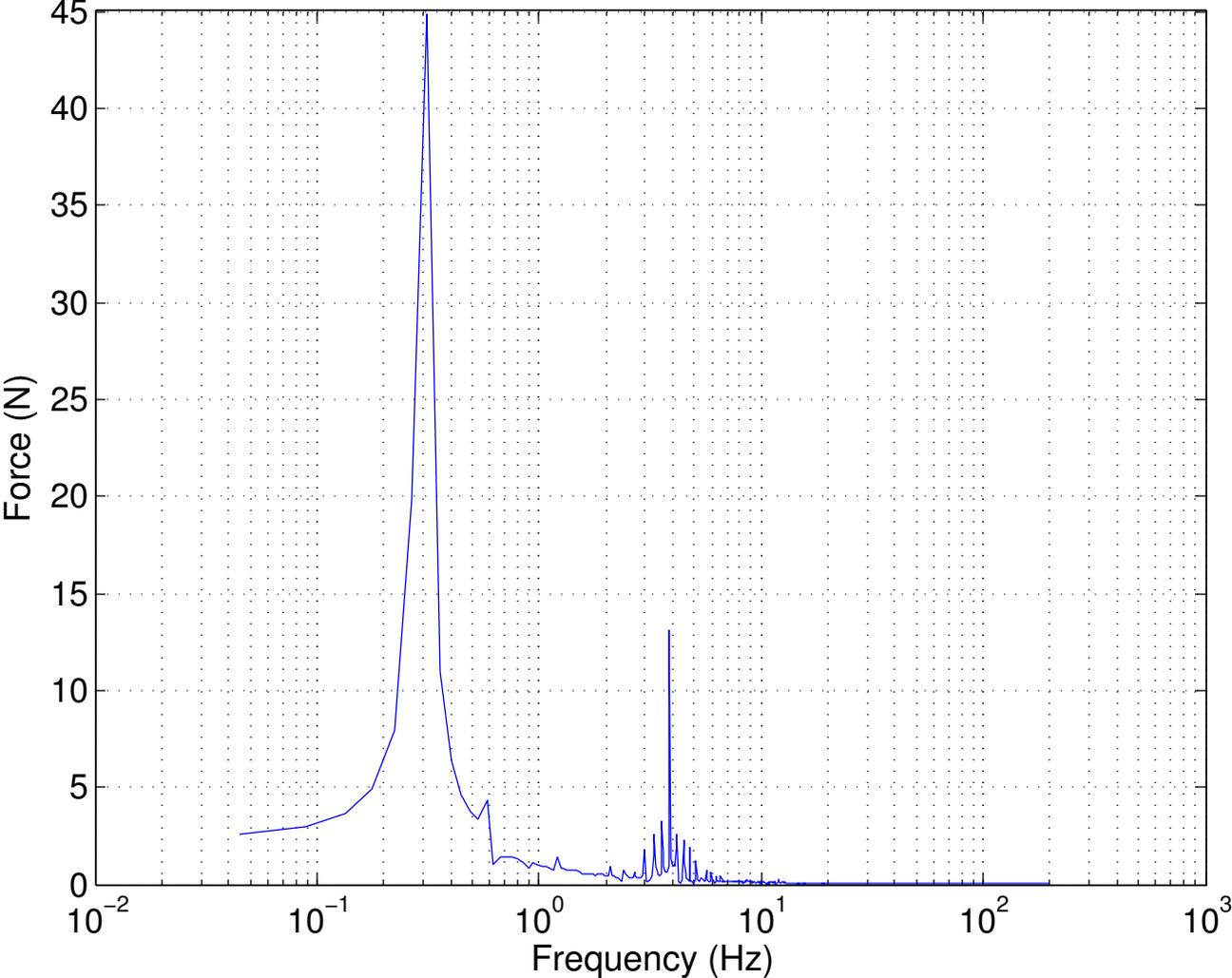


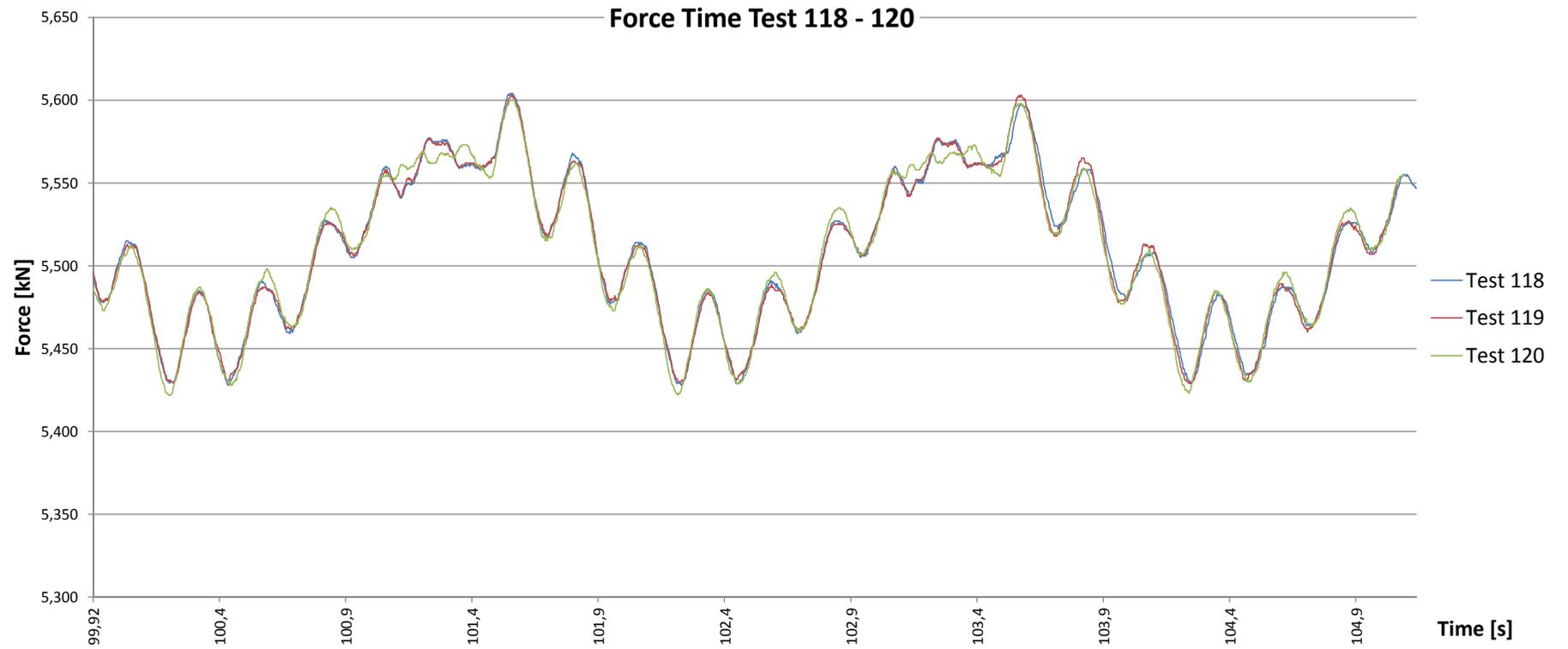
Analyse Force Frequency Test 112 – 114



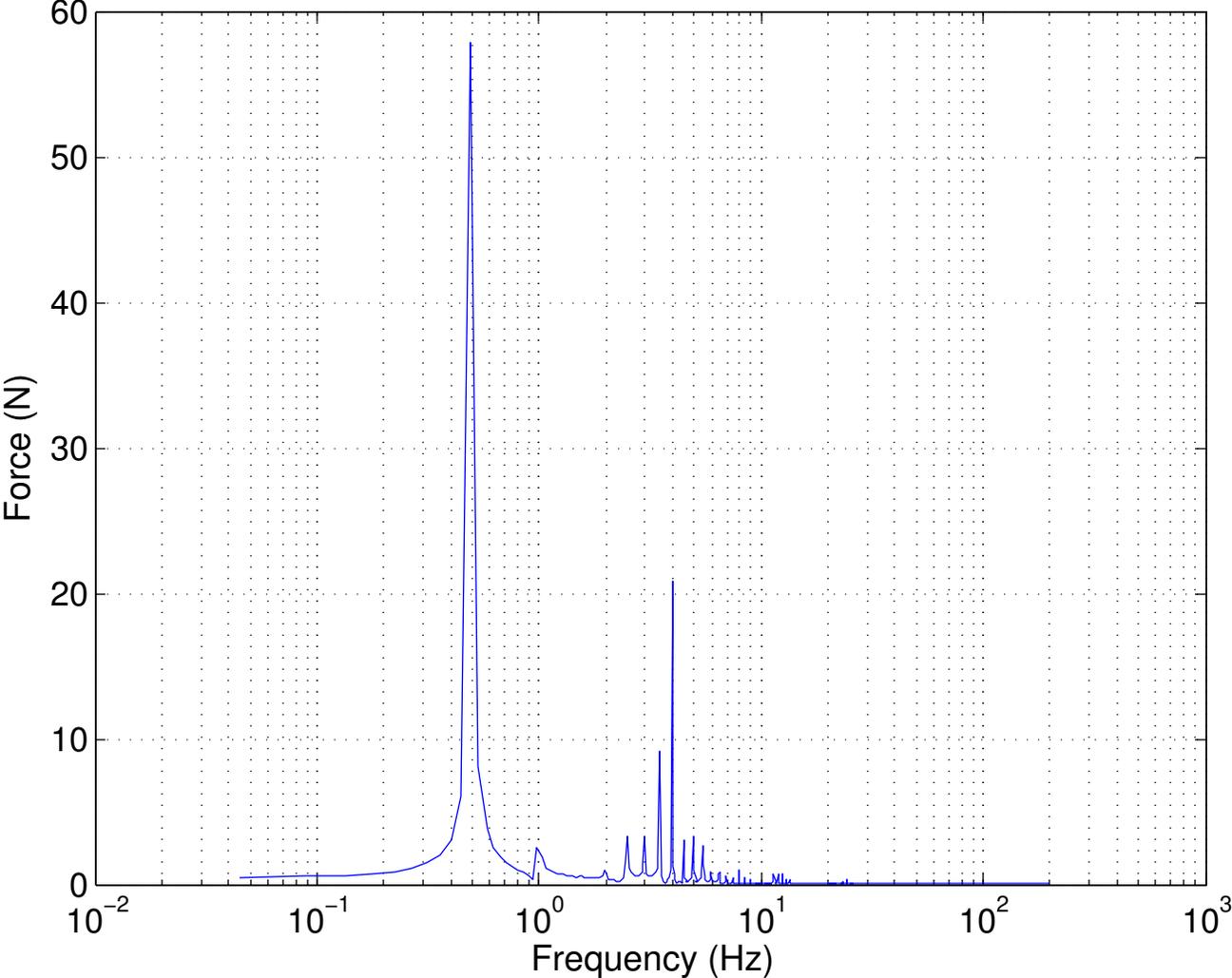


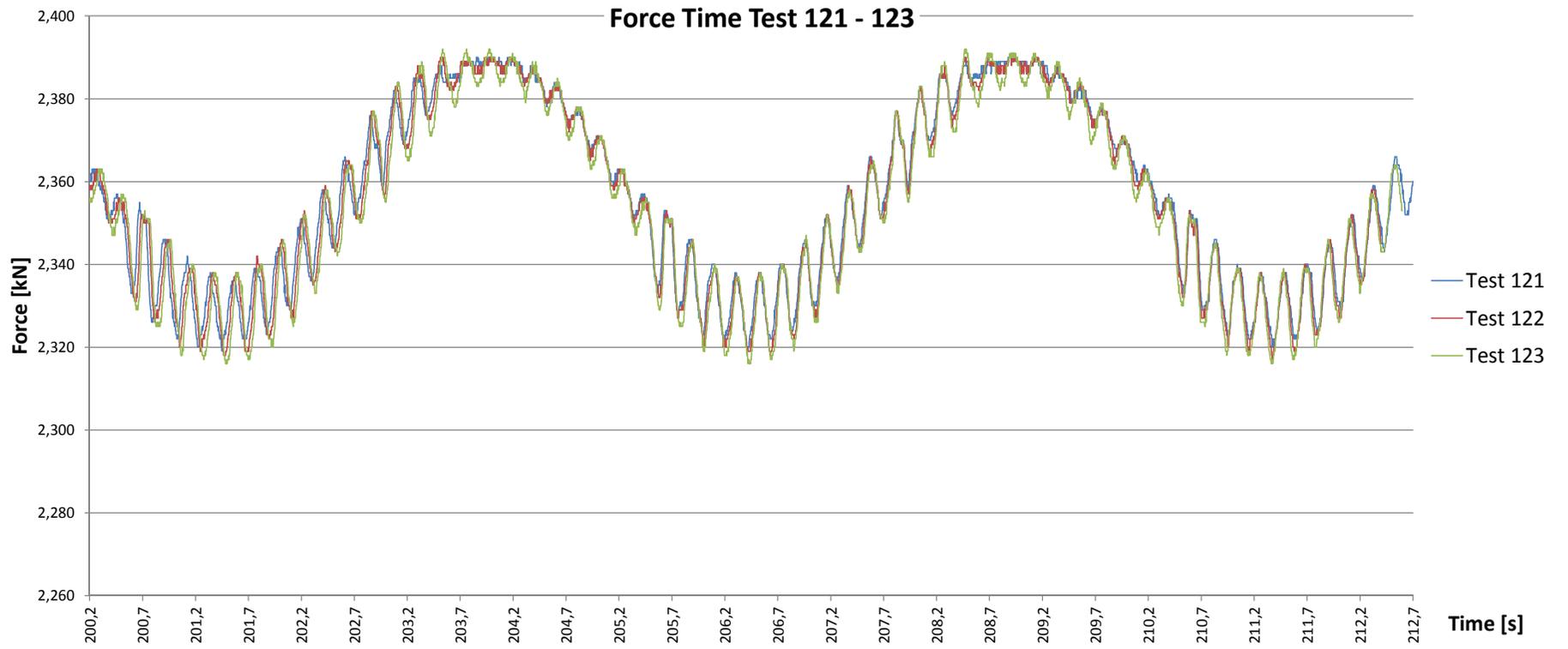
Analyse Force Frequency Test 115 – 117



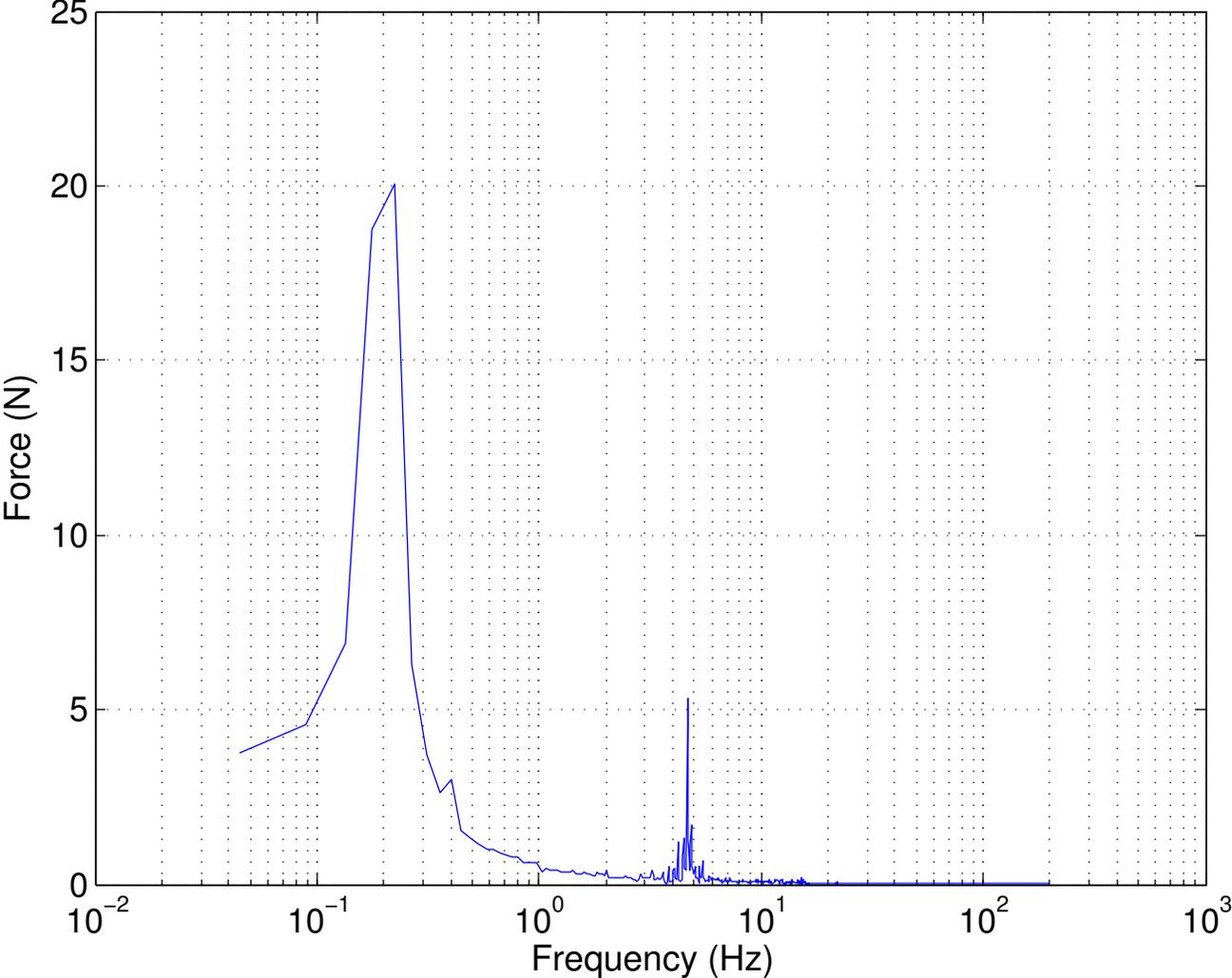


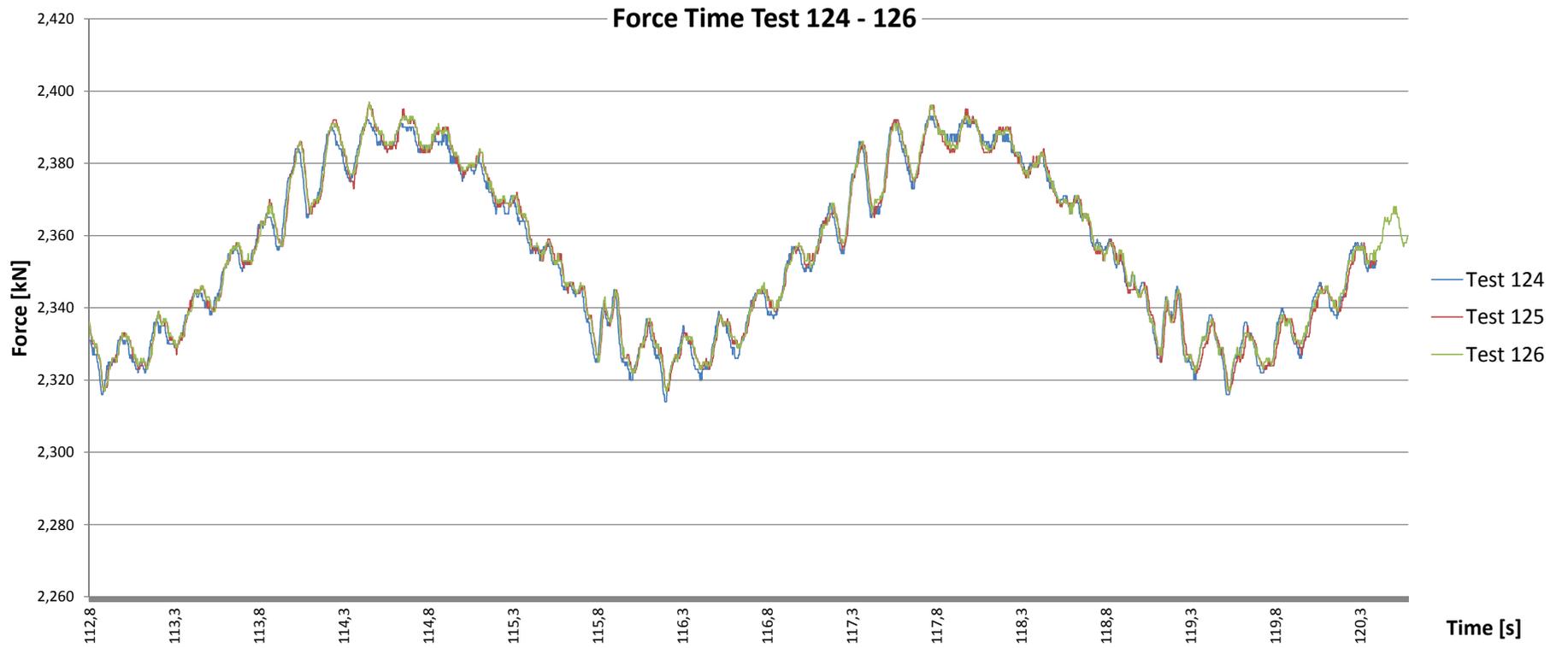
Analyse Force Frequency Test 118 – 120



