



Abschlussbericht

DBU-Förderprojekt AZ: 37502/01

ANHANG

Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes

Laufzeit: Januar 2022 bis August 2024 (32 Monate)



*Gründonnerstagsretabel im Dom St. Maria und Korbinian; Domkirchenstiftung Freising
© Diözesammuseum Freising, Foto: Walter Bayer*

München, 28.11.2024

Projektbearbeitung und Gesamtedaktion:

Theresa Hilger (BLfD, Projektleitung)

Julia Brandt (BLfD)

Manuela Hörmann (BLfD)

Kristina Holl (KDWT)

Alex Fröhlich (TUM)

Bezugsmöglichkeit des Berichts:

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege

Abteilung Praktische Bau- und Kunstdenkmalpflege

Referat AV, Restaurierung

Hofgraben 4, 80539 München

Dieser Bericht ist über die Website <https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html> oder unter www.dbu.de und dem Aktenzeichen AZ 37502-01 in elektronischer Form abrufbar.

Anhang

Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte

- 00-Einordnung von Holztafelbildern
- 01-Untersuchungsbericht Holzartenbestimmung P1 bis 13
- 02-Untersuchungsbericht Holzartenbestimmung P12
- 03-Untersuchungsbericht C14-Datierung Untersuchungsbericht
- 04-Untersuchungsbericht Werg
- 05-Untersuchungsbericht Malschichtproben QS-PF1
- 06-Untersuchungsbericht Malschichtproben QS-PF2
- 07-Untersuchungsbericht Malschichtproben QS-PF3
- 08-Untersuchungsbericht Malschichtproben FTIR-ATR
- 09-Untersuchungsbericht Malschichtproben REM-EDX
- 10-Untersuchungsbericht Bindemittel GC-MX

Anhang B: Voruntersuchungen

- 00-Testreihe Notsicherungen
- 01-Anforderungen für den Bau einer Einhausung
- 02-Checklisten für die Begehung und Wartung
- 03- Prüfbericht ARGUK 2022-7913-2

Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring

- 00-Verortung Sensoren
- 01-Sensoranbringung, Versuche an Probekörpern
- 02-Auswahl der Methoden für das Verformungsmonitoring
- 03-Orthofoto der Vorder- und Rückseite

Anhang D: Hygrothermische Simulation

- 00-Herstellung von Probekörpern und verwendete Materialien
- 01-Untersuchungsbericht Hygrothermische Simulation Fraunhofer IBP

Anhang E: Weitere Untersuchungen

- 00-Untersuchungsbericht Luftwechsellmessung
- 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse

00-Auswertung Streifenlichtscans

- Tafelgemälde Rückseite S. 1 – 16
- Tafelgemälde Rechts unten S. 17 – 39
- Tafelgemälde Mitte S. 40 – 62
- Freising verschiedene Probekörper S. 63 - 85
- Klimakammertests S 86 – 217

01-Hygrothermische Simulation [Wasserdampfdurchlässigkeit HoFM 070]

02-Hygrothermische Simulation [Wasserdampfdurchlässigkeit HoFM 071]

03-Hygrothermische Simulation [Wasserdampfdurchlässigkeit HoFM 072]

04-Untersuchungsbericht Luftströmungsmessung und Thermografie

05-Untersuchungsbericht Luftwechsellmessung Einhausung

Anhang G: Lösungsansätze

00-Stand des Wissens und der Technik

Anhang H: Publikation und Öffentlichkeitsarbeit

00-Handlungsleitfaden

Sowie online, unter: <https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html> [Stand Oktober 2024].

Anhang I: Material- und Geräteliste

00-Material- und Geräteliste

Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte 00-Einordnung von Holztafelbildern nach Ekelund et al. (2017a)

Eine Hilfestellung für die Einordnung bedeutender Parameter zur Bestimmung und Beurteilung liefern z. B. Ekelund et al. (2017a, S. 8), wobei Holztafelbilder in die Gruppen Konstruktion, Material, Geschichte und Zustand unterteilt werden. Diese Strukturierung wurde für die folgende Tabelle übersetzt und z. T. ergänzt:

KONSTRUKTION	Konstruktionskategorie	Frei bewegliche Bretter Bretter mit Gradleisten Bretter mit Parkettierung Gemischt
	Orientierung	Vertikal Horizontal Gemischt
	Richtung der Holzmaserung	Radial Tangential Gemischt
	Brettanzahl	1 bis _____
	Originales Format	Verkleinerung Vergrößerung Dünnung
	Originale Dicke	Ja Nein
	Eingespannt («Restrained»)	Ja Nein
	Abgeschrägte Ecken	Ja Nein
	Rahmen	Ja Nein
MATERIAL	Maximale Breite	Gesamtbreite Brettbreiten
	Maximale Höhe	Gesamthöhe Bretthöhe
	Maximale Brettdicke	In mm / cm
	Originale Holzart	Nadelholz Laubholz Nicht bekannt
	Konische Bretter	Ja Nein Nicht bekannt
	Astlöcher	Ja Nein Nicht bekannt
	Splintholzbereiche	Ja Nein Nicht bekannt
	Jahrringe pro mm	Einzelbretter Nicht bekannt
	Rückseitenbeschichtung	Bindemittel Rückseitenschutz Nicht bekannt
	Bildseitenbeschichtung	Kaschierung Bindemittel Grundierungen Malmittel Firnis(se) Nicht bekannt
ZUSTAND	Offene Fugen zwischen Brettern	Ja Nein
	Risse im Träger	Ja Nein
	Deformationen aus der Ebene heraus	Ja Nein
	Fraßschäden	Ja Nein
	Verluste	Keine Kleinere

		Größere
		In mm
	Schrumpfung	Nein
		Nicht bekannt
	Abgeriebene- / aufstehende- / Haar-Risse	Ja
	Nein	
Kittungen	Ja	
	Nein	
Retuschen / Übermalungen	Ja	
	Nein	
GESCHICHTE	Alter	Datierung
		Produktionszeit
		Nicht bekannt
	Herkunft(sgeschichte)	Beschreibung / Nicht bekannt
	Standort (Geschichte)	Beschreibung / Nicht bekannt
	Historische Aufnahmen	Ja
		Nein
	Nicht bekannt	
Vorhergehende Restaurierungsmaßnahmen	Ja	
	Nein	
	Nicht bekannt	

Literatur:

Ekelund, Stina, Van Duin, Paul, Jorissen, J., Ankersmit, B., Groves, R. M. (2017a). A Method for Studying Climate-related Changes in the Condition of Decorated Wooden Panels. In: Studies in Conservation, DOI: 10.1080/00393630.2017.1325553.

Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte 01-Untersuchungsbericht Holzartenbestimmung BLfD

Anlass und Fragestellung

Zur Bestimmung der Holzart der Tafelbretter, des Rahmens, des Schnitzwerkes, der Gratleisten und der nachträglich eingefügten Schwalbenschwanzverbindung in der Tafelmitte wurden Proben der Trägermaterialien entnommen.

Methode

Die Proben werden nach der Anfertigung von Vorzustandsfotos der Entnahmestelle mit dem Skalpell / einer Rasierklinge / einem Stecheisen Proben entnommen. Anschließend werden Endzustandsfotos der Entnahmestelle angefertigt und die Proben für eine Woche in einem Gemisch aus Glycerin und Wasser (1:1) eingelegt. Es werden dann möglichst dünne Schnitte der drei Schnittrichtungen (Tangential- Radial und Querschnitt) mit dem Skalpell oder einer Rasierklinge abgetragen. Die einzelnen Schnitte werden auf einen Tropfen des Glycerin-Wasser-Gemisches auf einem Objektträger gelegt und mit einem Deckgläschen abgedeckt. Die Betrachtung erfolgt unter Durchlicht mit dem Mikroskop. Alle Schnittrichtungen und die Bestimmung der einzelnen Merkmale werden nach Möglichkeit fotografisch und schriftlich dokumentiert. Die Bestimmung nach mikroskopischen Strukturmerkmalen wurde anhand Grosser (1977)¹ durchgeführt und anhand der besten Übereinstimmung mit Hölzern der jeweiligen botanischen Gattung interpretiert.

Alle Proben und ihre Analyse werden zudem in einzelnen Protokollen schriftlich und fotografisch dokumentiert; diese sind am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege archiviert und können bei Bedarf zur Einsicht angefragt werden.

Geräteinformationen

Der Objektträger mit Probe wird mit dem Mikroskop Axiophot der Firma Zeiss, ausgestattet mit visuellem Licht² und verschiedenen Objektiven (5x 0.5HD, 10x 0.30HD, 20x 0.50HD, 50x) im Durchlicht betrachtet. Die Aufnahmen werden mit der Kamera AxioCam MRc5 und dem Computerprogramm AxioVision SE64 Rel. 4.9 angefertigt.

Folgende Abkürzungen werden bei der Beschreibung und Interpretation verwendet:

UV = ultraviolette Strahlung BP450-490nm (Filtersatz 15) | VIS = visuelles Licht | HF = Hellfeld | DF = Dunkelfeld | XPL = gekreuzte Polarisatoren | PPL = parallele Polarisatoren.

¹ Grosser, Dietger. (1977). Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

² Halogenlampe 12V / 100W. Die UV-Strahlung (Kompaktlichtquelle HPX 120-UV²) wird hier nicht benötigt.