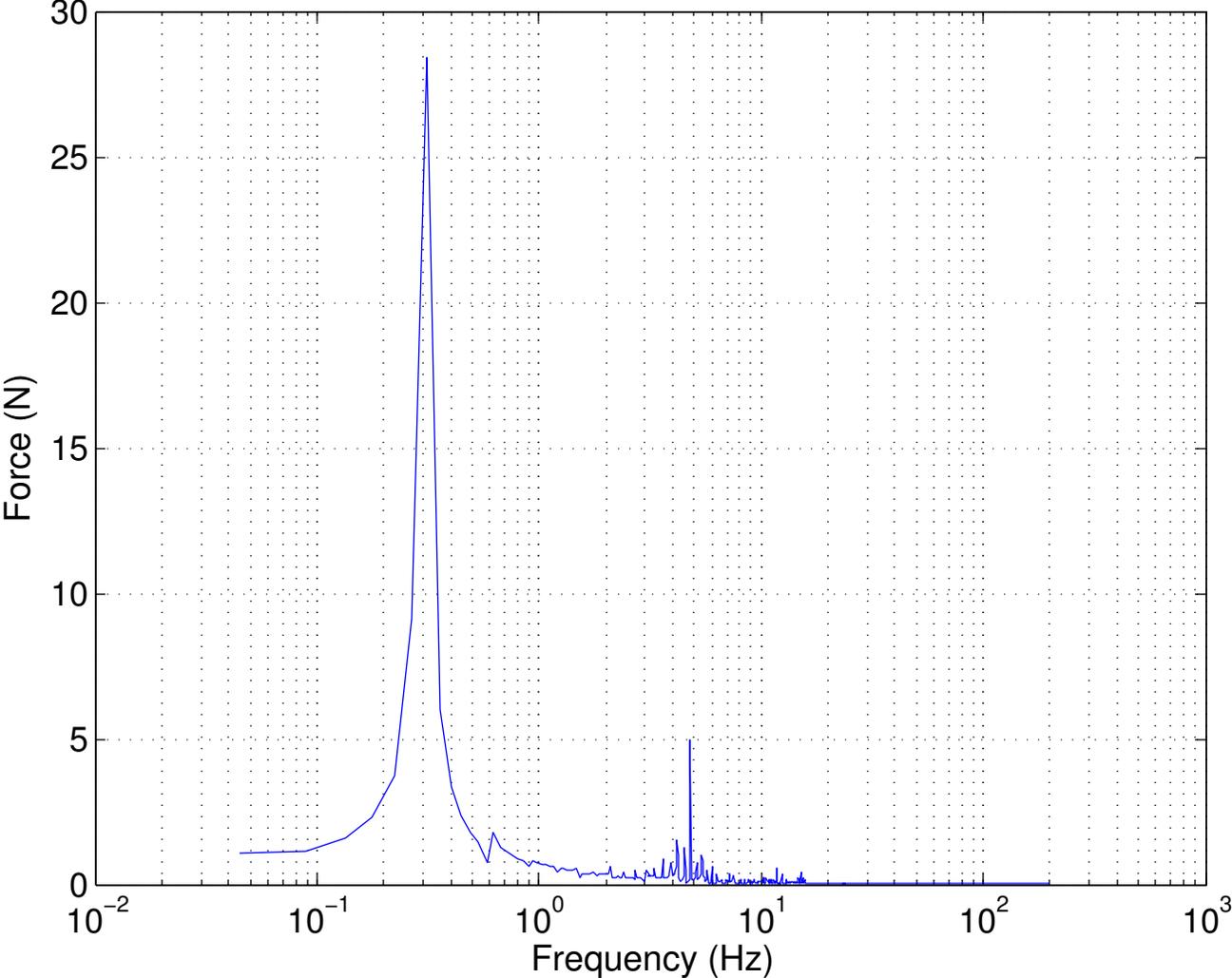


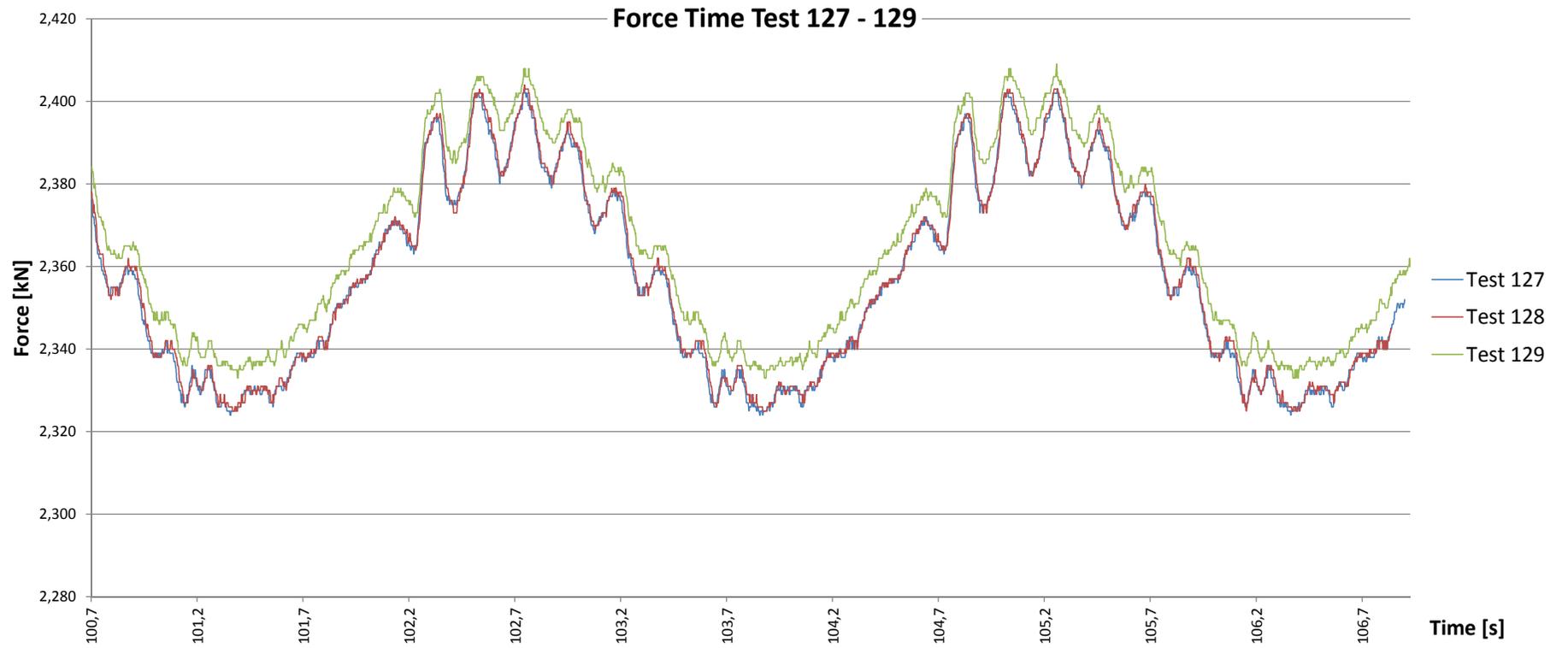
Analyse Force Frequency Test 121 – 123



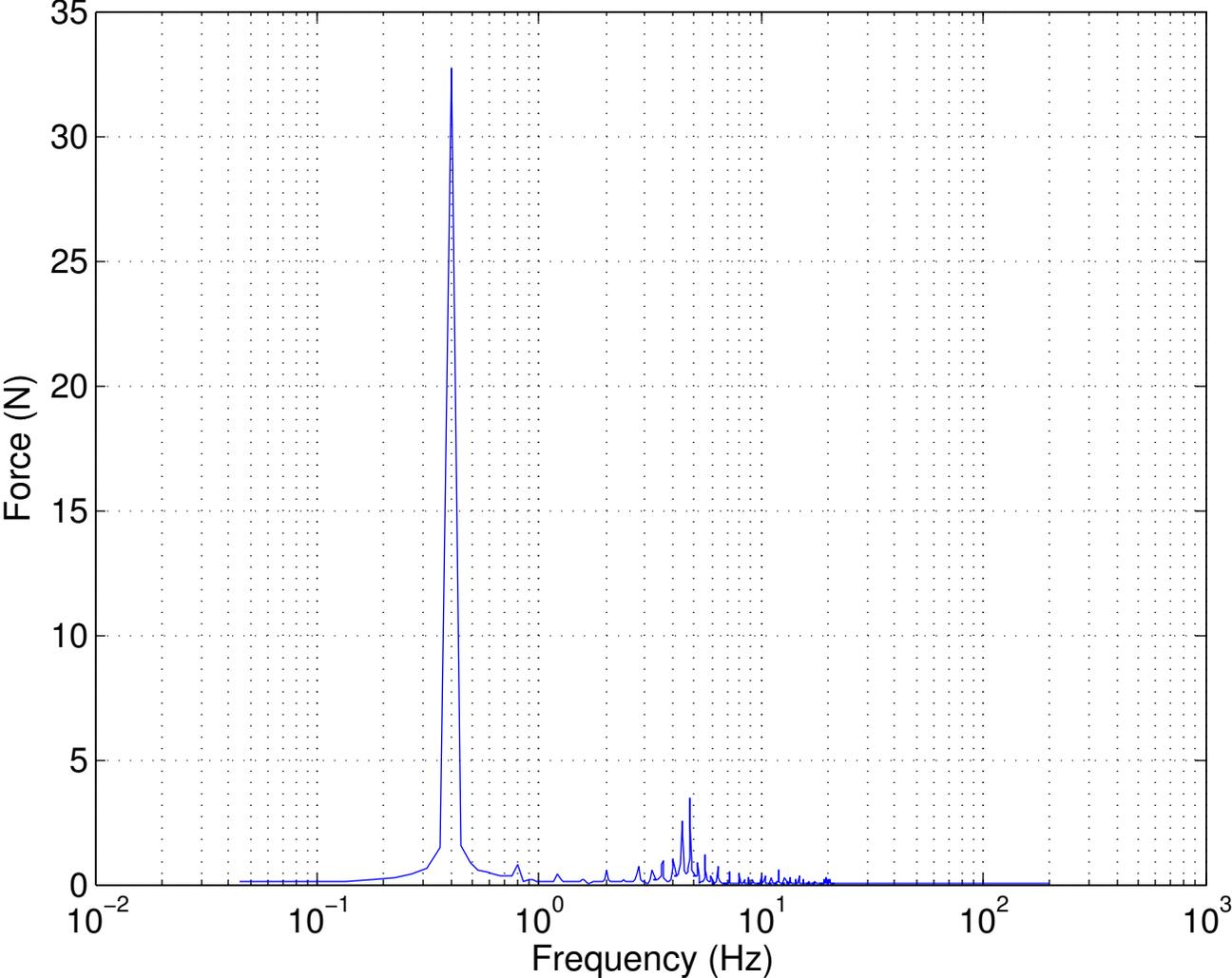


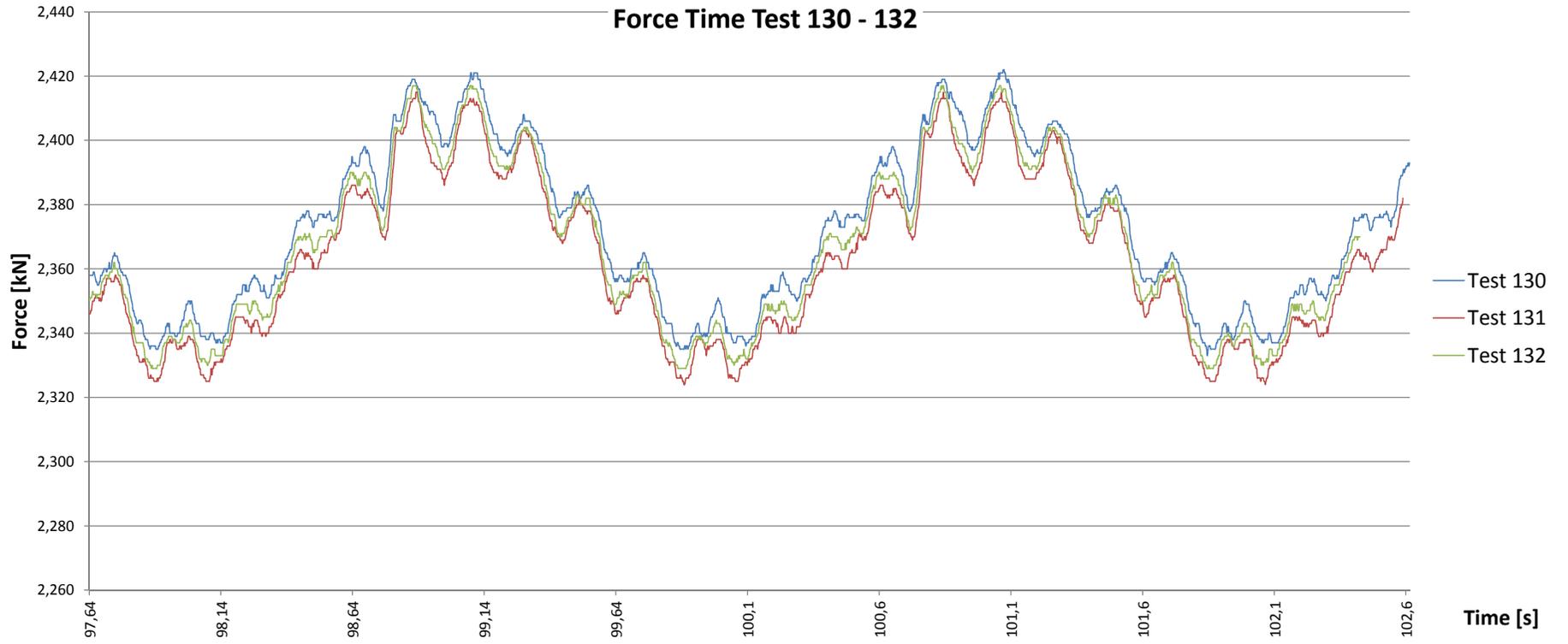
Analyse Force Frequency Test 124 – 126



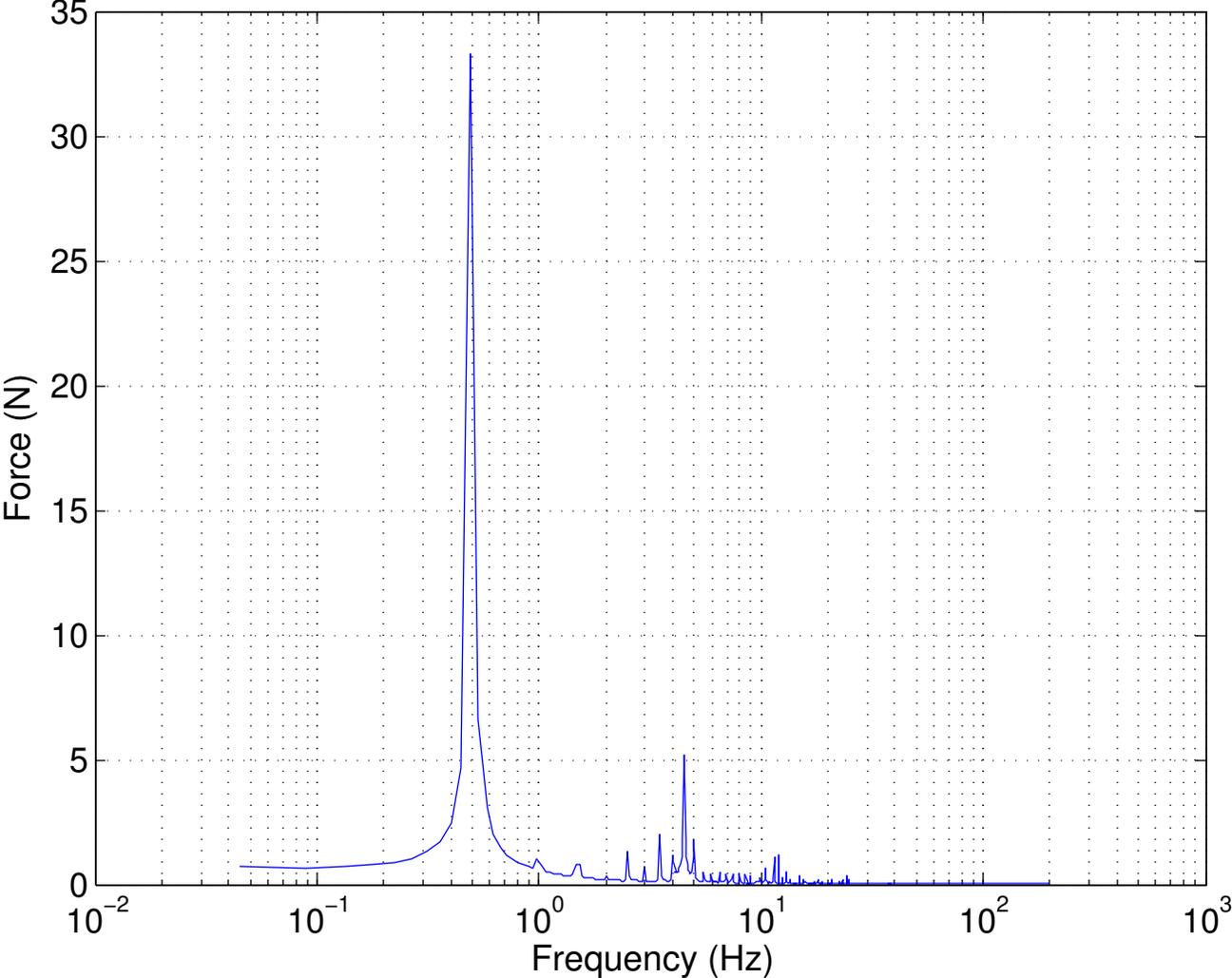


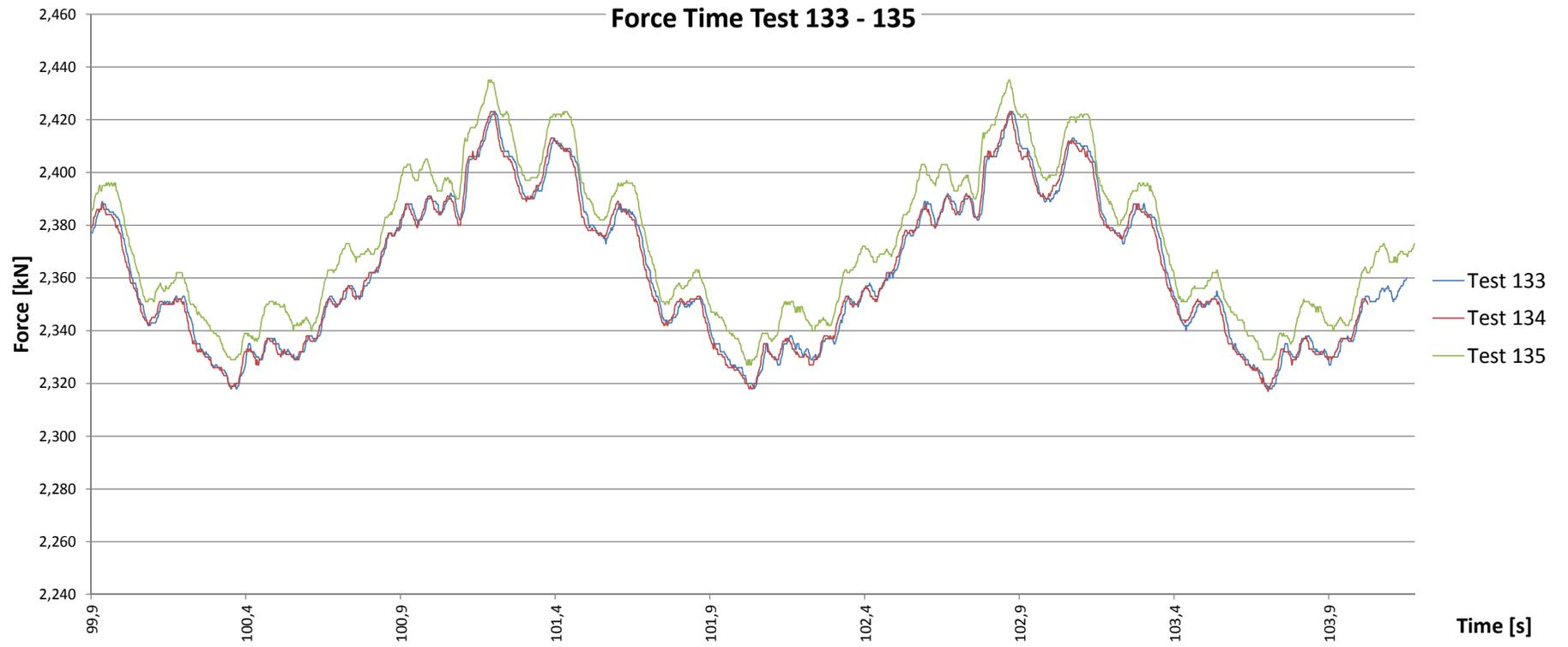