Probennummer	P 1 – Schnitzwerk
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Judith Regensburger
Bearbeiterinnen	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	19.05.2022

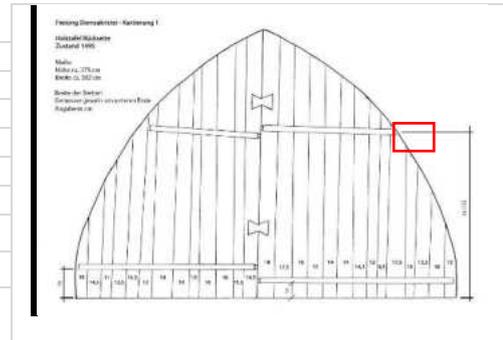
Beste Übereinstimmung: *Tilia spec.* = **LINDE** [TILIACEAE]



Vorderseite: BLfD, Giorgia Petta (2022)

Probennummer	P 2 – Rahmenleiste Rückseite rechts
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Judith Regensburger
Bearbeiterinnen	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	19.05.2022

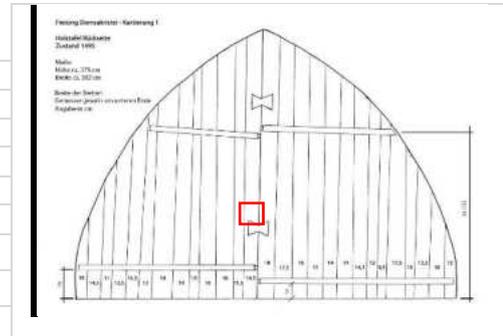
Beste Übereinstimmung: *Picea spec.* = **FICHTE** [PINACEAE]
ODER *Abies spec.* = **TANNE** [PINACEAE]



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 3 – Holztafel Rückseite rechts, Zustoß
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Judith Regensburger
Bearbeiterinnen	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	19.05.2022

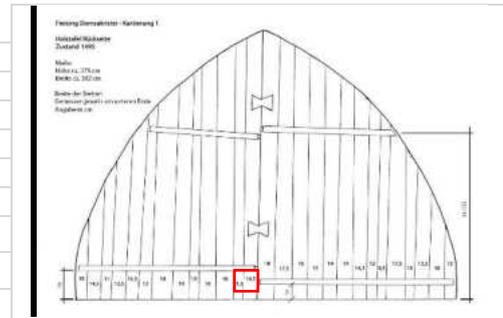
Beste Übereinstimmung: *Picea spec.* = **FICHTE** [PINACEAE]



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 4 – Holztafel Rückseite links, Zustoß
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Judith Regensburger
Bearbeiterinnen	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	19.05.2022

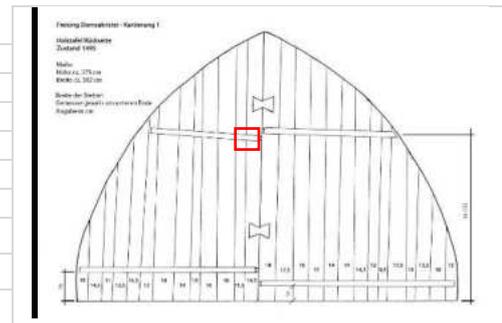
Beste Übereinstimmung: *Picea spec.* = **FICHTE** [PINACEAE]



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 6 – Gratleiste links oben
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Judith Regensburger
BearbeiterInnen	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	19.05.2022

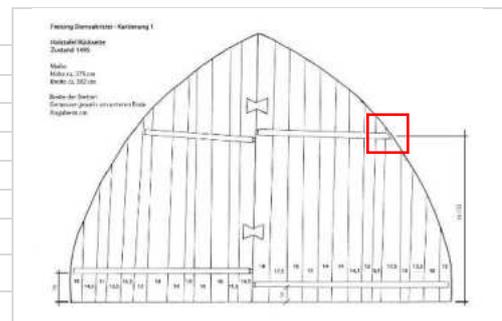
Beste Übereinstimmung: *Abies spec.* = **TANNE** [PINACEAE]



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 8 – Gratleiste rechts oben
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Vanessa Klee
BearbeiterIn	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	August 2022

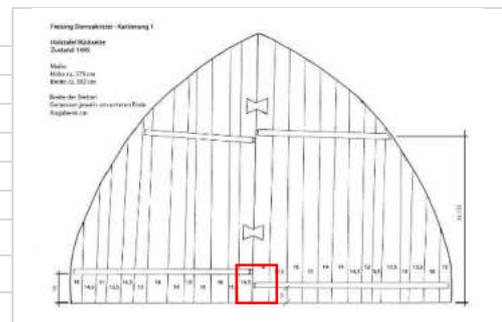
Beste Übereinstimmung: *Abies spec.* = **TANNE** [PINACEAE]



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 9 – Gratleiste rechts unten
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Theresa Hilger
BearbeiterIn	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	August 2022

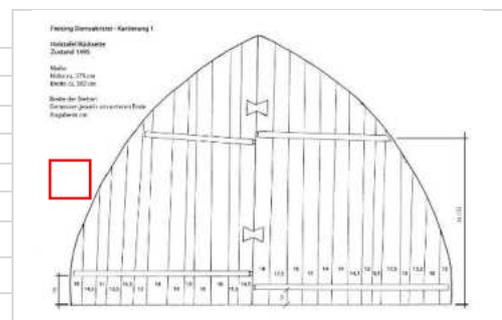
Beste Übereinstimmung: *Picea spec.* = **FICHTE** [PINACEAE]



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

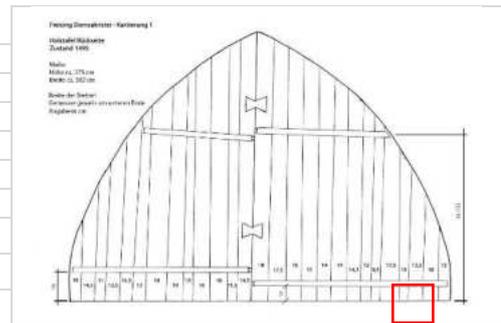
Probennummer	P10 – Rahmen links, 2. Teil von unten
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Theresa Hilger
BearbeiterIn	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	August 2022

Beste Übereinstimmung: *Picea spec.* = **FICHTE** [PINACEAE]



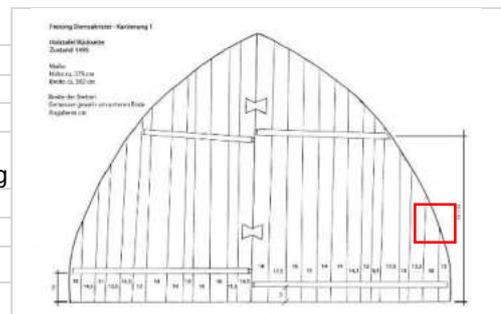
Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 11 – Rahmen Rückbrett rechts unten
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Theresa Hilger
BearbeiterIn	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	August 2022
Beste Übereinstimmung: <i>Picea spec.</i> = FICHTE [PINACEAE]	



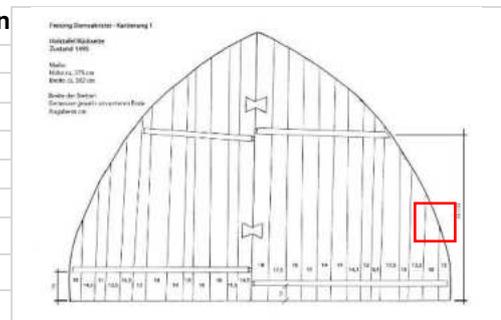
Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P12 – Holzbohle rechts
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff – TUM Siehe Anhang A-01-Holzartenbestimmung
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
BearbeiterIn	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	August 2022
Beste Übereinstimmung: <i>Picea spec.</i> = FICHTE [PINACEAE]	



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Probennummer	P 13 – Rahmen rechts, 1. Teil von unten
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Anschliff / Querschliff
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt
BearbeiterInnen	Julia Brandt & Theresa Hilger
Datum	August 2022
Beste Übereinstimmung: <i>Picea spec.</i> = FICHTE [PINACEAE]	



Kartierung Rückseite: Landskron (2016)

Ergebnis

Nach mikroskopischen Strukturmerkmalen zeigt die untersuchten Proben des Trägers, Rahmens, Schnitzwerks und der Gratleisten die beste Übereinstimmung mit Hölzern der folgenden botanischen Gattungen:

Fichte (*Picea spec.*)
Linde (*Tilia spec.*)
Tanne (*Abies spec.*)

Tafel, Rahmen und die zwei unteren Gratleisten
Schnitzwerk des Rahmens
Die beiden oberen Gratleisten

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Frau Theresa Hilger
Hofgraben 4
80539 München

München, 29.08.2022

Untersuchungsbericht Ri/2022/337

Auftrag:	Holzartenbestimmung
Auftraggeber/in:	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Frau Theresa Hilger
Objekt/Herkunft:	Holzprobe
Probeneingang:	15.08.2022
Anzahl Seiten:	1

Die Holzforschung München erhielt **1 Probe** mit dem Auftrag zur Bestimmung der Holzart.

Für die Bestimmung der Holzart wurde die Holzprobe in Polyethylenglykol (PEG) eingebettet. Anschließend wurden am Mikrotom Dünnschnittpräparate angefertigt und diese mit dem Durchlichtmikroskop (ZEISS Axiophot) lichtmikroskopisch untersucht.