Analyse Force Frequency Test 127 – 129



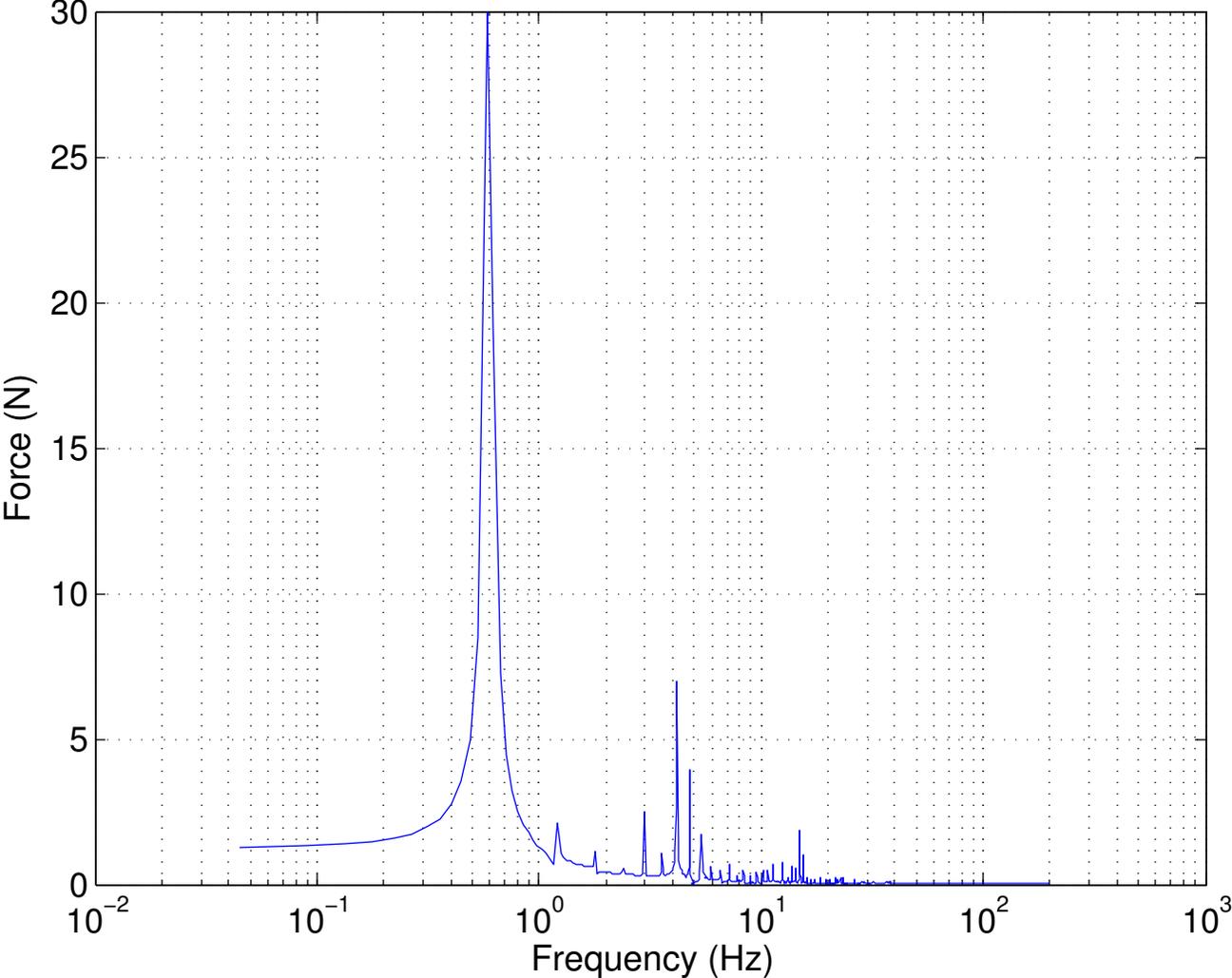


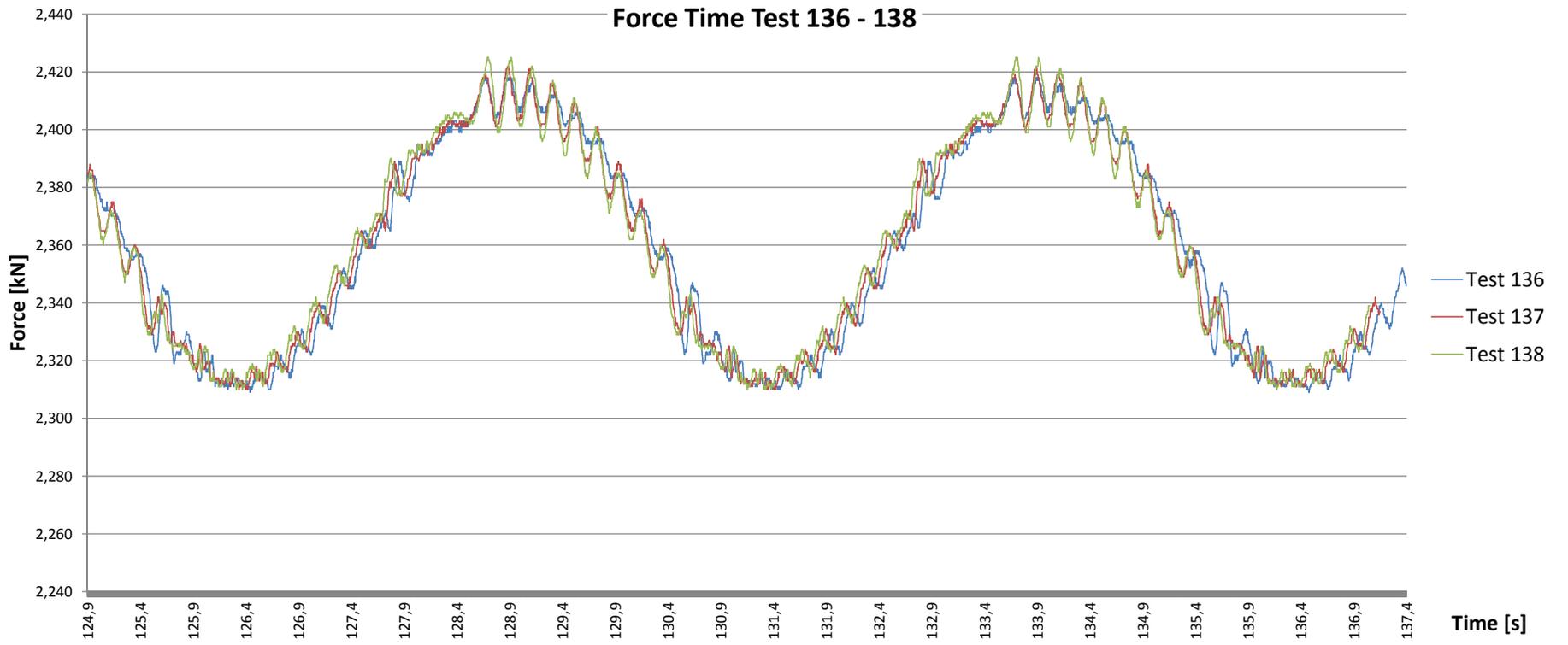
Analyse Force Frequency Test 130 – 132



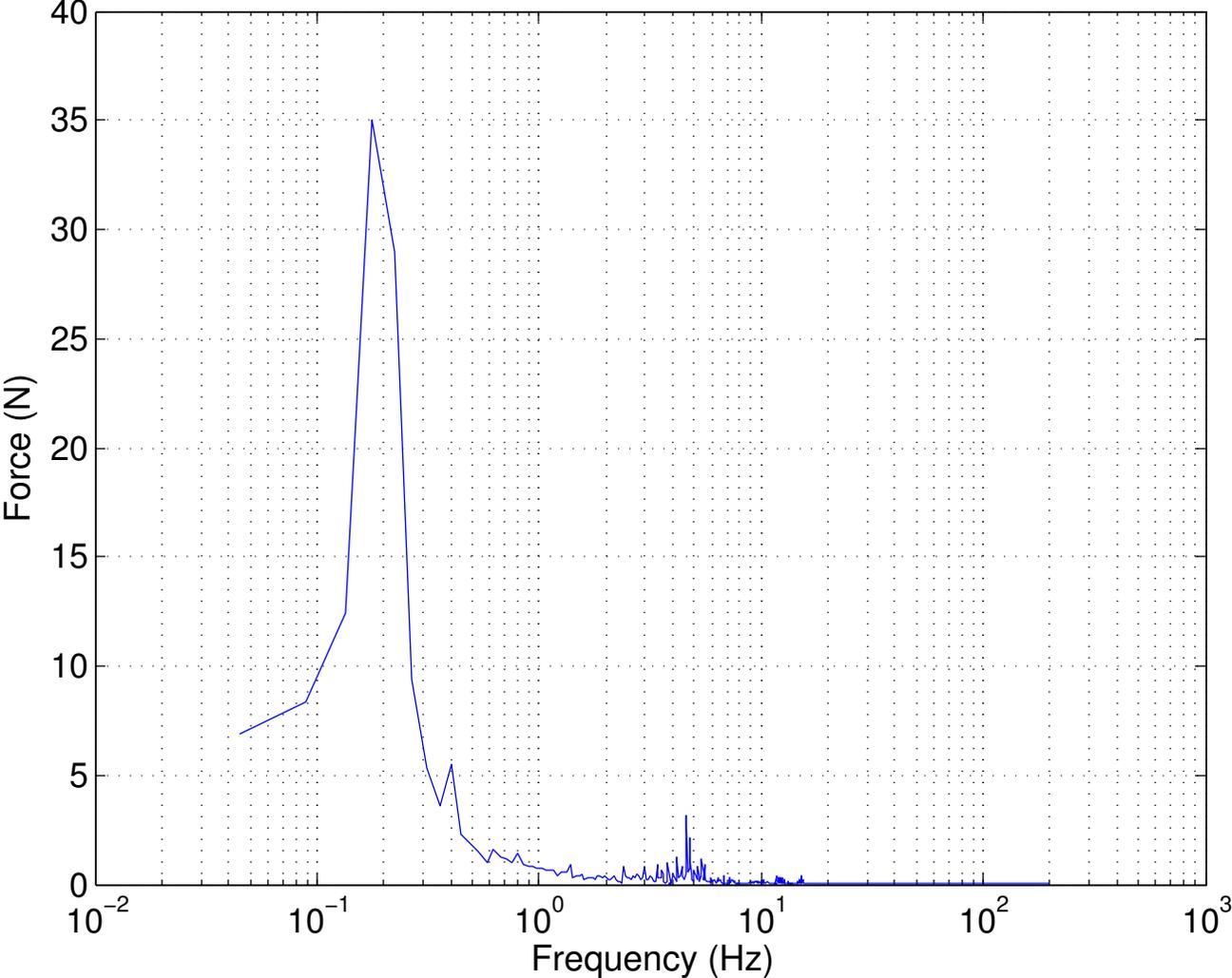


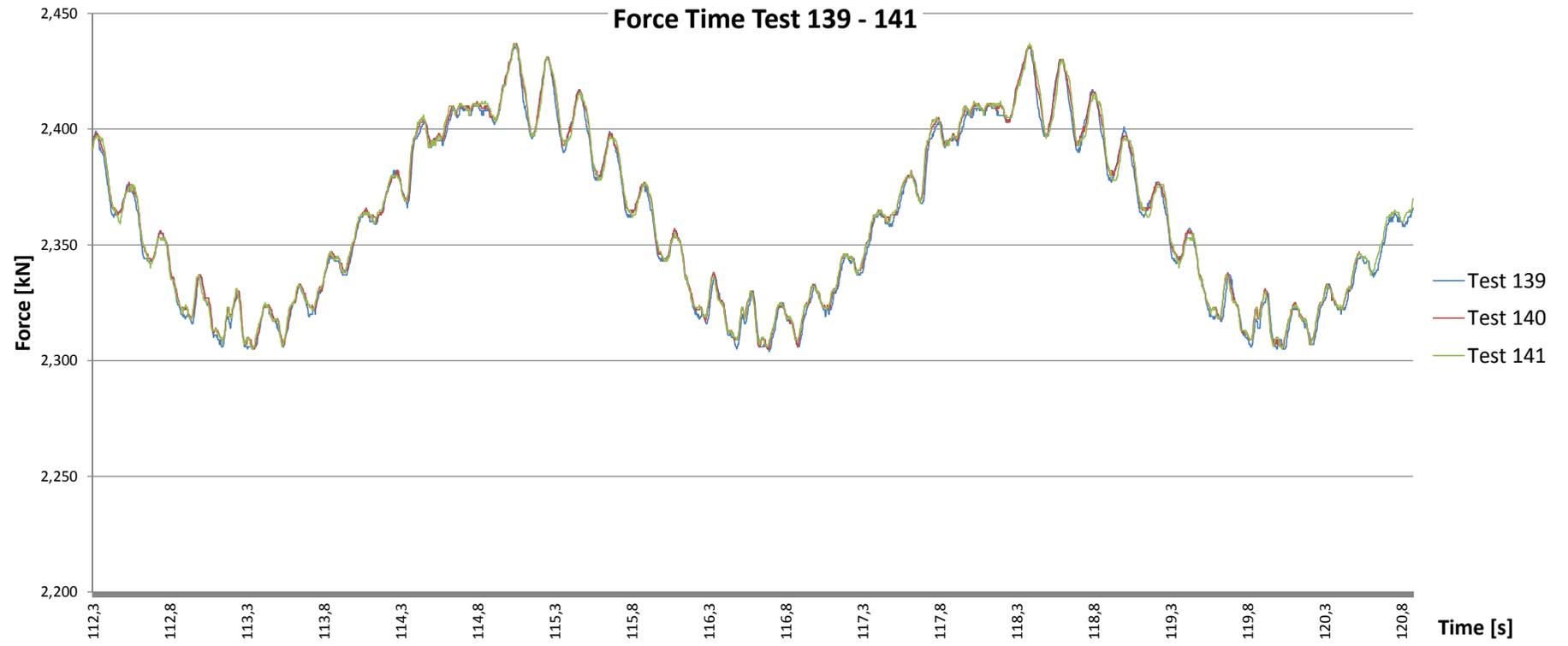
Analyse Force Frequency Test 133 – 135



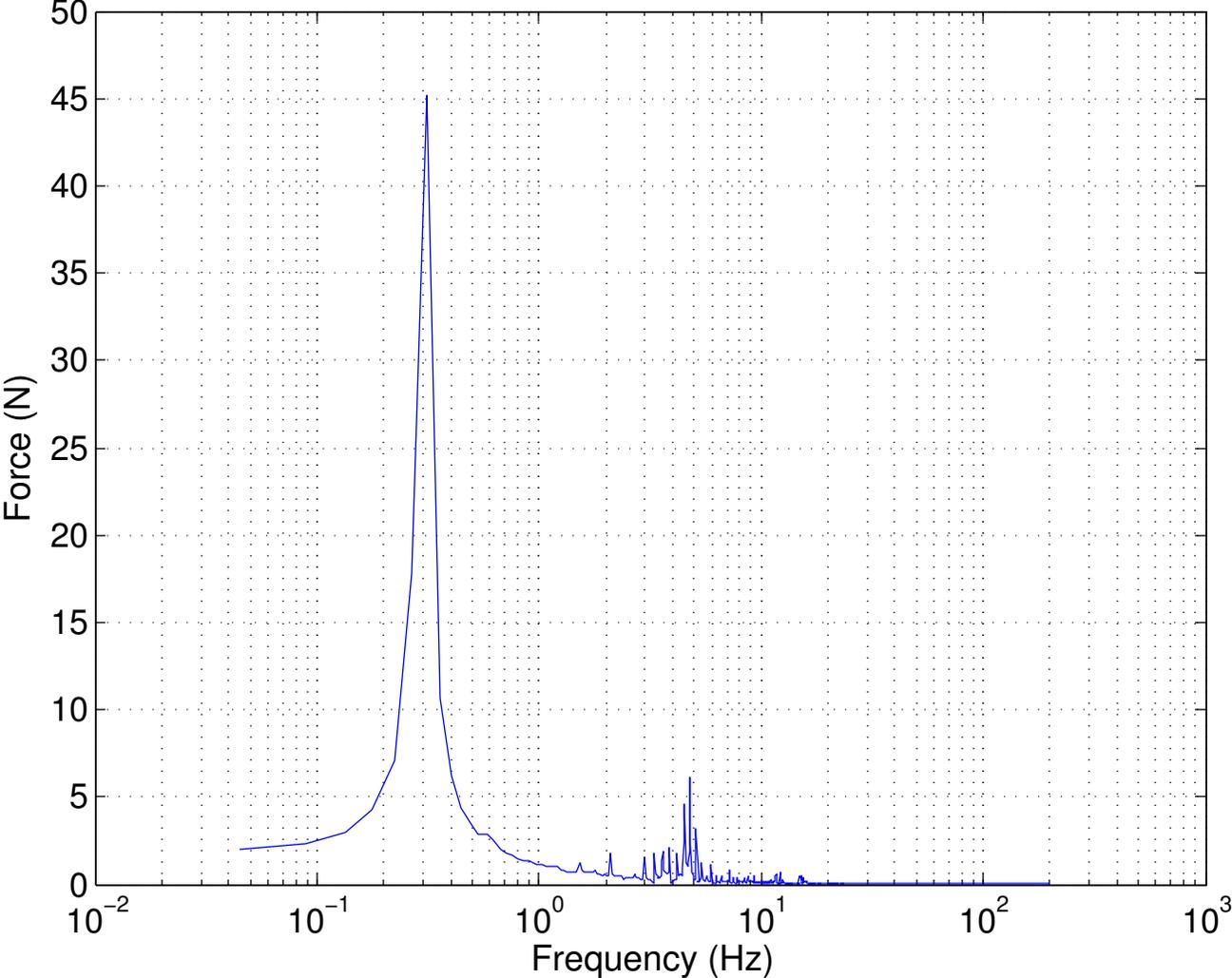


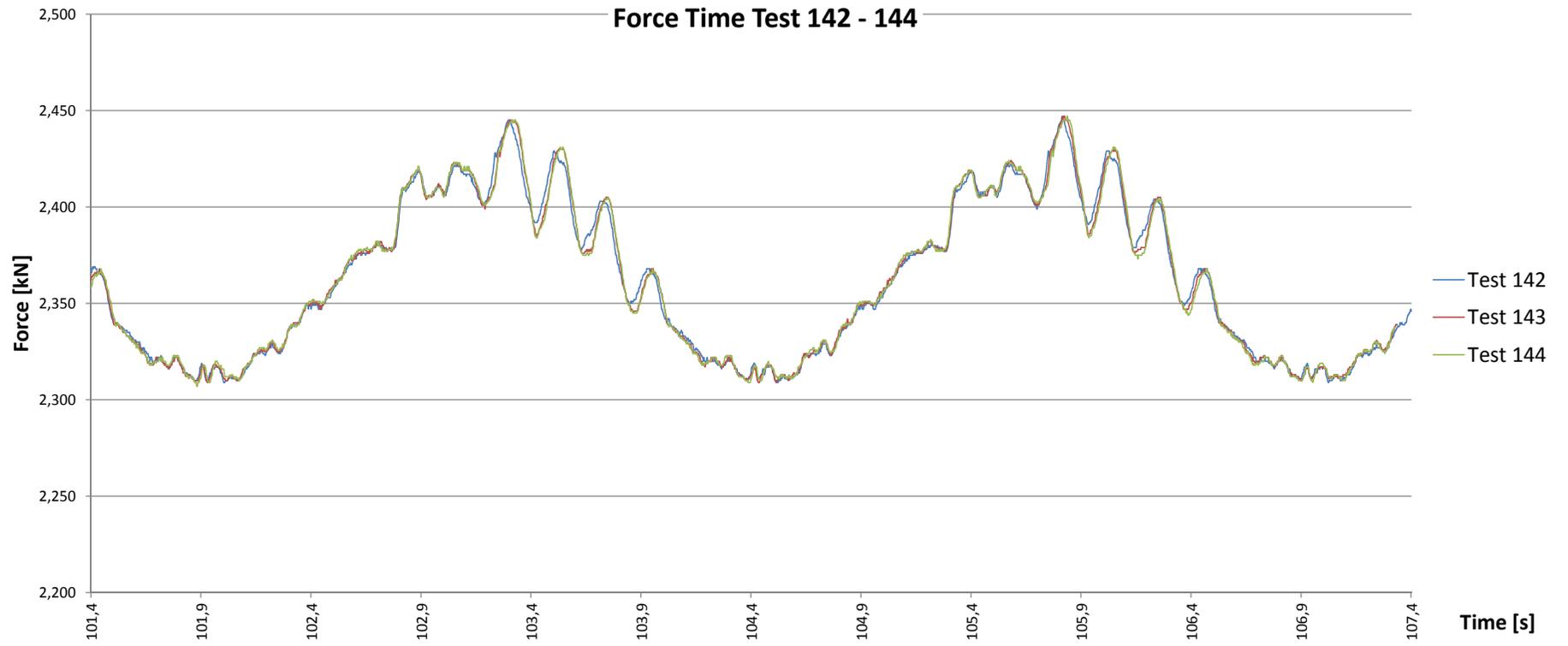