Nach mikroskopischen Strukturmerkmalen zeigt die untersuchte Probe die beste Übereinstimmung mit Hölzern der botanischen Gattung

Picea spec. = Fichte

aus der Familie der **PINACEAE**



Dr. Michael Risse

Sachverständiger für Holz im Sinne des §51 Absatz 1 Satz 2 BNatSchG



Holztafelgemälde Freising

Manuela Hörmann

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege

Referat AV

Hofgraben 4

80539 München

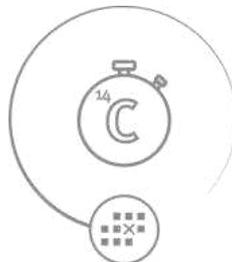
manuela.hoermann@blfd.bayern.de

In Date: 05.04.2024

240189

Report date: 23.06.2024

Prepared by Dr. Susanne Lindauer



Age Determination by Radiocarbon (^{14}C)





Vorgehensweise



Beprobung

Das Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH erhielt von Ihnen Proben zur Altersbestimmung mit Hilfe von ^{14}C . Die Proben wurden je nach Probenart wie nachstehend beschrieben aufbereitet und analysiert.

Probenaufbereitung

Knochen/Elfenbein/Zähne: Aus den Knochen wurde Kollagen extrahiert (modifizierte Longin-Methode) und mit Ultrafiltration die Fraktion $>30\text{kD}$ abgetrennt. Diese Fraktion wurde anschließend gefriergetrocknet.

Kollagen (Aufbereitet vom Kunden): Das Kollagen wird unaufbereitet weiter bearbeitet.

Elfenbein (ohne Kollagen): Verunreinigungen werden mechanisch entfernt. Es findet keine weitere Vorbehandlung statt.

Gewebe: Die Proben wurden bei starker Verschmutzung oder Konservierung mit verschiedenen organischen Lösungsmitteln (Benzol, Aceton) gereinigt und anschließend der ABA-Methode (Acid/Base/Acid, HCl/NaOH/HCl) unterzogen.

Graphit: Graphitproben werden ohne weitere Vorbehandlung direkt im AMS gemessen

Grundwasser: Die Proben wurden mit HCl versetzt und das entgasende CO_2 mittels Vakuumextraktion quantitativ aus der Probe extrahiert.

Karbonate: Die Proben wurden mit H_2O_2 vorbehandelt um organisches Material zu entfernen. CO_2 wurde mittels Karbonatextraktion extrahiert.

Holzkohle, Holz, Sediment, Torf, Samen, Speisereste, Pflanzenreste, Mörtel (organische Reste), Magerung: Die Proben wurden mit der ABA-Methode (Acid/Base/Acid) mit HCl, NaOH und HCl vorbehandelt. Der unlösliche Teil wird anschließend weiter bearbeitet.

Holz (Zellulose): Die Proben wurden mit der ABA-Methode (Acid/Base/Acid) mit HCl, NaOH und HCl vorbehandelt. Danach wurde durch Bleichen mit NaClO_2 Zellulose gewonnen.

Textilien: Die Proben wurden mit verschiedenen organischen Lösungsmitteln (Cyclohexan, Isopropanol, Aceton) gereinigt und mit der ABA-

Methode (Acid/Base/Acid) mit HCl, NaOH und HCl vorbehandelt.

Leder/Papier: Die Proben werden mit verschiedenen organischen Lösungsmitteln gereinigt und mittels HCl vorbehandelt.

Material zur Bestimmung biogenen Kohlenstoffs (Benzin, Öl, Kosmetika, usw): Die Proben werden unvorbehandelt weiter bearbeitet.

Verbrennung und Grafitisierung

Der nach der Vorbehandlung verbleibende Probenrest wurde in einem Elementaranalysator (EA) zu CO_2 verbrannt und das CO_2 katalytisch zu Graphit reduziert.

Analyse

Der ^{14}C -Gehalt wurde mit einem AMS-System vom Typ MICADAS gemessen. Die Isotopenverhältnisse $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ und $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ von Proben, Eichstandards (Oxalsäure-II), Blanks und Kontrollstandards wurden simultan im AMS gemessen. Die ermittelten ^{14}C -Alter sind auf $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ normiert (Stuiver & Polach, 1977) und mit dem Datensatz IntCal20 und der Software SwissCal (L.Wacker, ETH-Zürich) zu Kalenderaltern kalibriert. Die Kalibrationsgrafiken werden mit der Software OxCal erstellt (geringe Unterschiede zwischen SwissCal und OxCal können vorkommen).