Analyse Force Frequency Test 136 – 138



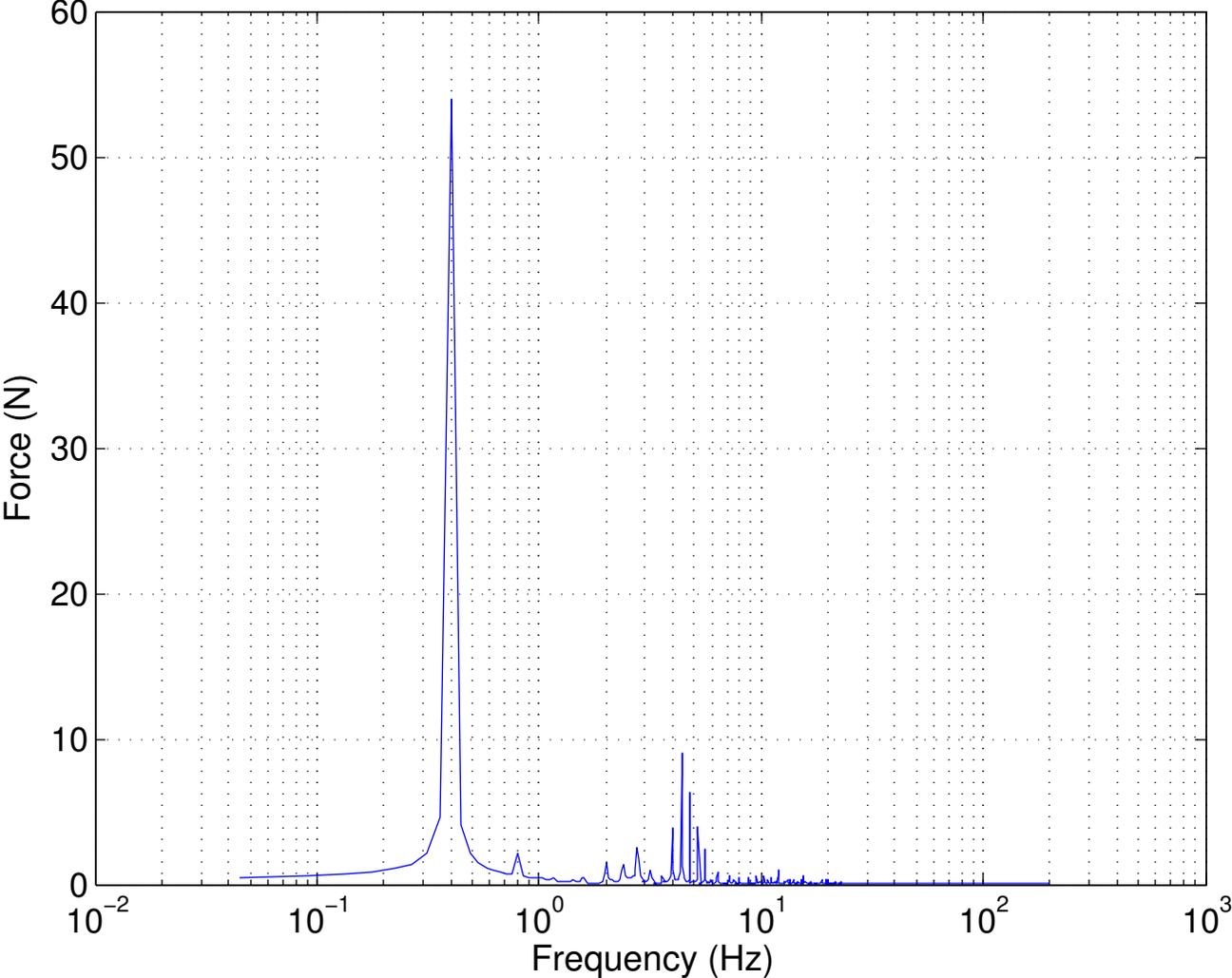


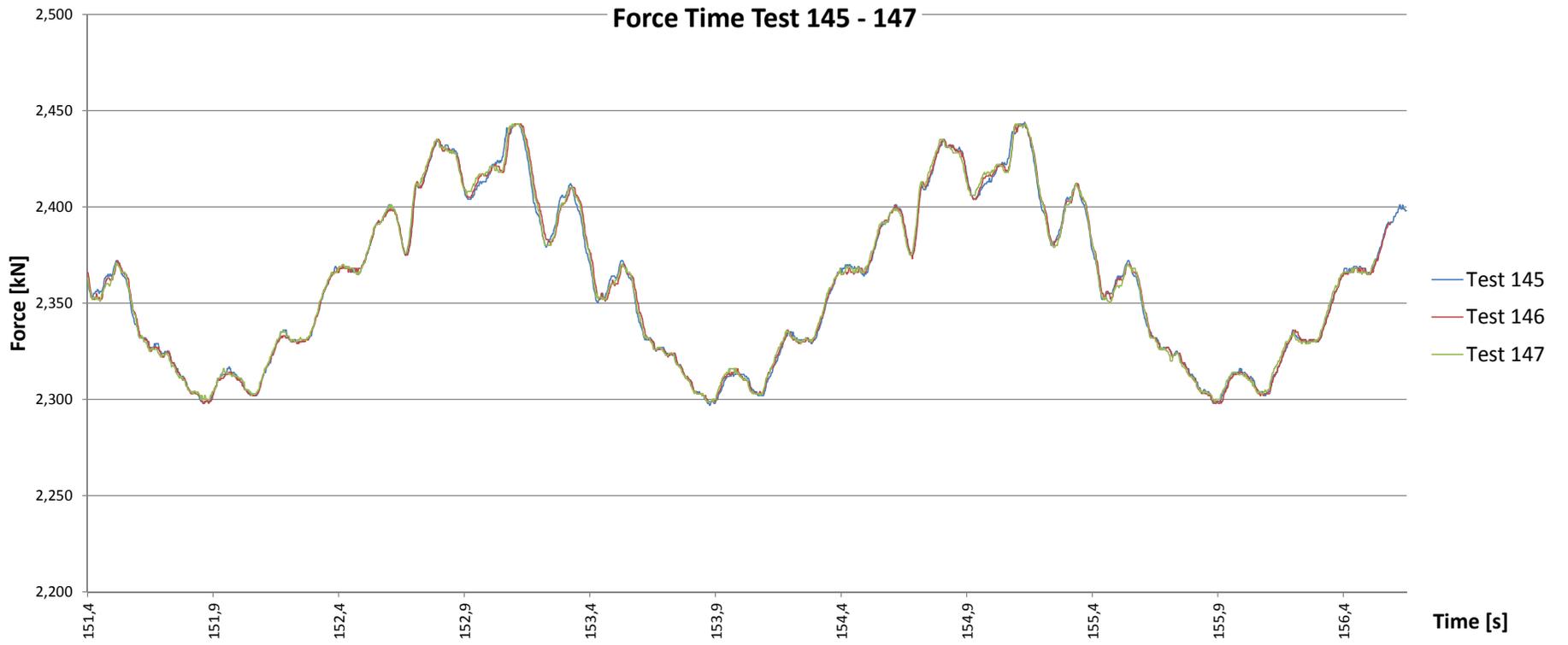
Analyse Force Frequency Test 139 – 141



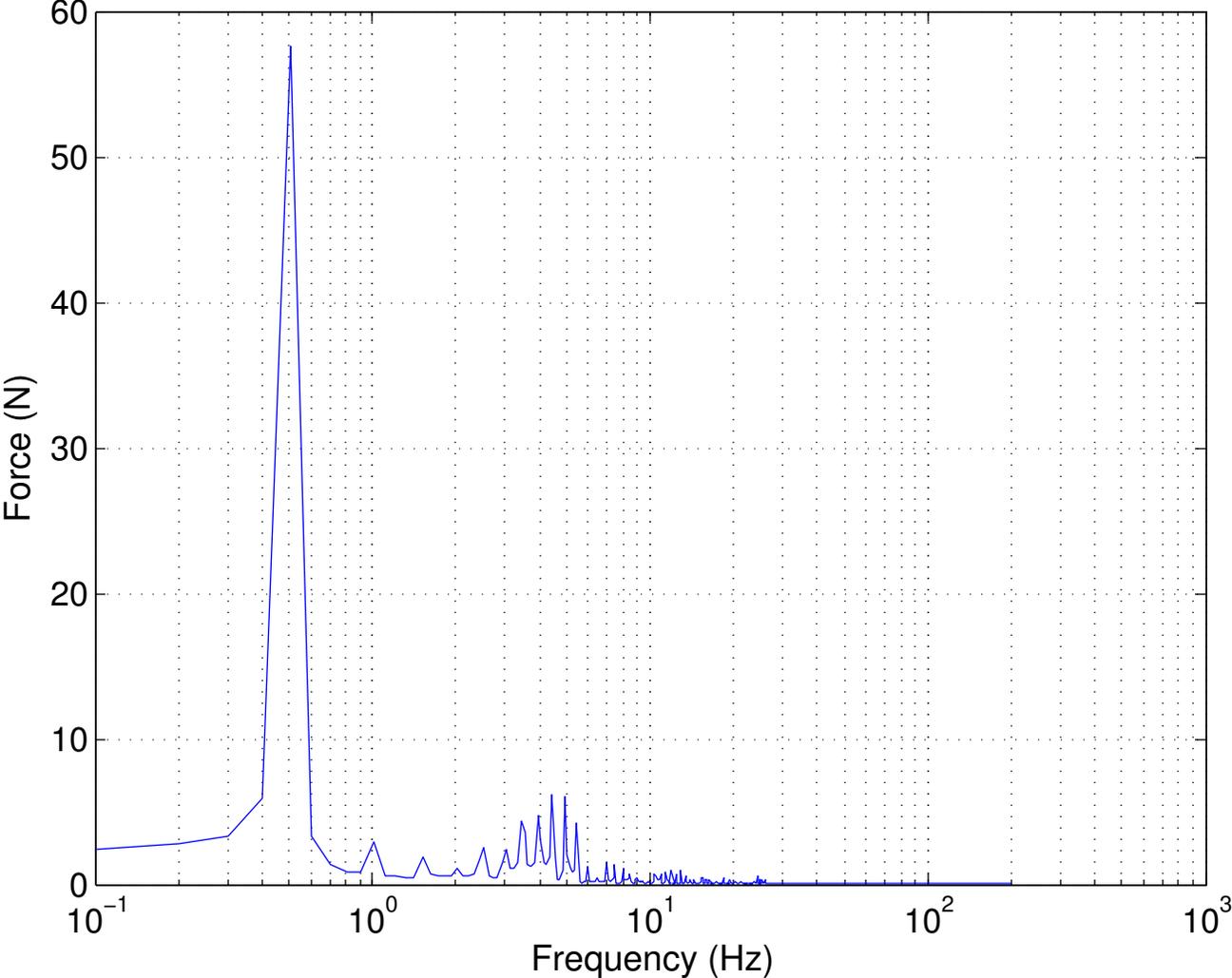


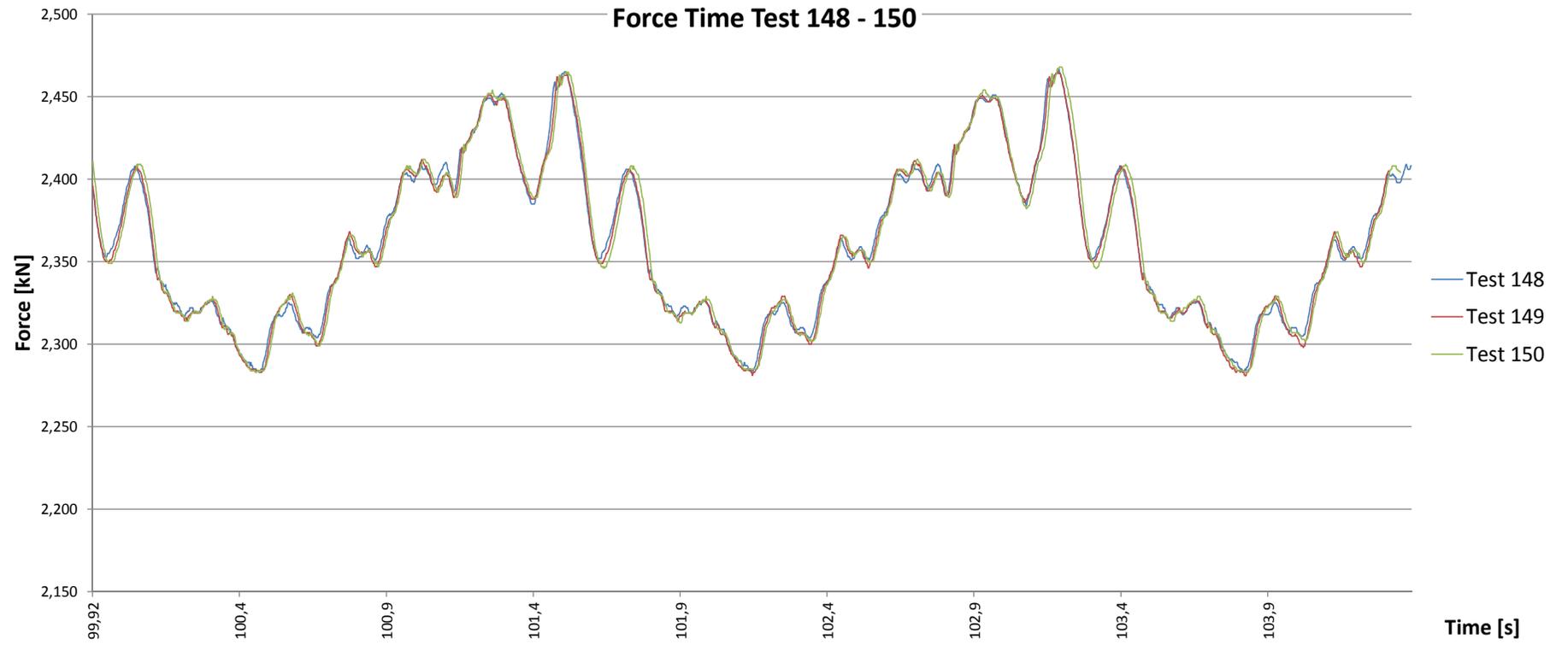
Analyse Force Frequency Test 142 – 144



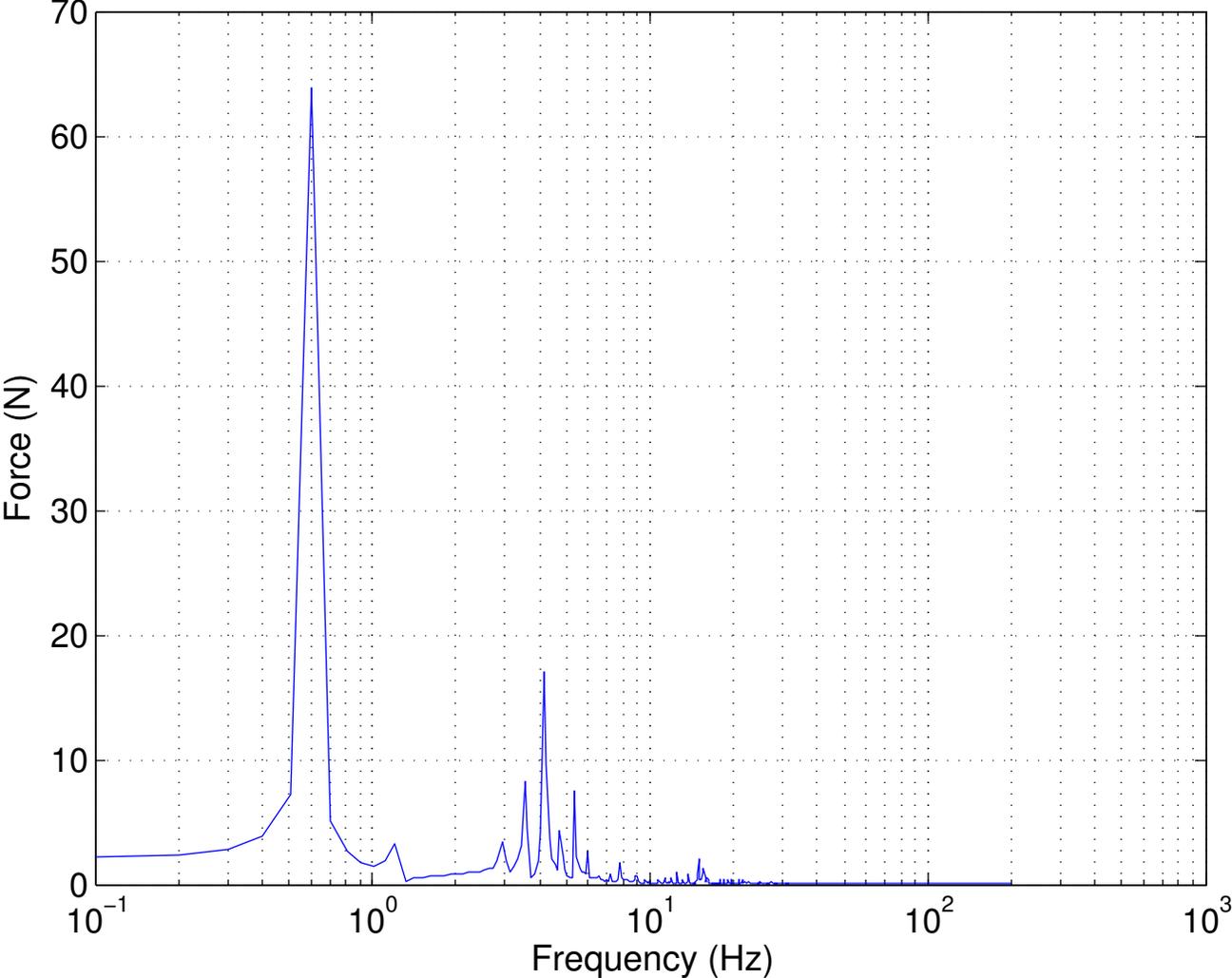


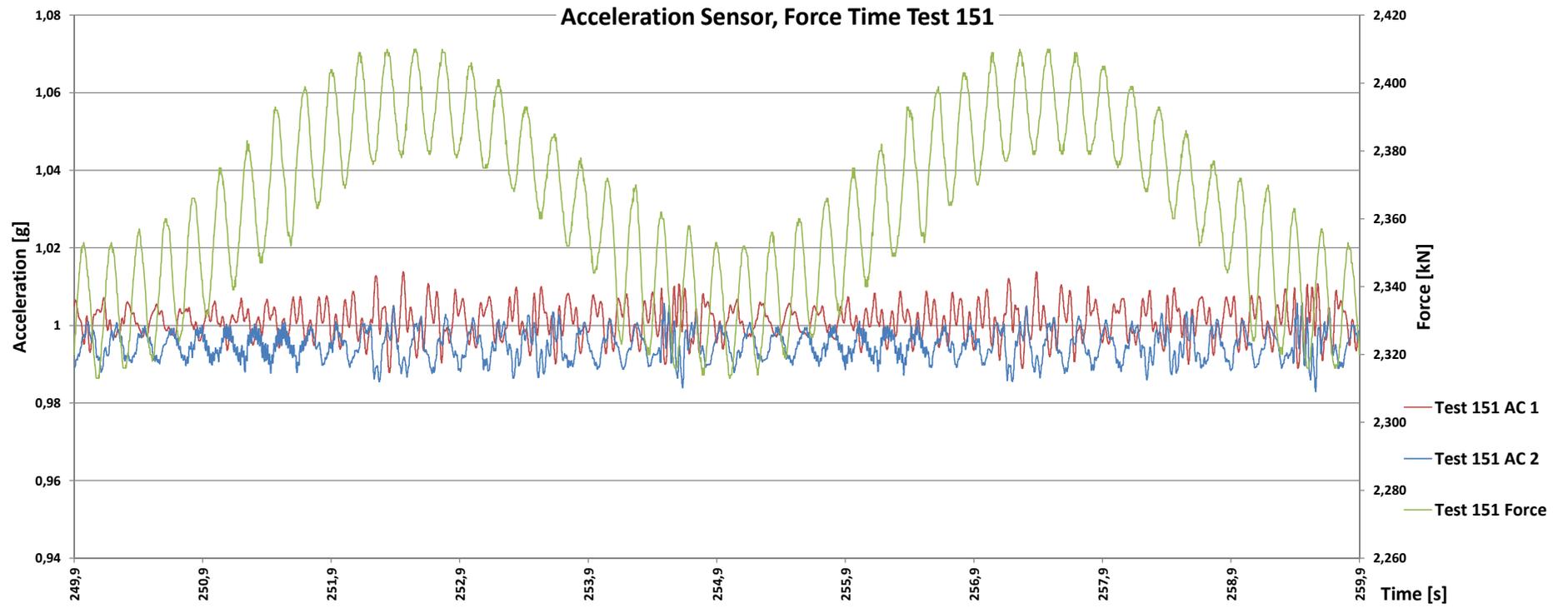