Ergebnis



Ergebnis

Das Ergebnis der Datierung (Auftrag 240189) ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Die ^{14}C Alter sind als BP (before present) also in Jahren vor 1950AD angegeben. Die ^{14}C Alter müssen kalibriert werden um absolute Kalenderalter angeben zu können. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in den beiden Spalten „Kalibrierte Alter“ angegeben mit entsprechender 68% Wahrscheinlichkeit (1σ) und 95% Wahrscheinlichkeit (2σ) der ^{14}C Alter.

Der $\delta^{13}\text{C}$ Wert stammt aus der Messung der Isotopenverhältnisse im Beschleuniger; sein Fehler beträgt ca. 2‰. Der Wert kann durch Isotopentrennung bei der Aufbereitung und in der Ionenquelle des Beschleunigers gegenüber dem ursprünglichen Wert des Probenmaterials verfälscht sein, und wird nur zur Korrektur der Fraktionierungseffekte verwendet. Der Wert ist daher nicht mit einer Messung in einem Massenspektrometer für stabile Isotope (IRMS) vergleichbar und sollte nicht zur weiteren Dateninterpretation verwendet werden.

Lab Nr MAMS	Sample Name	^{14}C Age [yr BP]	\pm	$\delta^{13}\text{C}$ AMS [‰]	Kalibrierte Alter		C [%]	Material
					Wahrscheinlichkeit 68%	Wahrscheinlichkeit 95%		
69041	Holztafelgemaelde Freising-PG-1	383	15	-26.0	cal AD 1458-1608	cal AD 1452-1620	47.4	wood
69042	Holztafelgemaelde Freising-PG-2	500	15	-21.8	cal AD 1419-1435	cal AD 1409-1440	47.0	wood

Dr. Susanne Lindauer

Dr. Ronny Friedrich



Die Datentabelle lesen

Die Ergebnisse der Analyse sind in einer Tabelle zusammengefasst. Die hier folgende Beispieltabelle stellt die Ergebnisse einer beliebigen ¹⁴C Analyse dar.

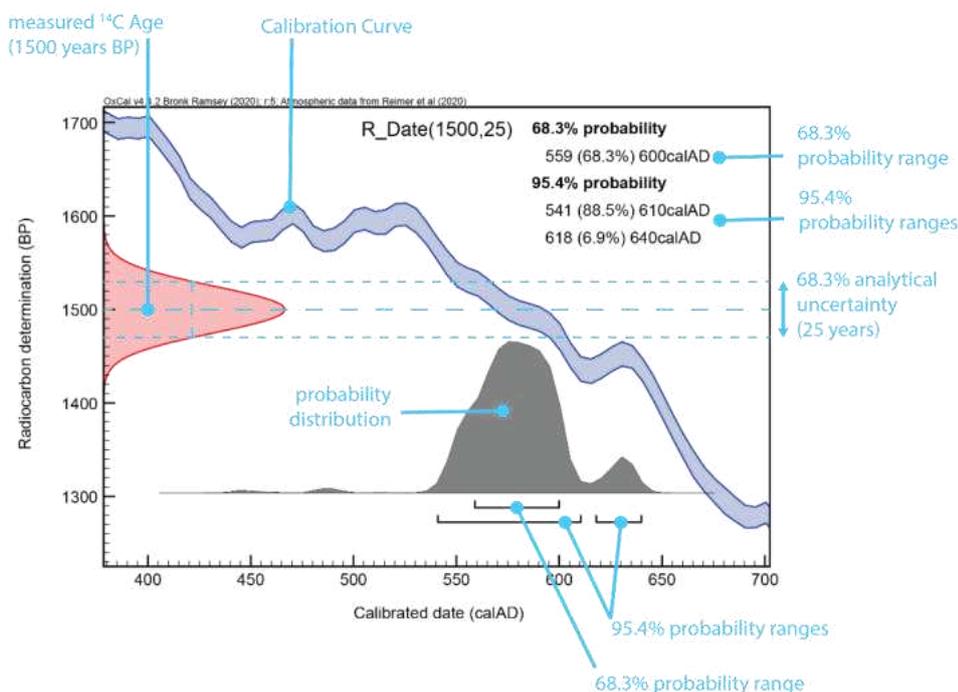
Lab Nr MAM S	Sample Name	¹⁴ C Age [yr BP]	±	δ13C AMS [‰]	Kalibrierte Alter		C:N	C [%]	Collagen [%]	Materi al
					Wahrscheinlichkei t 68%	Wahrscheinliche it 95%				
1234	xyz	1500	25	-25.0	559 – 600 calAD	541 – 640 calAD	5.6	36	1.5	Bone

Die Daten lassen sich wie folgt verstehen:

Für die Knochenprobe „xyz“ mit der Analysenummer „1234“ wurde ein konventionelles ¹⁴C-Alter von 1500 ± 25 Jahren BP gemessen. Das kalibrierte Kalenderalter liegt mit 68% Wahrscheinlichkeit innerhalb des Zeitbereichs von 559 - 600 AD und mit 95% innerhalb von 541 - 640 AD. In der Probe waren 1.5% Kollagen erhalten, das 36% Kohlenstoff enthielt. Das C/N Verhältnis liegt mit 5,6 außerhalb des für gut erhaltenes Kollagens gültigen Bereiches von 2,9-3,6. Dieser Wert zeigt damit möglicherweise degeneriertes Kollagen an. Das entsprechende ¹⁴C Alter kann davon beeinflusst sein. *Sobald die Messdaten Zweifel an der Qualität der Probe zeigen (z.B. CN-Verhältnis, Kollagenerhaltung oder geringer Kohlenstoffgehalt) wird dies im Report angegeben. Als Beispiel:* Das CN-Verhältnis der Probe 1234 liegt außerhalb des typischen Bereichs und weist damit auf degeneriertes Kollagen hin.

Die Kalibrationsgrafik verstehen

Ein ¹⁴C-Alter ist nur eine Näherung des echten Kalenderalters und muss kalibriert werden. Eine entsprechende Kalibrationsgrafik ist im Folgenden dargestellt. Die Ergebnisse der Kalibration sind ebenfalls in der Tabelle zusammengefasst (siehe oben).





Erläuterungen



Die Kalibration vergleicht das gemessene ^{14}C -Alter (rot) mit der Kalibrationskurve (blau), um daraus die möglichen Kalenderalter (grau) zu berechnen. Die kalibrierten Kalenderalter sind mit „cal“ in der Altersangabe gekennzeichnet. Unter Umständen ergibt ein ^{14}C -Alter mehrere mögliche Kalenderbereiche. Die kalibrierten Alter werden mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten angegeben. Wird die einfache Messunsicherheit (1σ) des ^{14}C -Alters für die Kalibration verwendet ergibt sich daraus eine Wahrscheinlichkeit von 68.3%, dass das wahre Alter im angegebenen Kalenderbereich liegt. Mit der doppelten Messunsicherheit (2σ) ergibt sich dies entsprechend mit einer Wahrscheinlichkeit von 95.4%.

Sollten mehrere Altersbereiche nach der Kalibration in Frage kommen, werden diese zusätzlich mit ihren individuellen statistischen Wahrscheinlichkeiten in der Grafik dargestellt. Ein Ausschluss einzelner Zeitbereiche an Hand vergleichsweise niedrigerer Wahrscheinlichkeit ist nicht möglich. Die Gesamtwahrscheinlichkeit von 68.3% bzw. 95.4% beinhaltet immer alle Einzelbereiche.

Beispiel: Ein ^{14}C -Alter von (1500 ± 25) Jahren BP ergibt mit einer Wahrscheinlichkeit von 68.3% ein wahres Kalenderalter, das zwischen 559 – 600 AD liegt. Erweitert man die Kalibration auf 95,4% Wahrscheinlichkeit so ergeben sich zwei Bereiche von 541-610 cal AD oder 618-640 cal AD. In der Datentabelle sind lediglich Minimal- und Maximalwert des gesamten Kalibrationsbereiches angegeben (541-640 calAD). Obwohl die beiden Zeitbereiche sehr stark unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten besitzen (88,5% und 6,9%) darf keiner der Bereiche grundsätzlich ausgeschlossen werden, sondern es ist stets der gesamte Bereich anzugeben.