Analyse Force Frequency Test 145 – 147

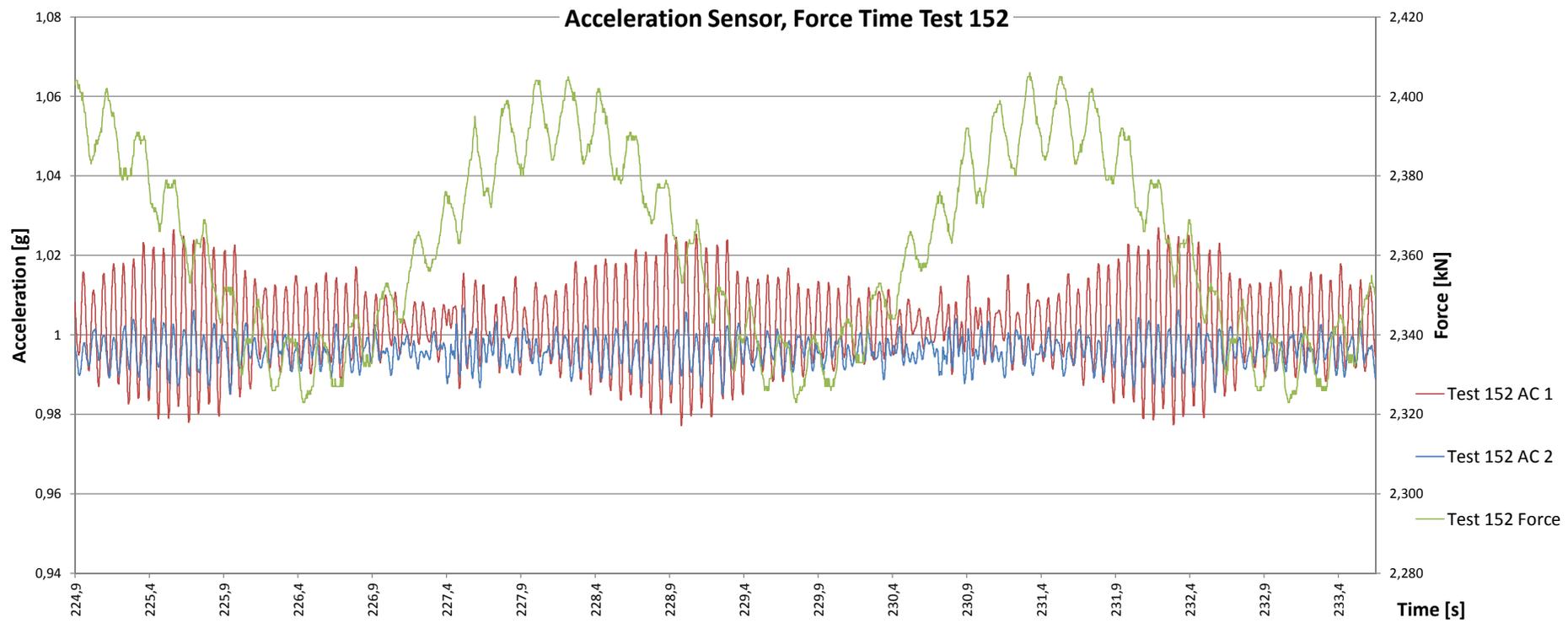


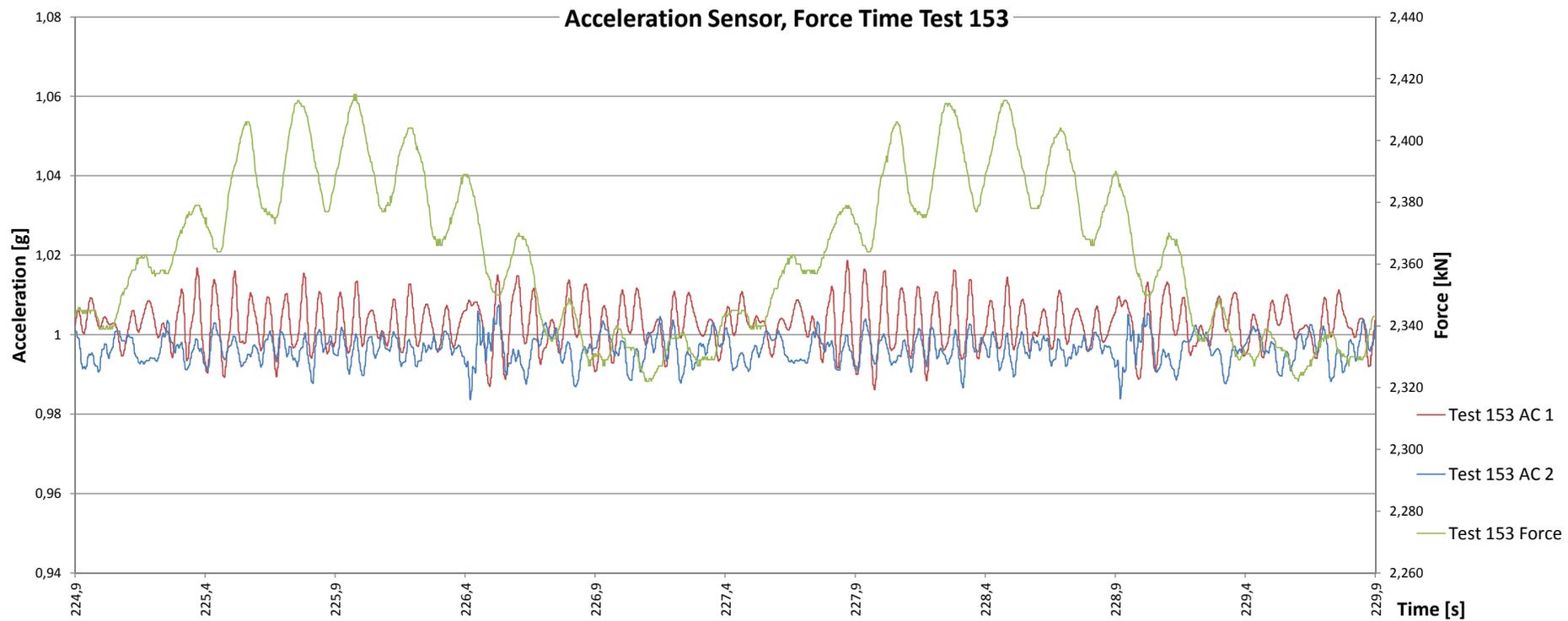


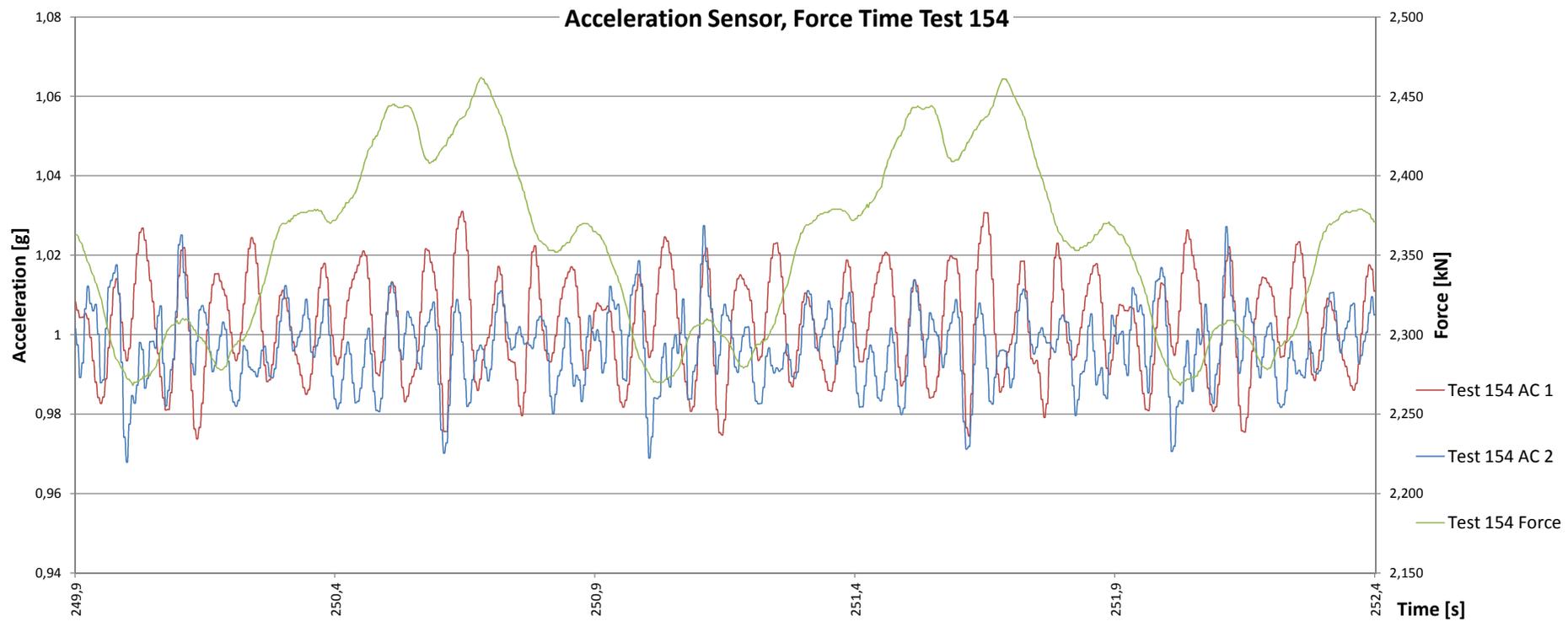
Analyse Force Frequency Test 148 – 150

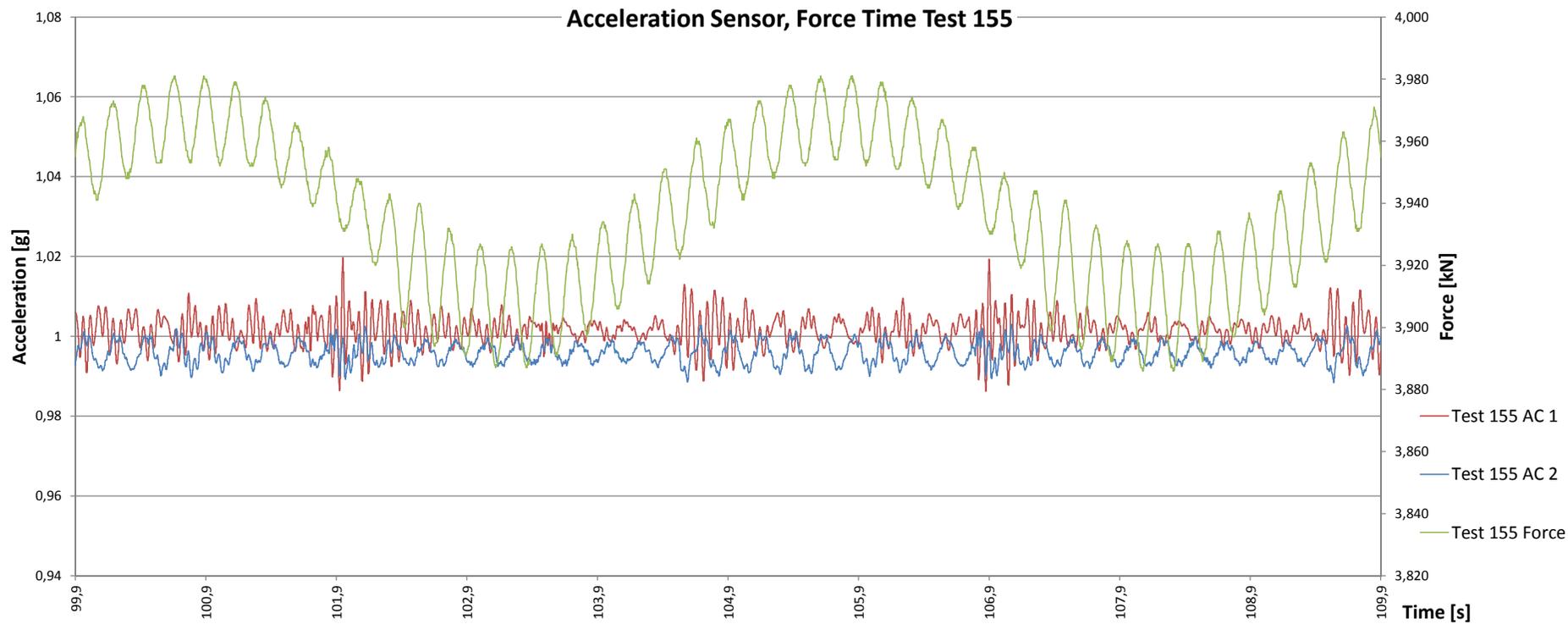


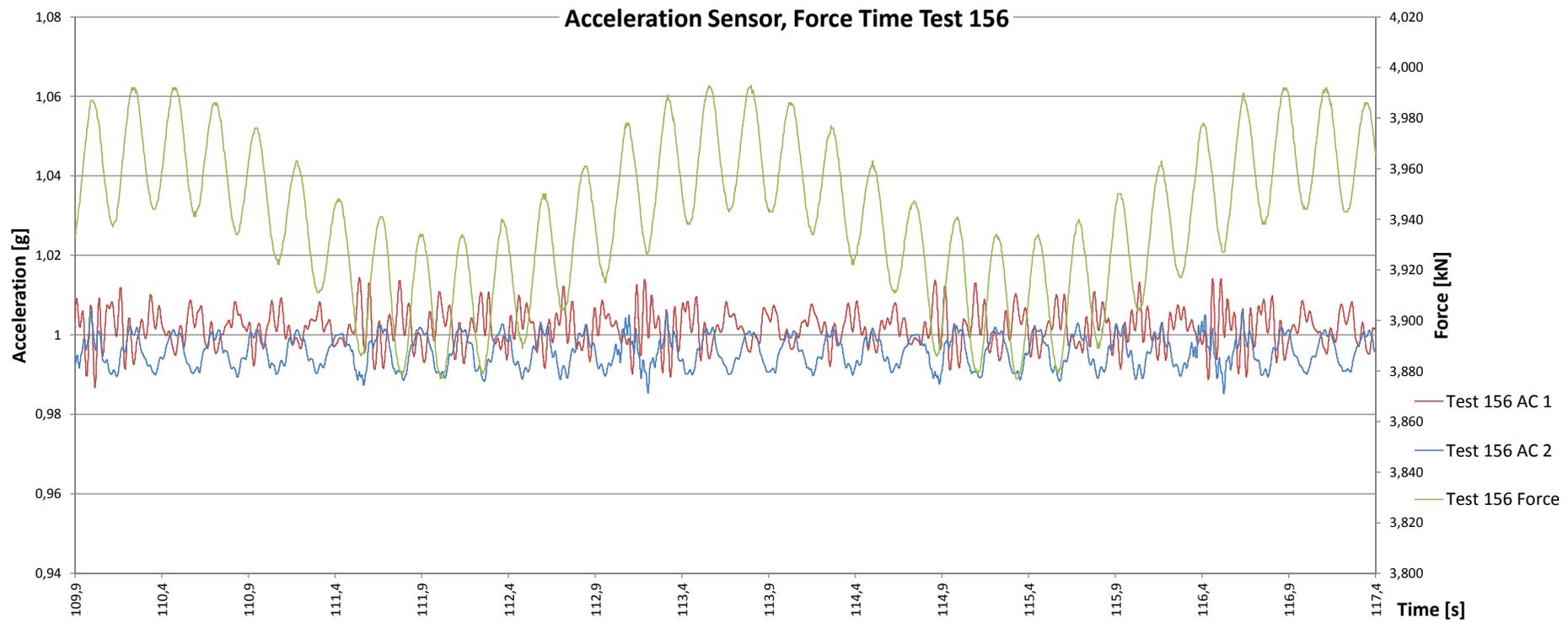


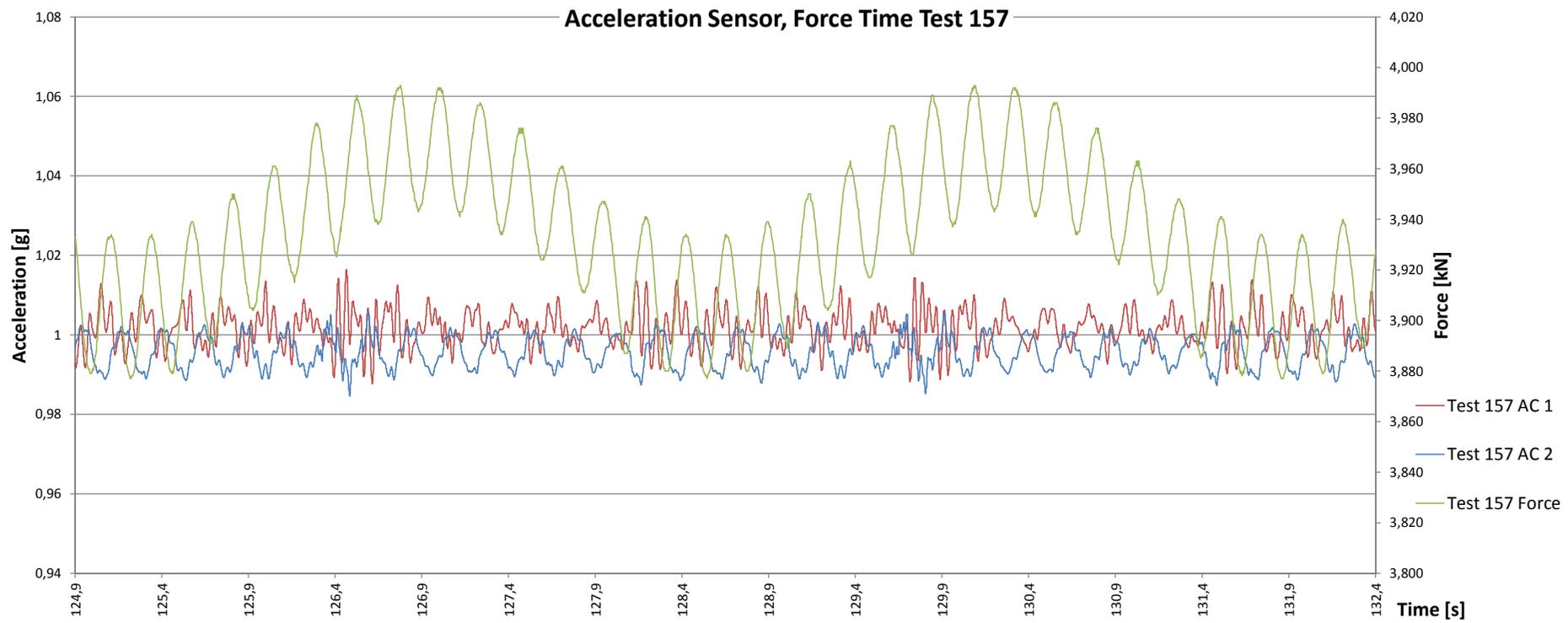


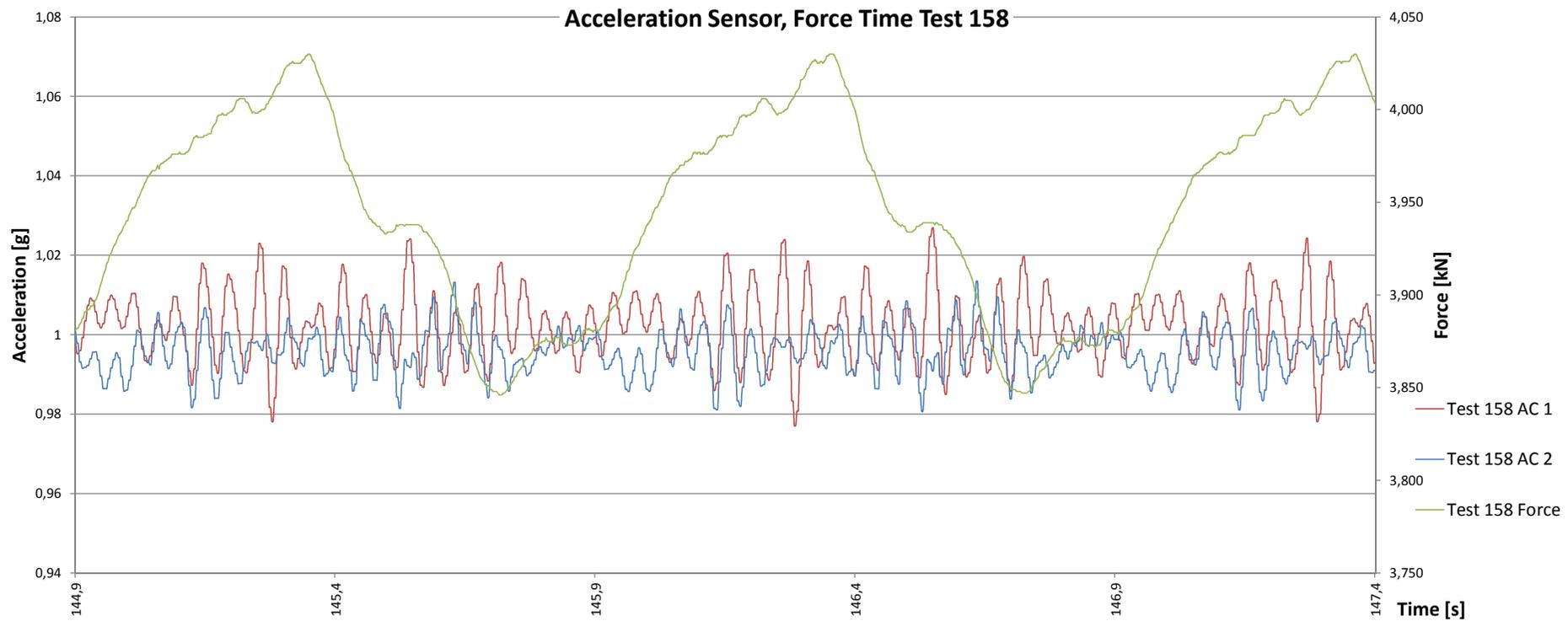


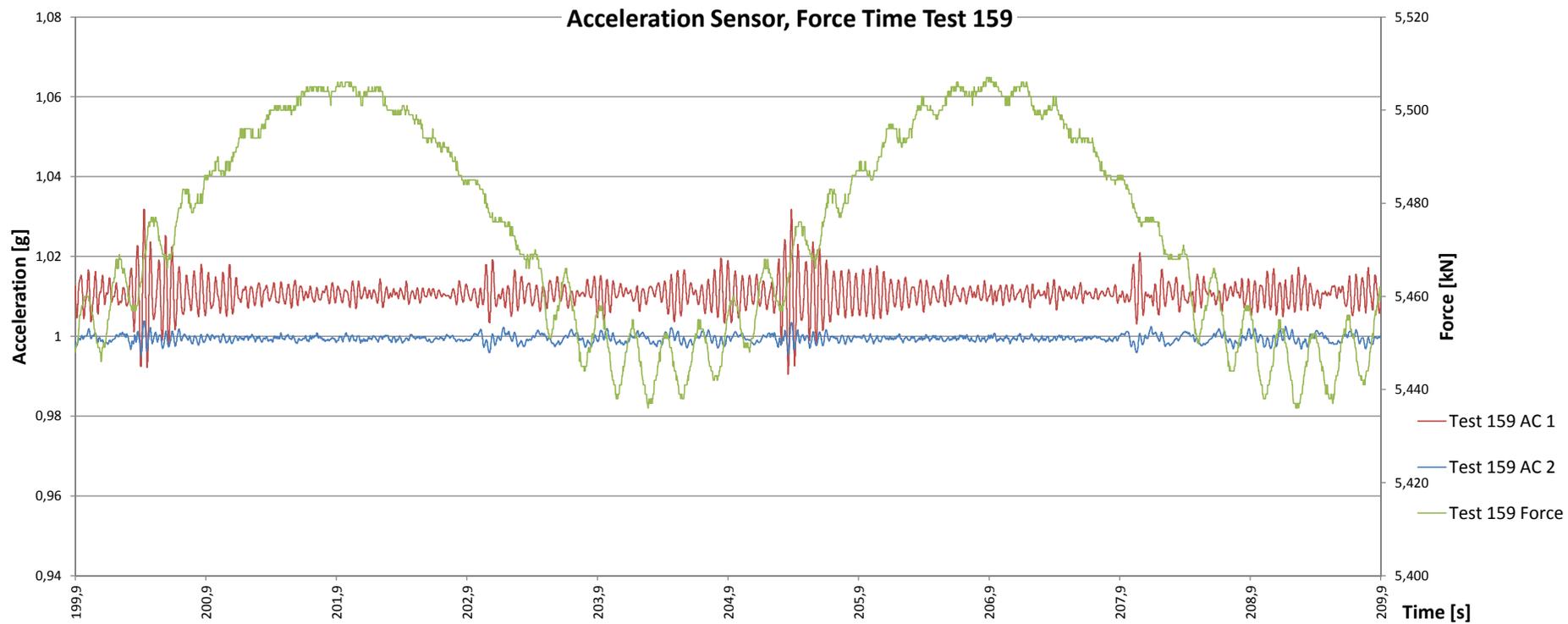


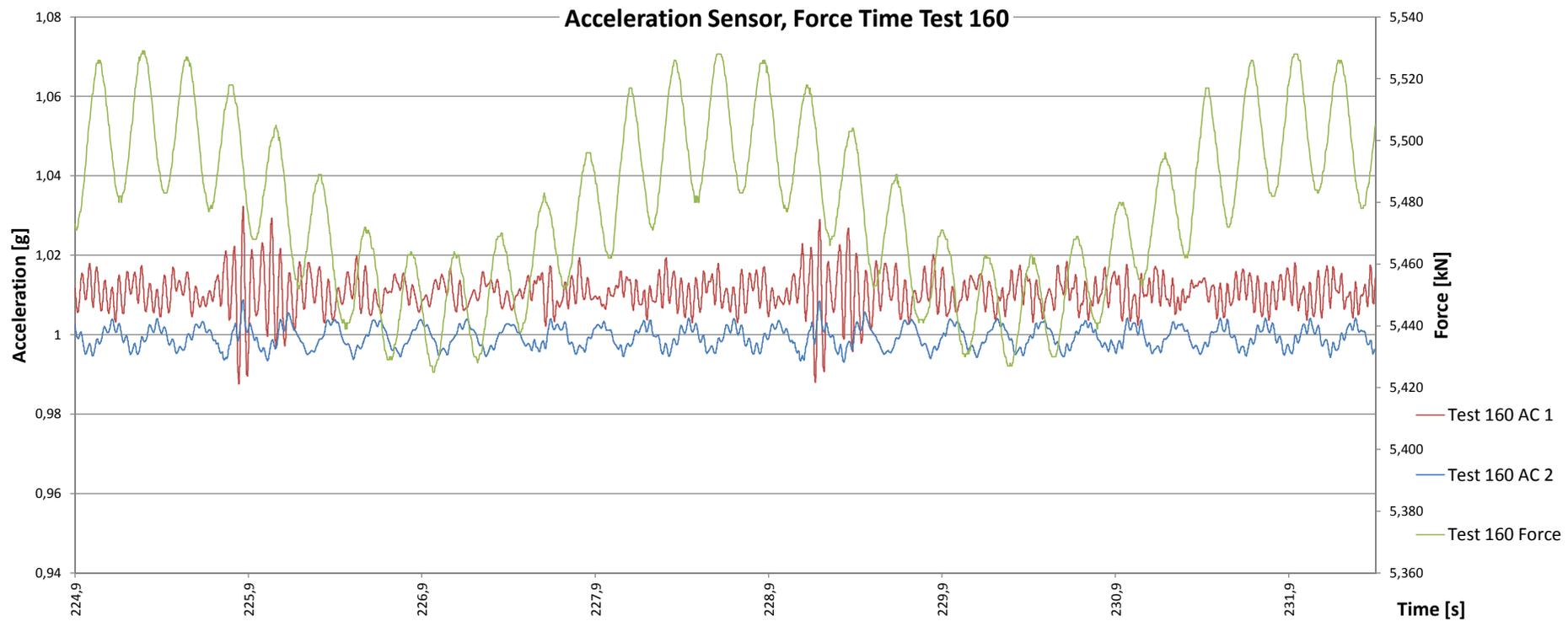


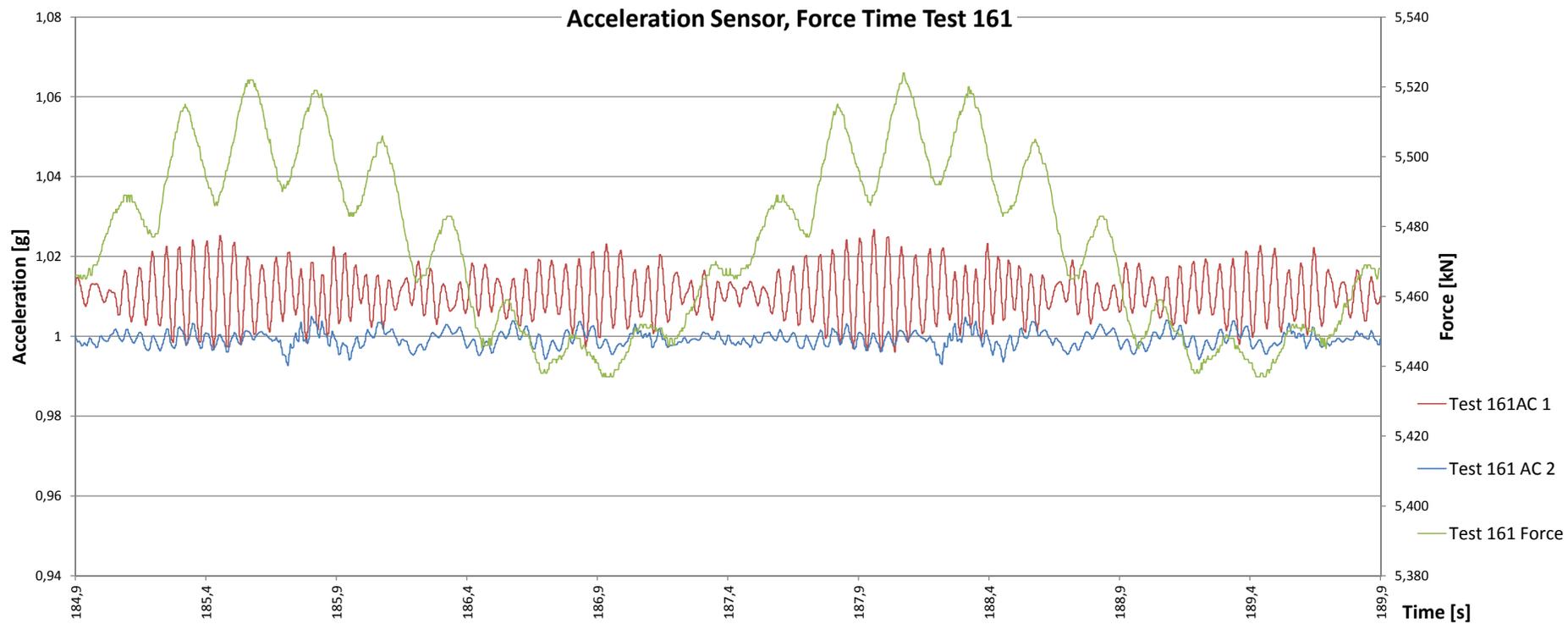


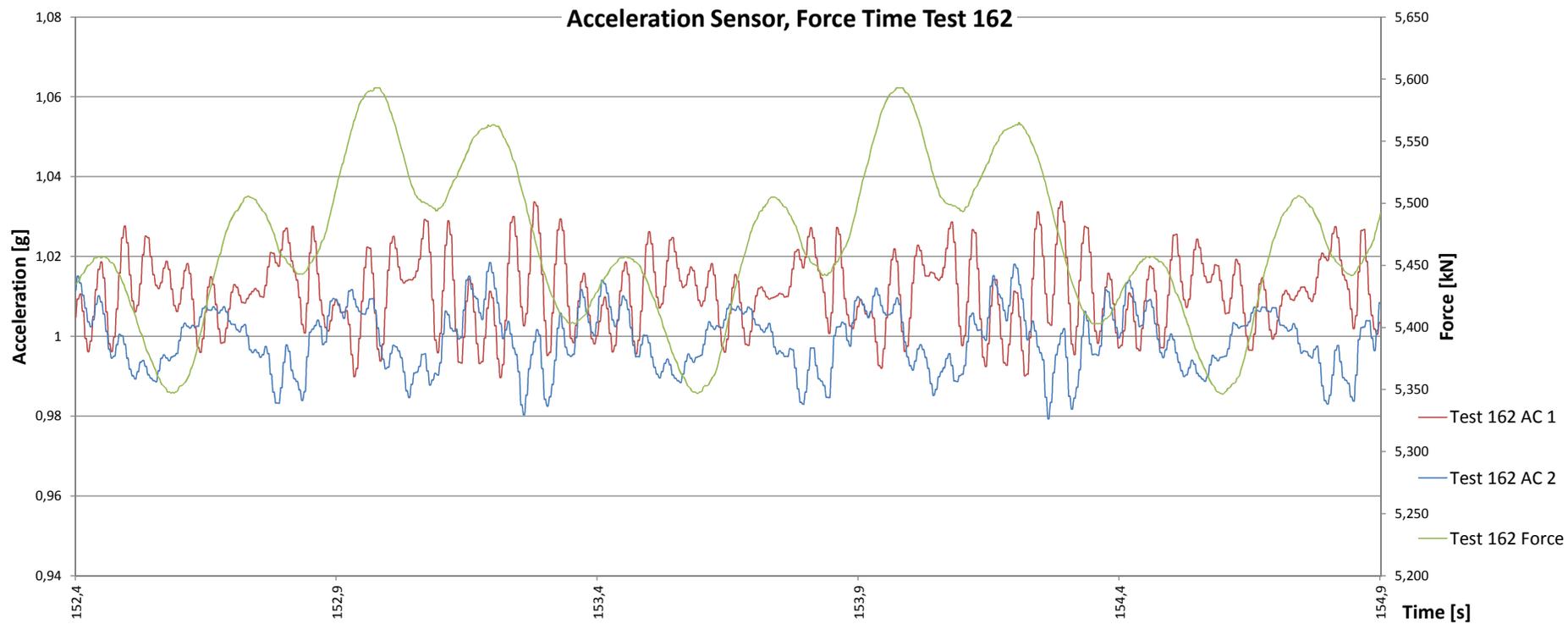


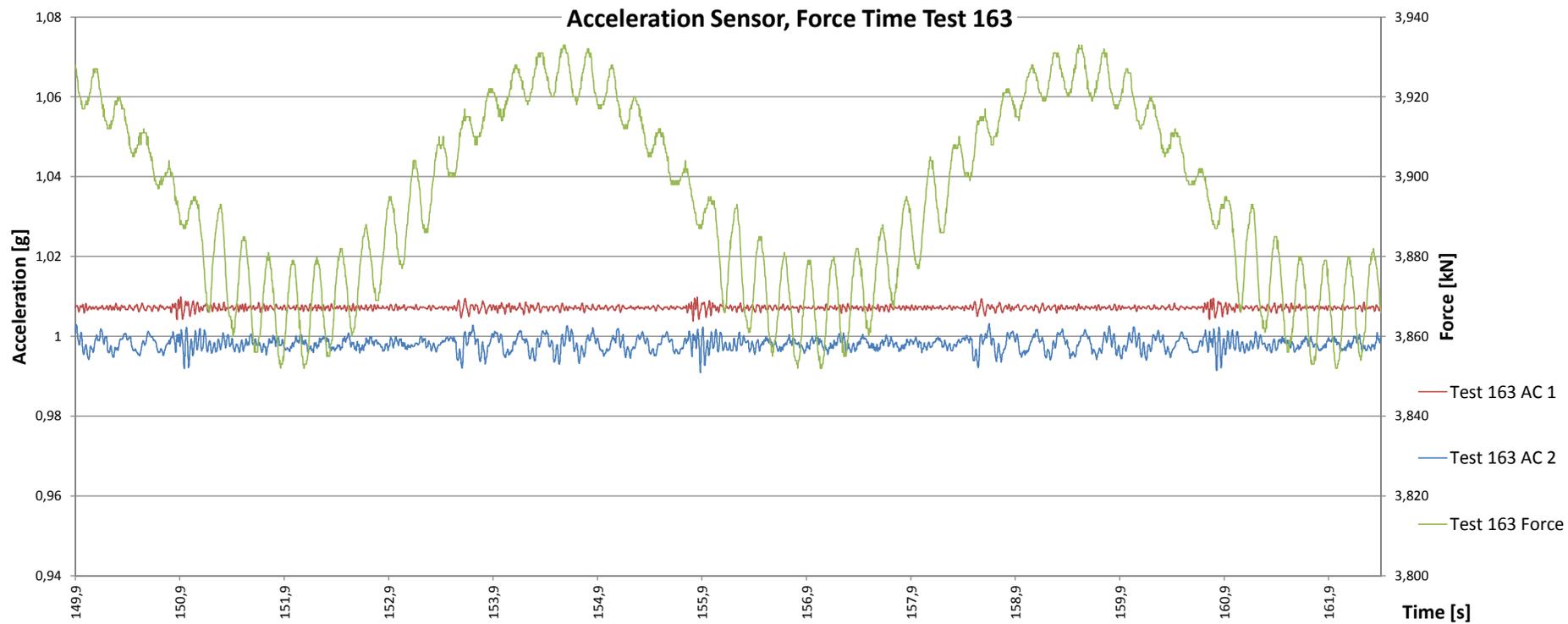


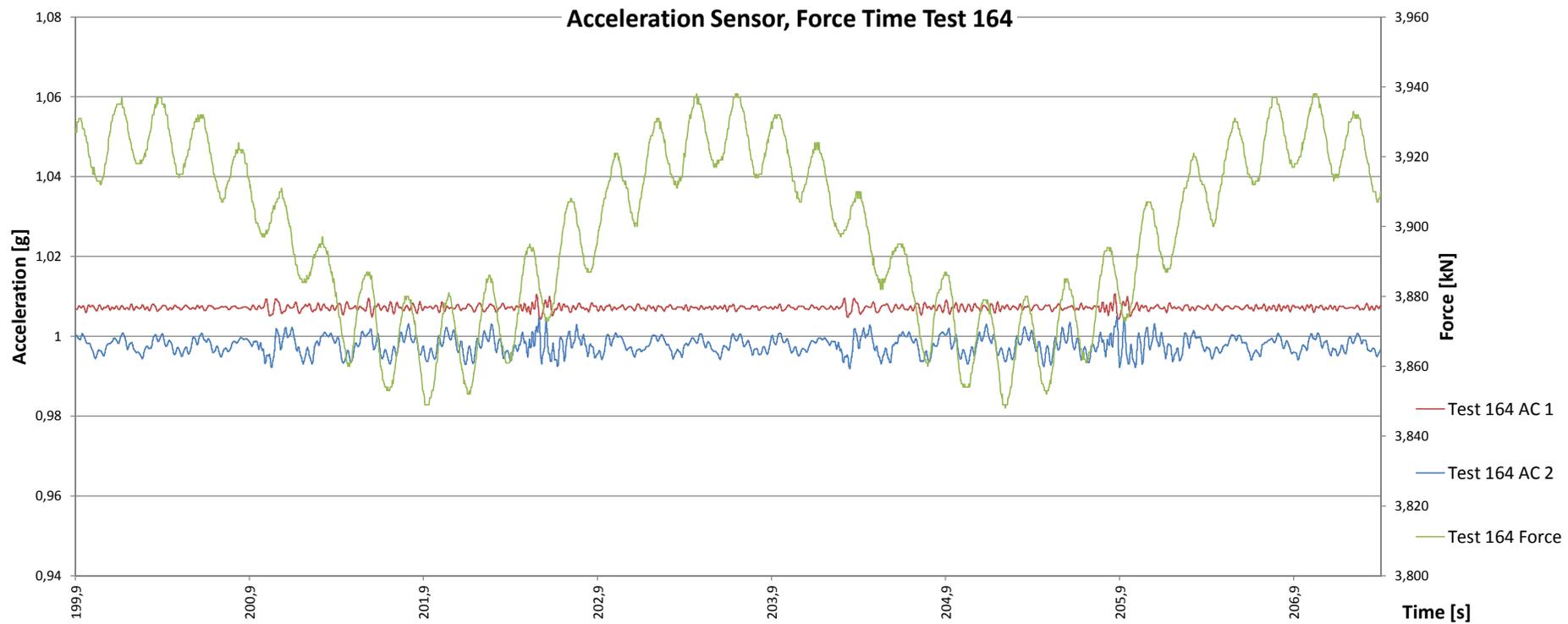


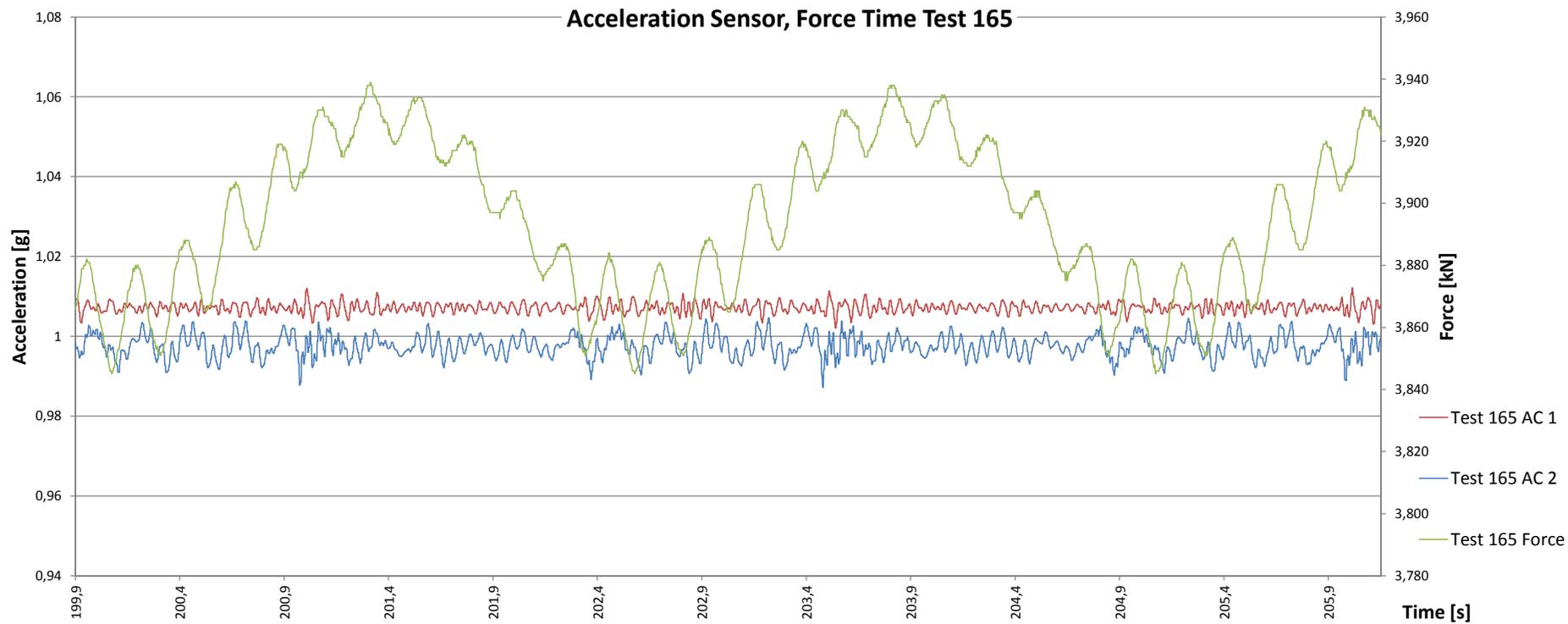


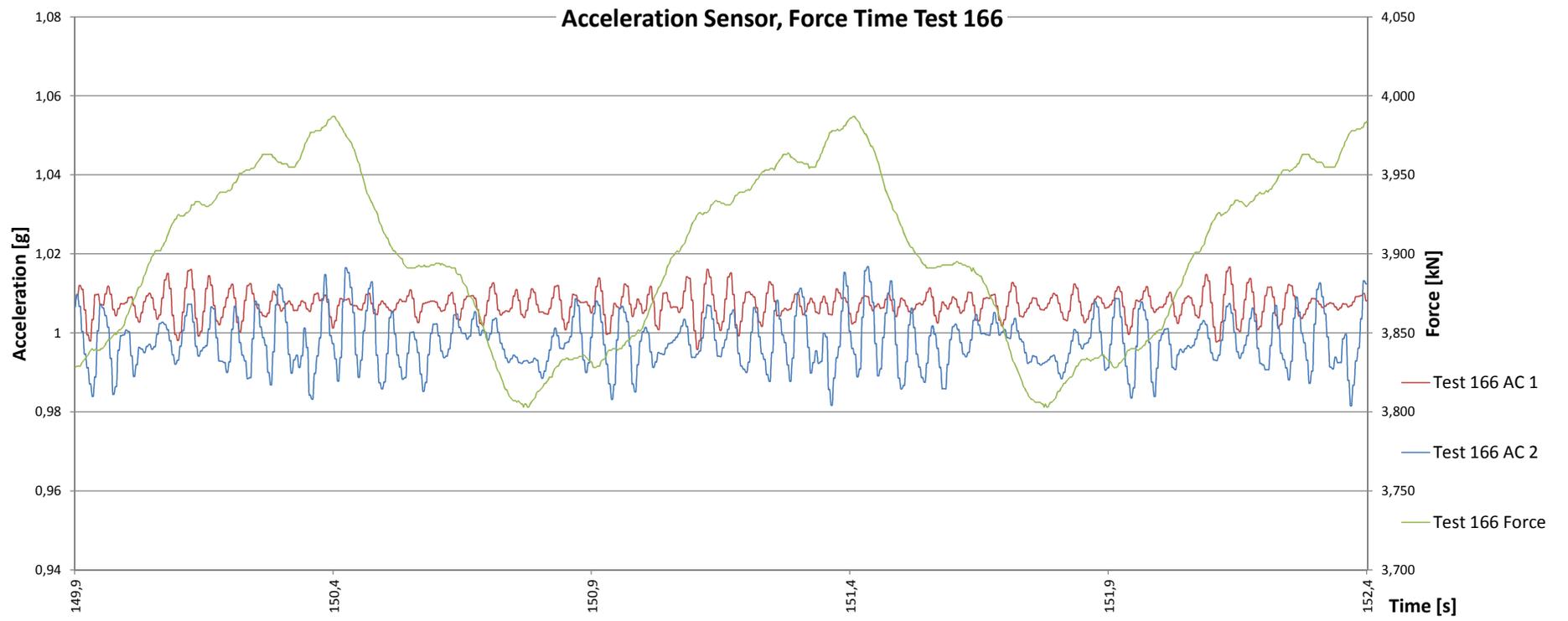


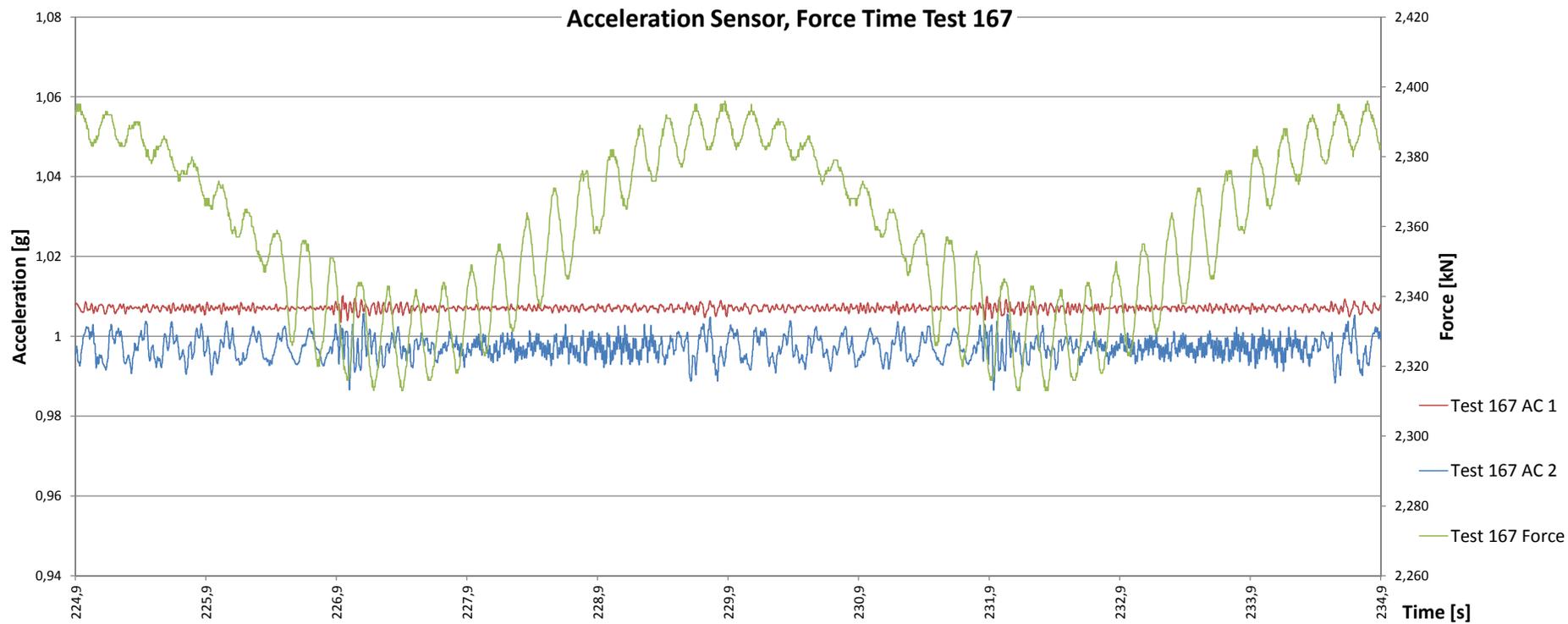


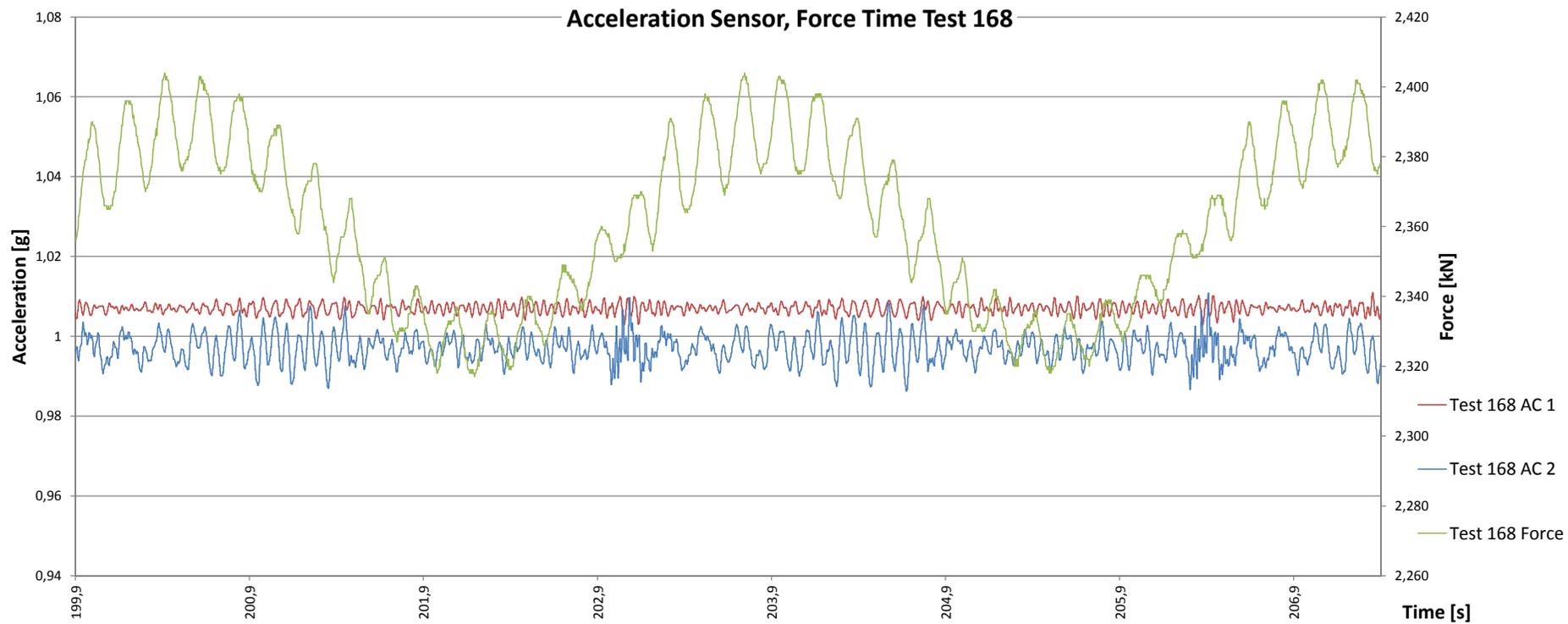


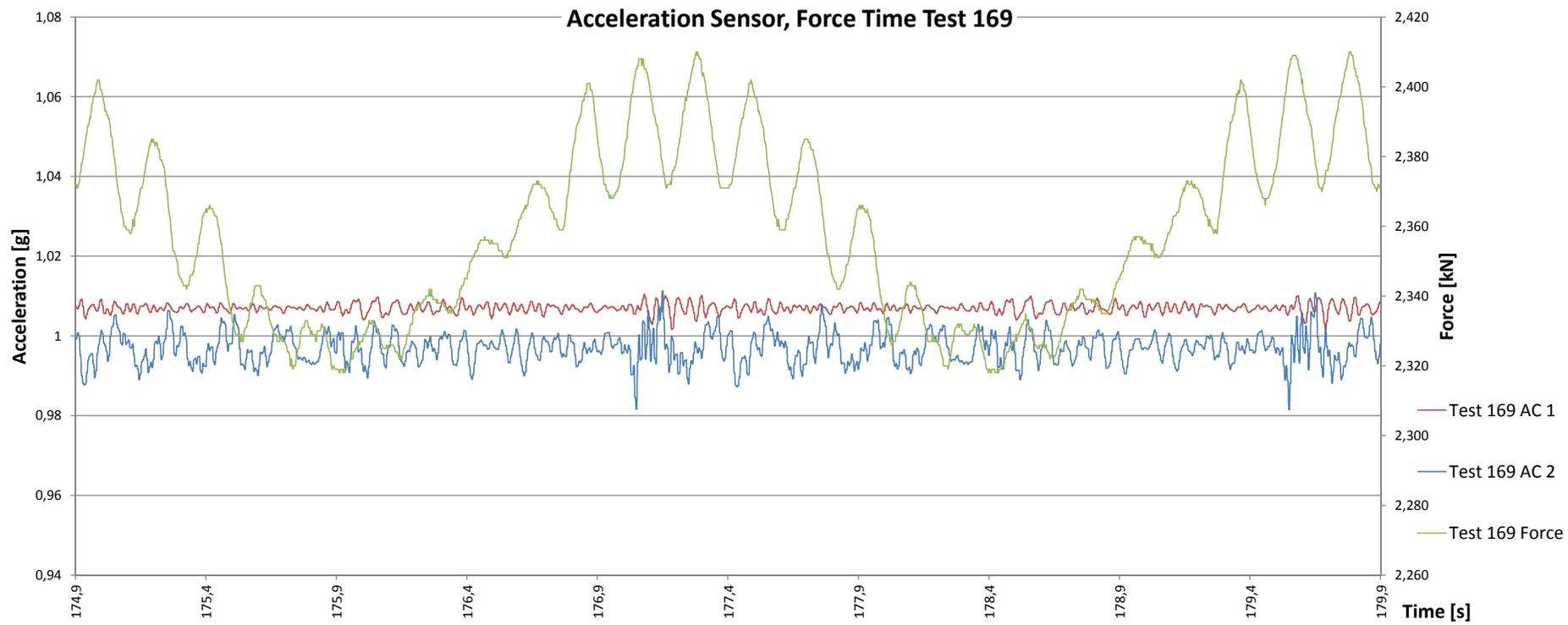


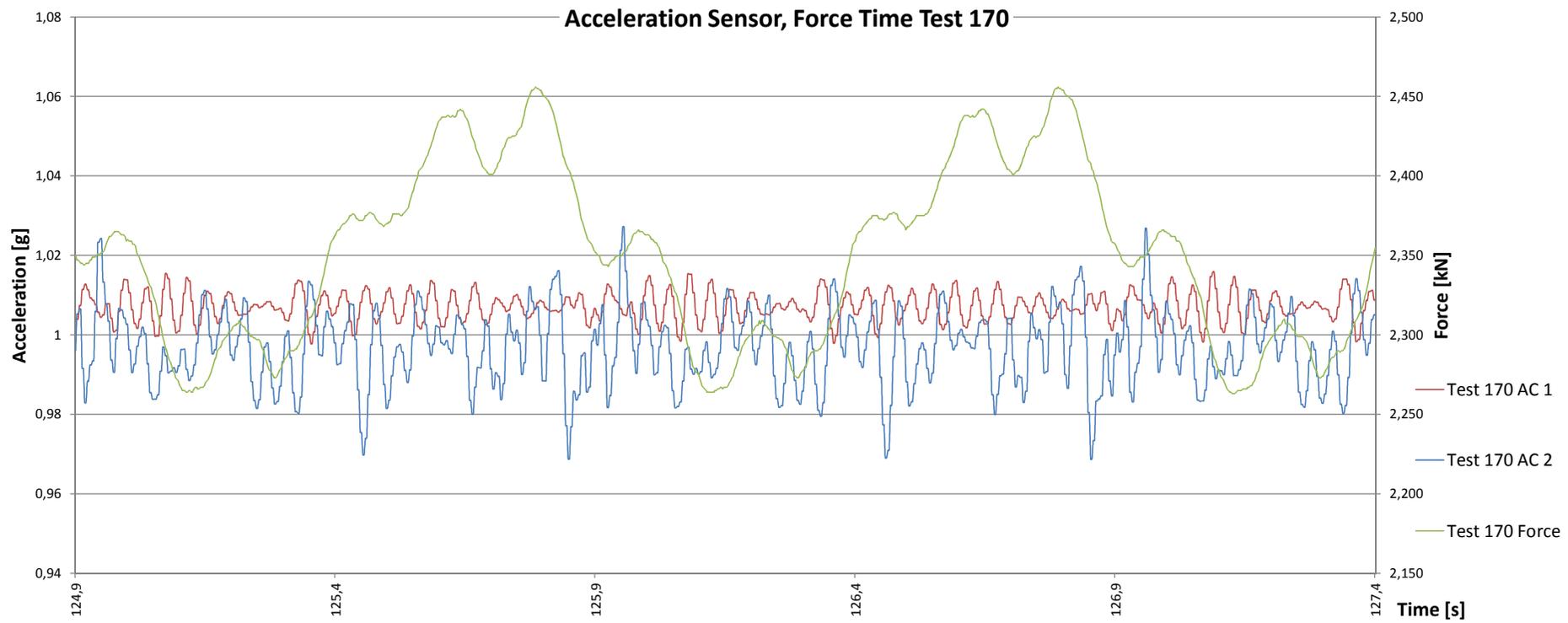


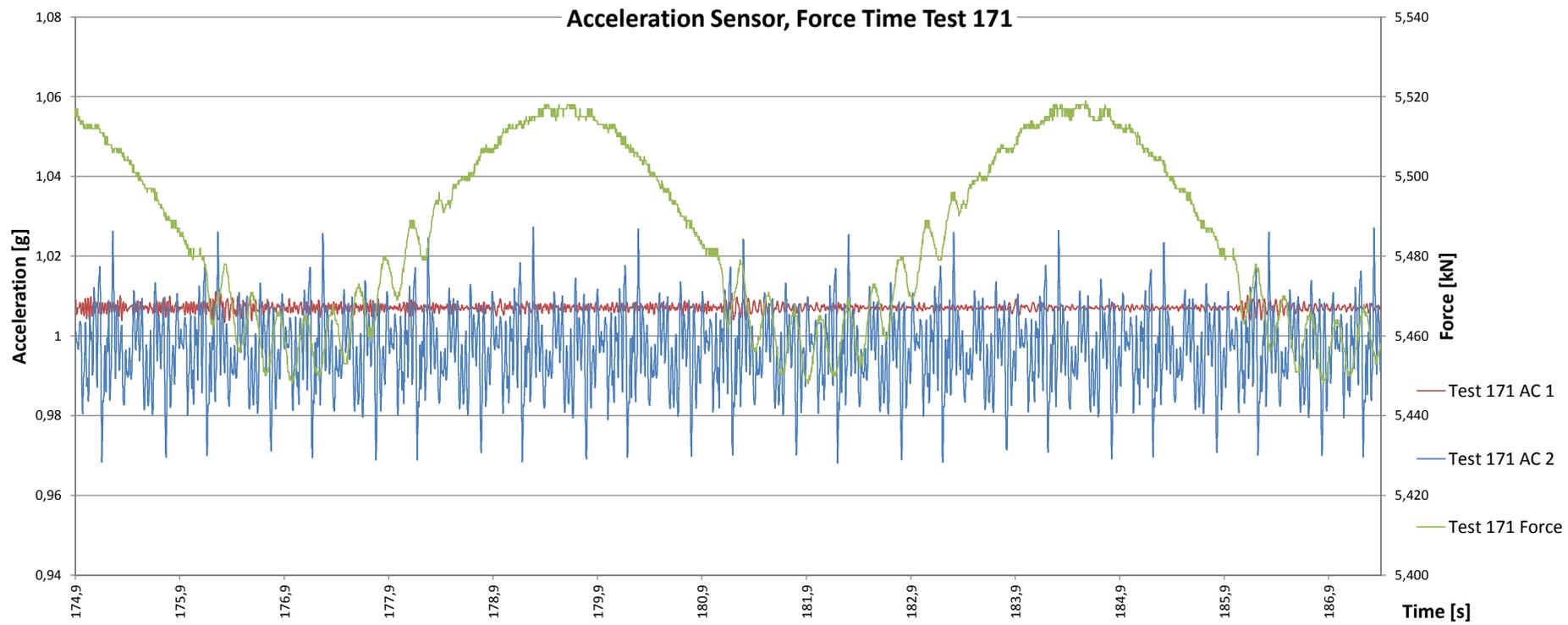


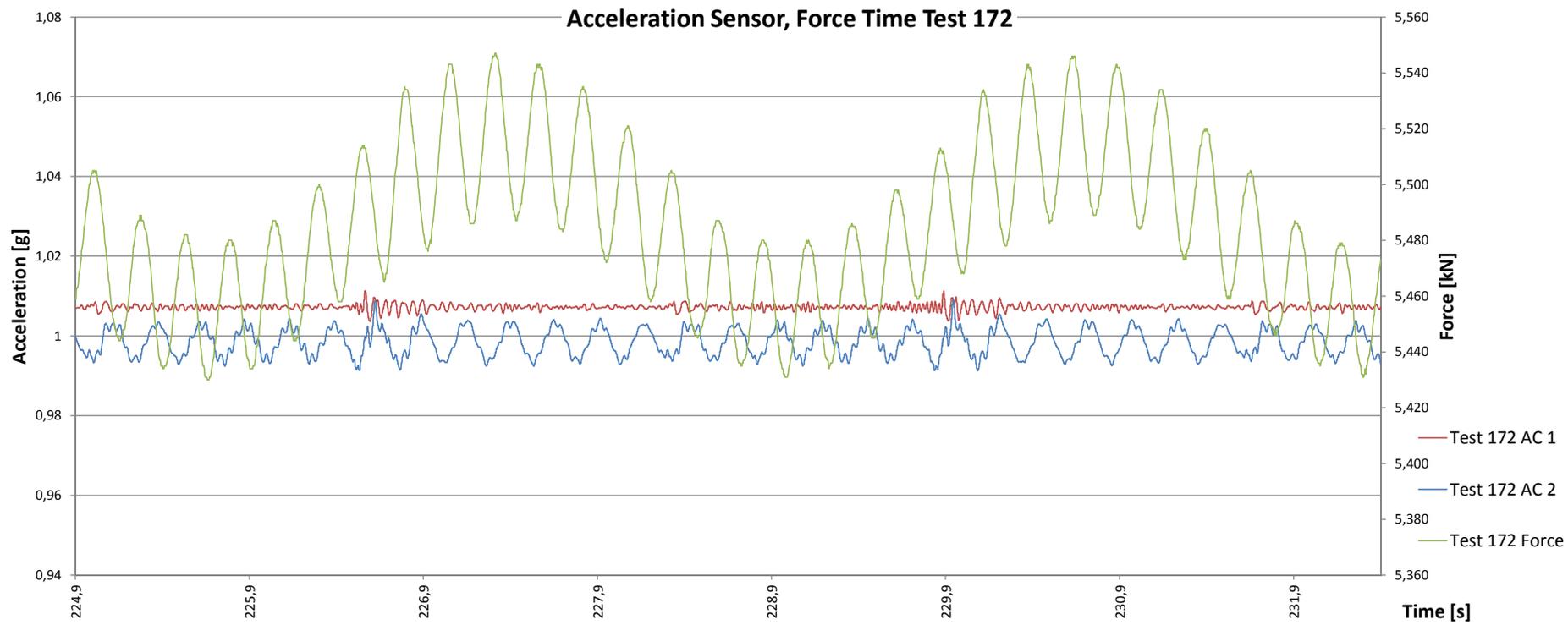


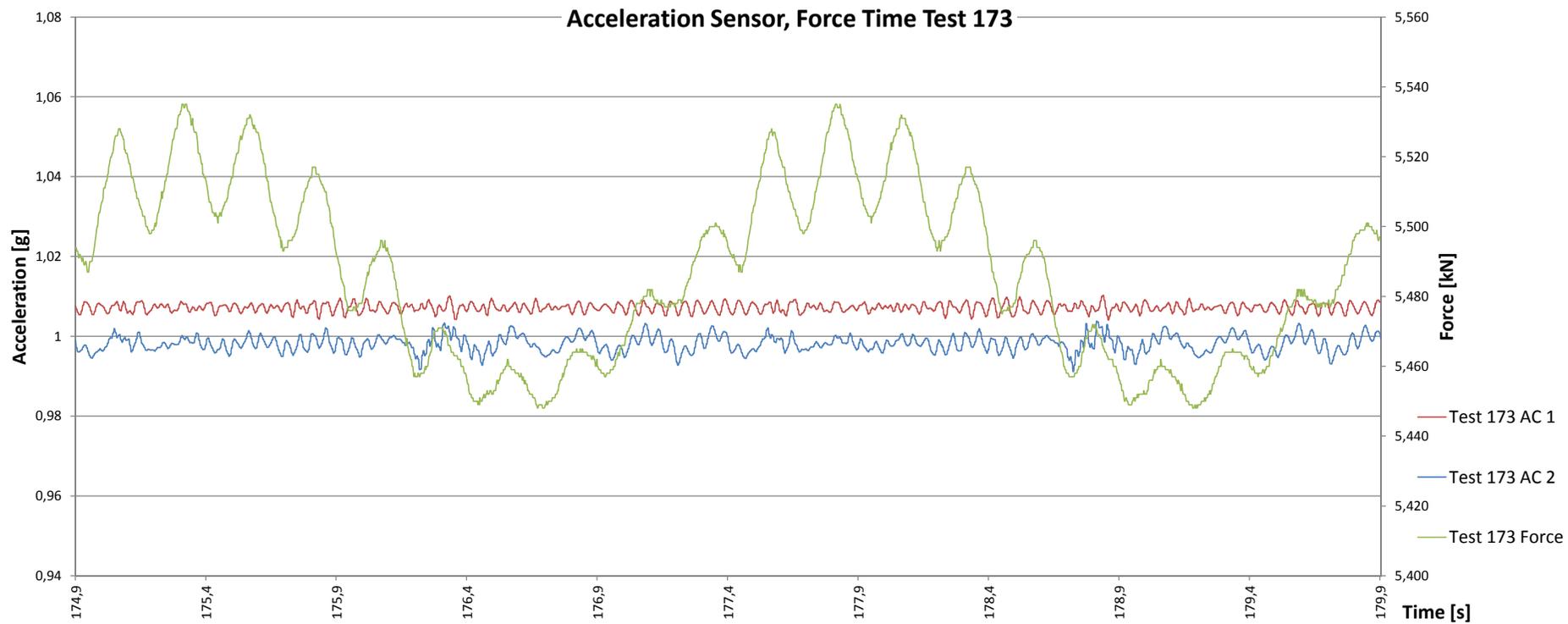


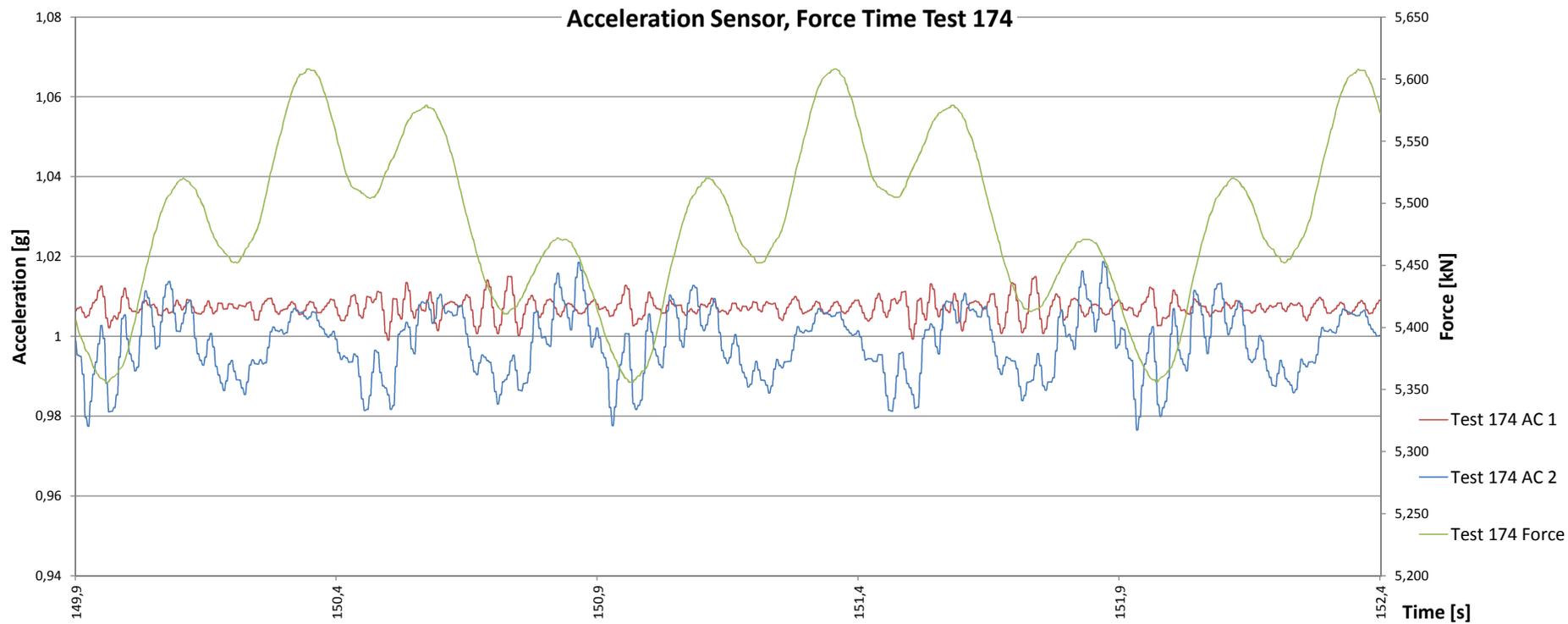


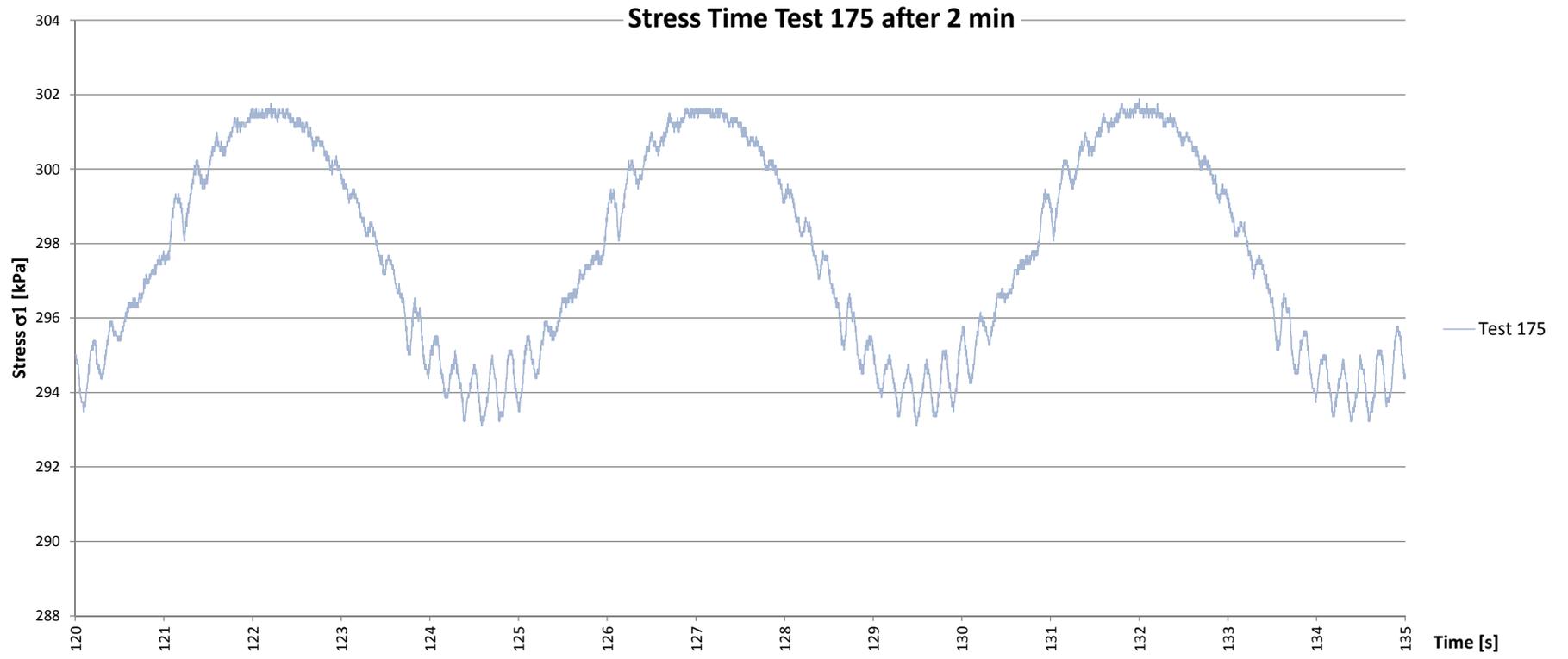




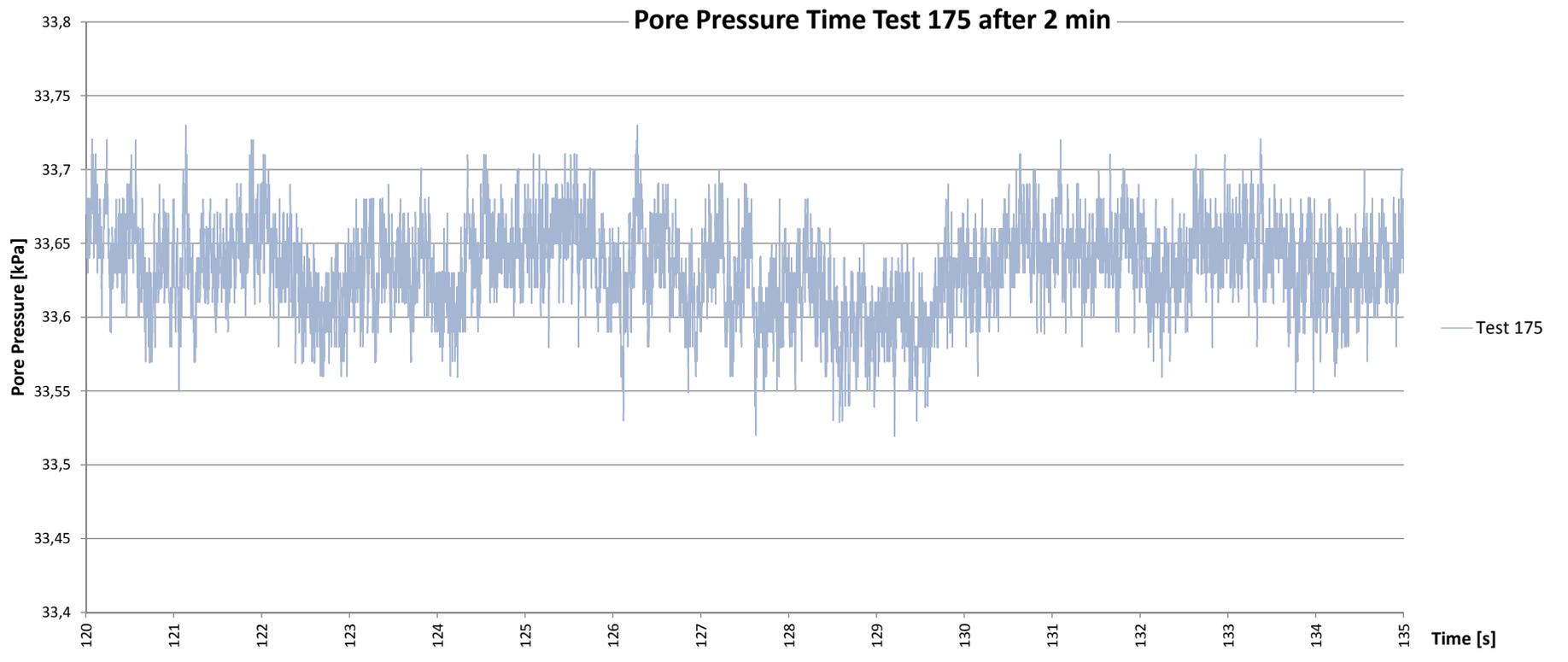


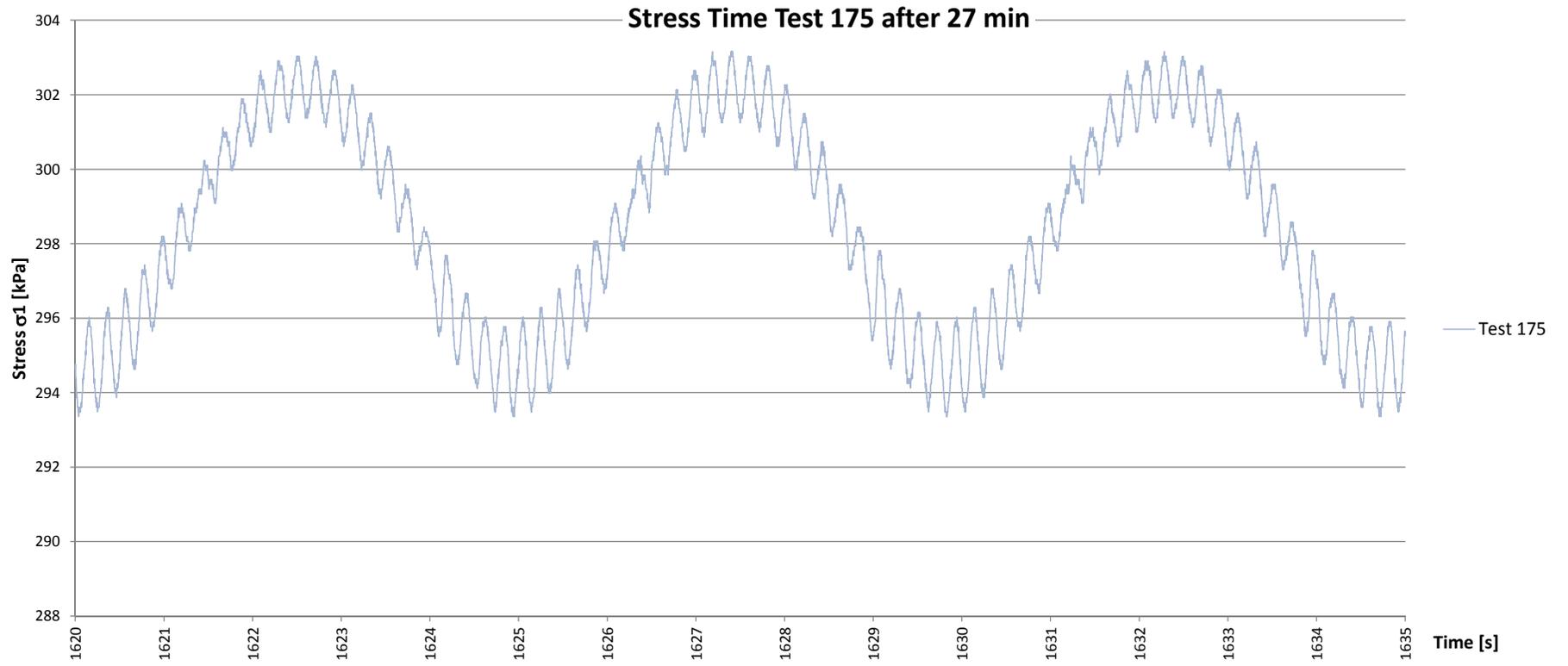


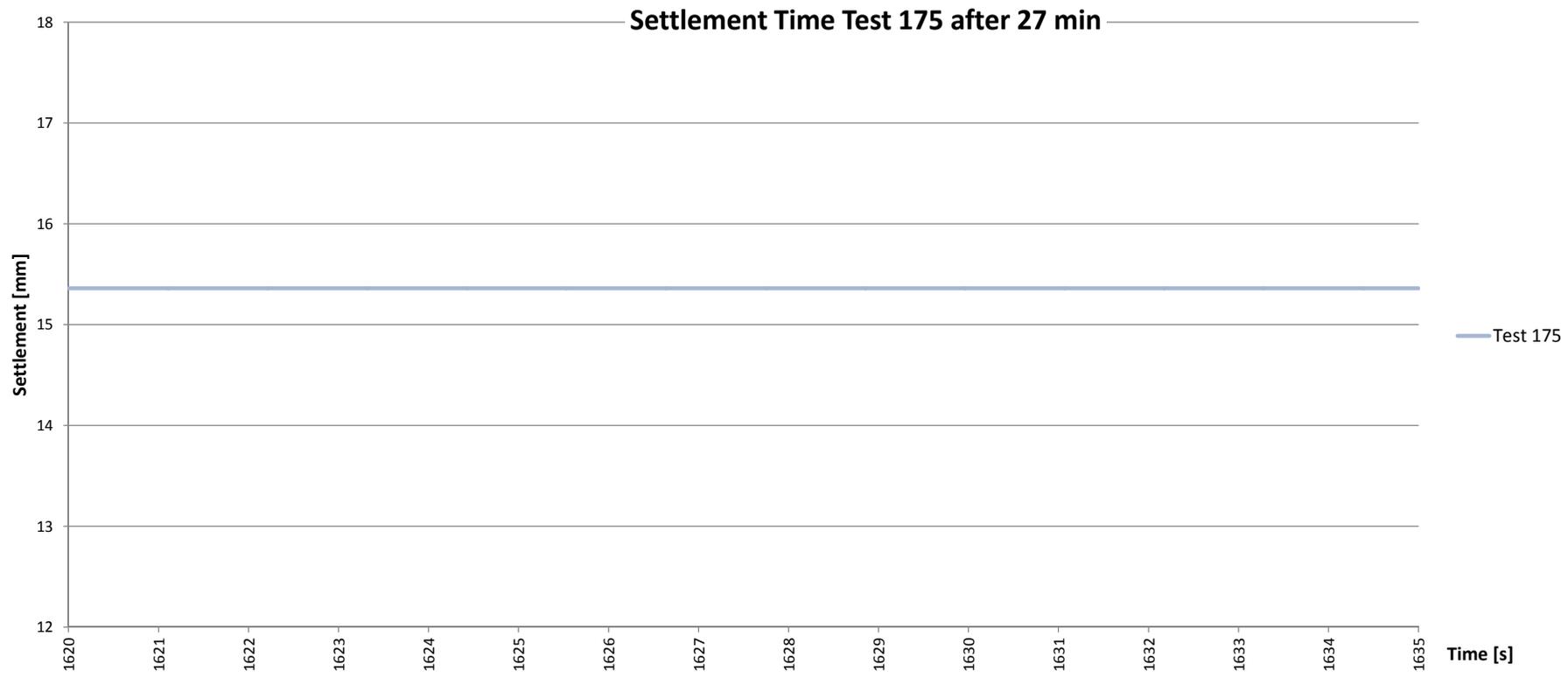


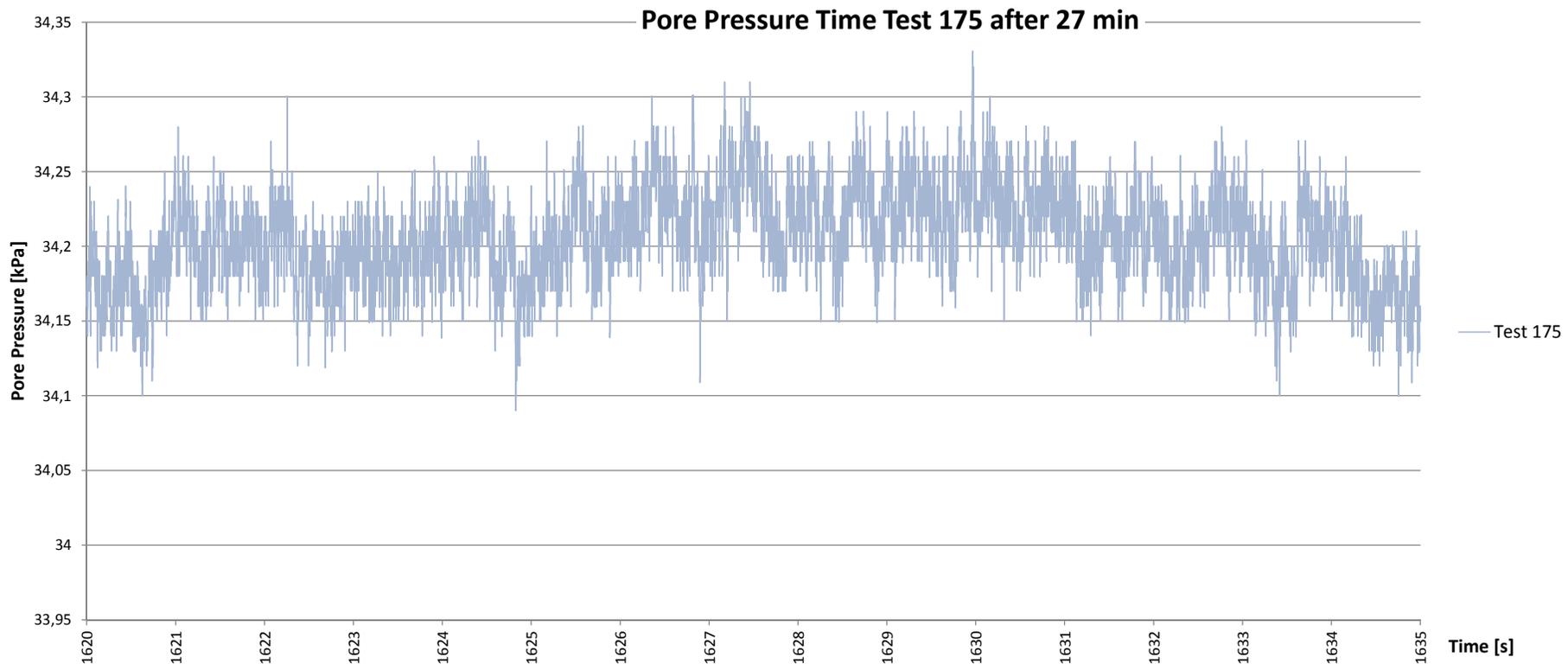


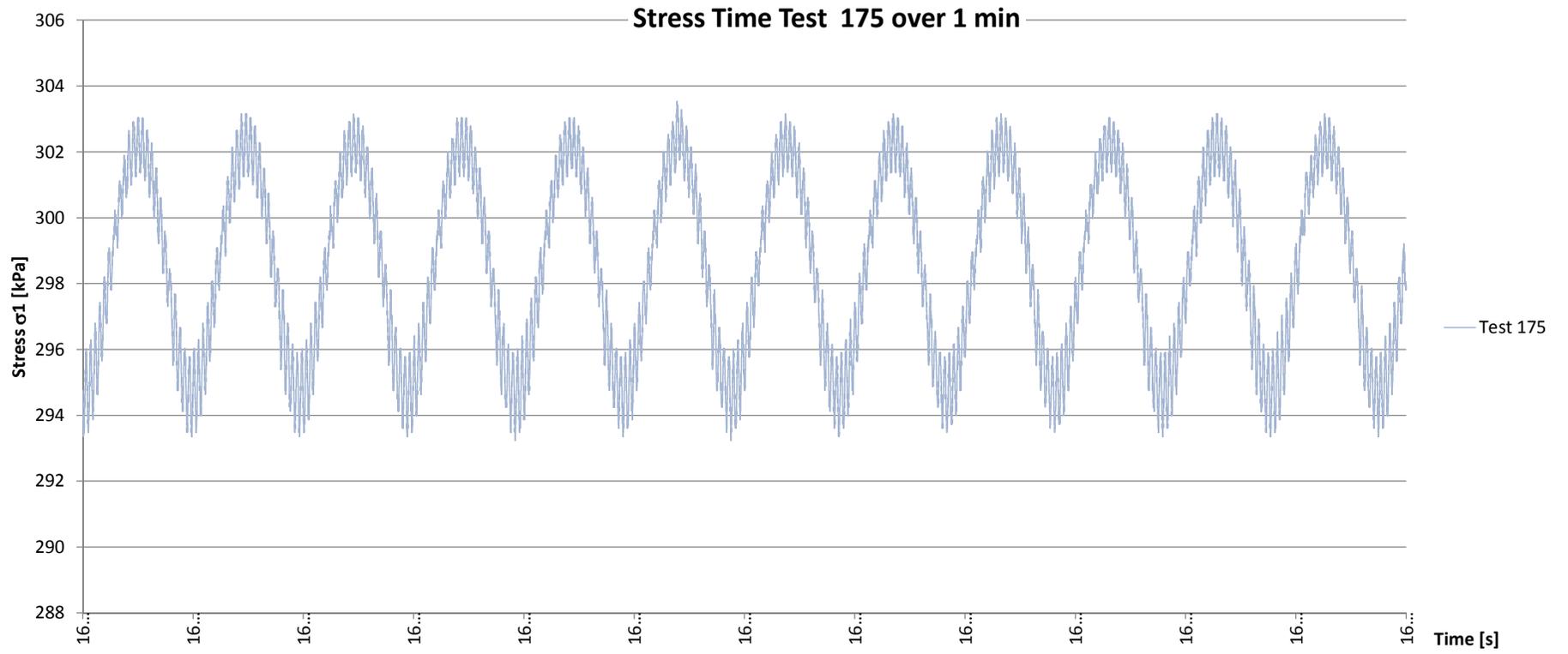


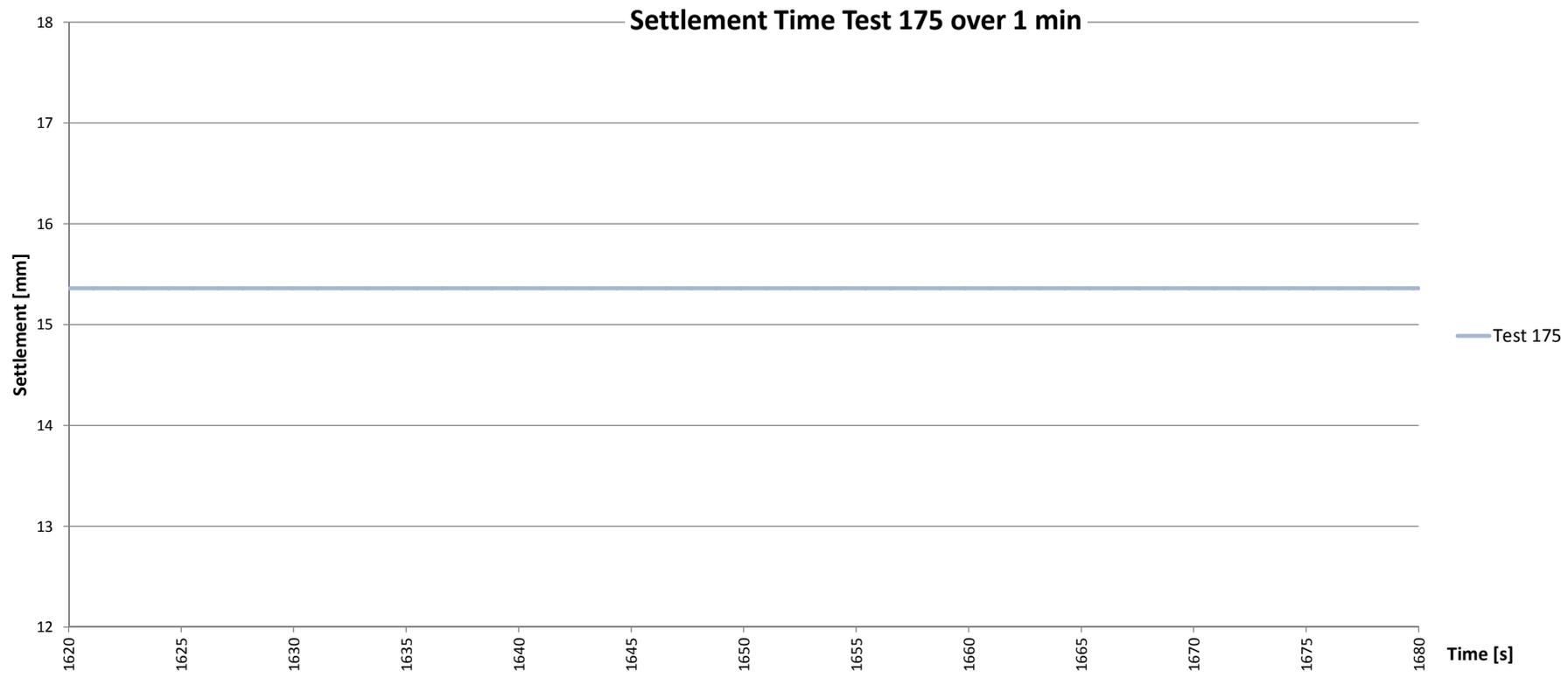


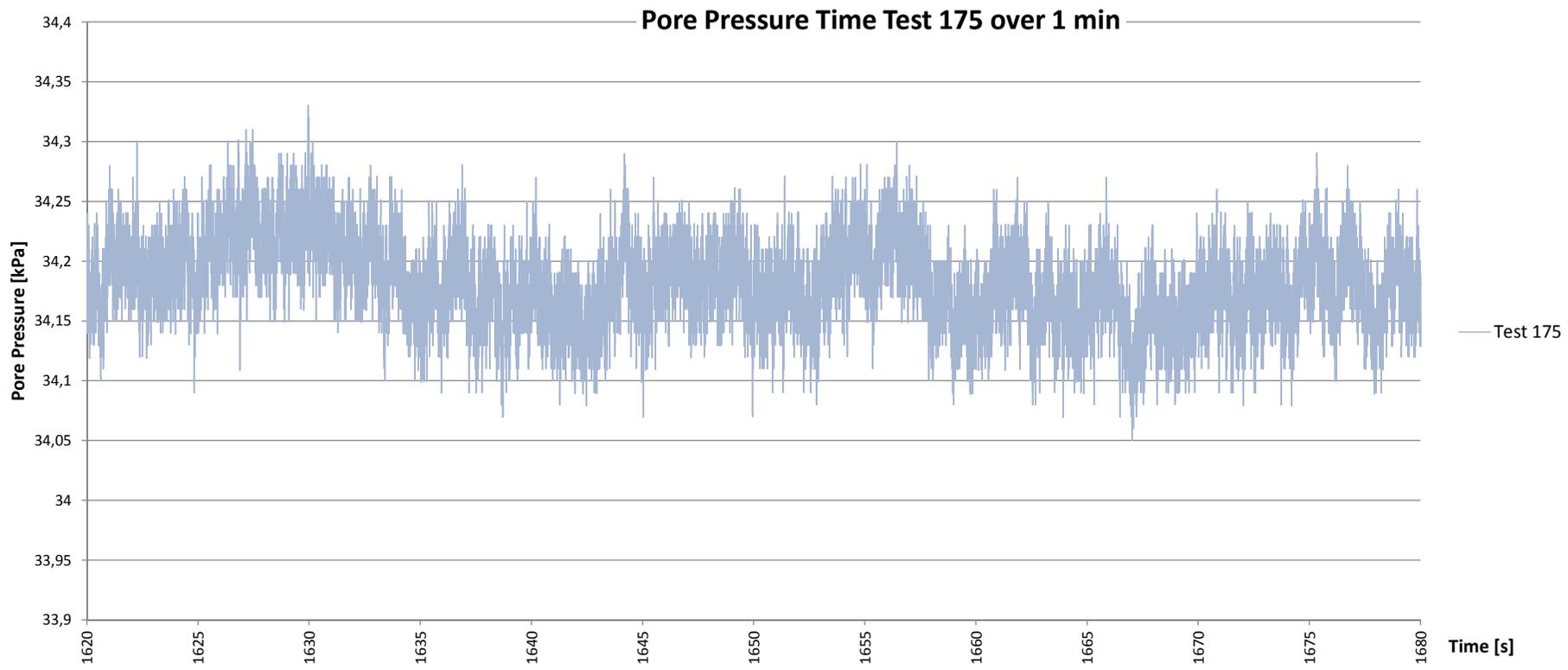












Analyse Force Frequency Test 175