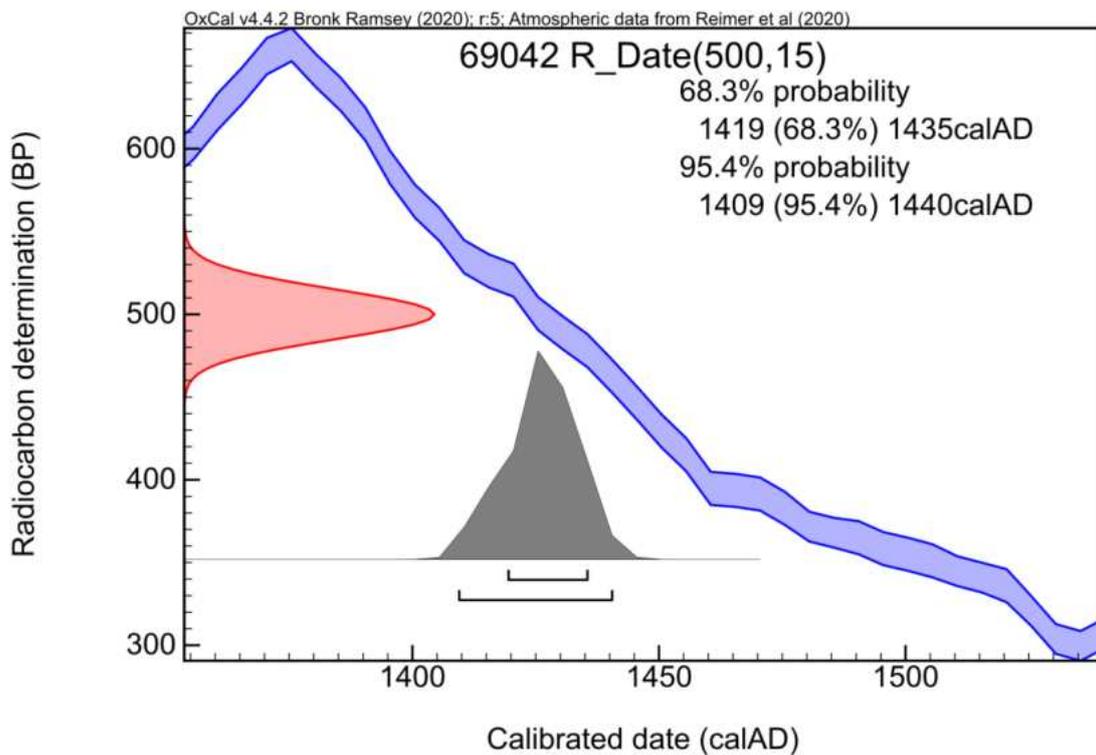
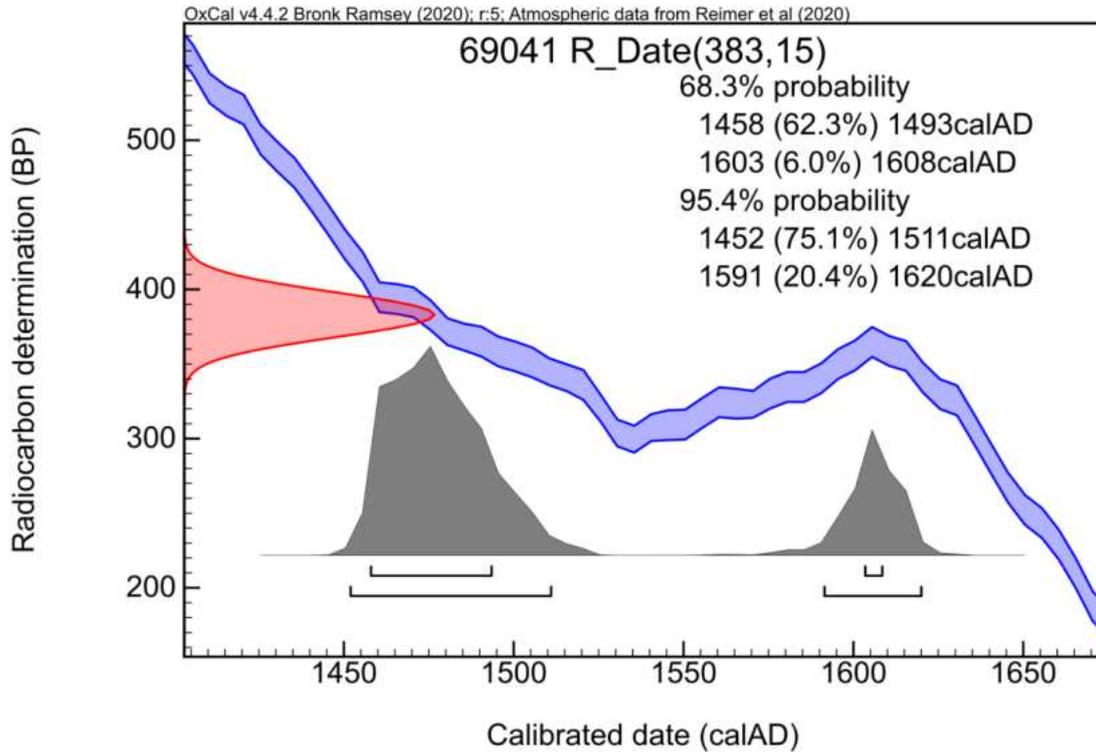


Ergänzungen



Kalibrationsgrafiken

Die Kalibrationsgrafiken sind mit der Software OxCal 4.4 erstellt worden.



Kontakt Daten Berichtsersteller

Dr. Susanne Lindauer

Susanne.lindauer@ceza.de

0621 293-3826

Geschäftsführung

Professor Dr. Ernst Pernicka (Senior Direktor)

Professor Dr. Wilfried Rosendahl (Wissenschaftlicher Vorstand)

Sven Wiegand (Kaufmännischer Geschäftsführer)



Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH

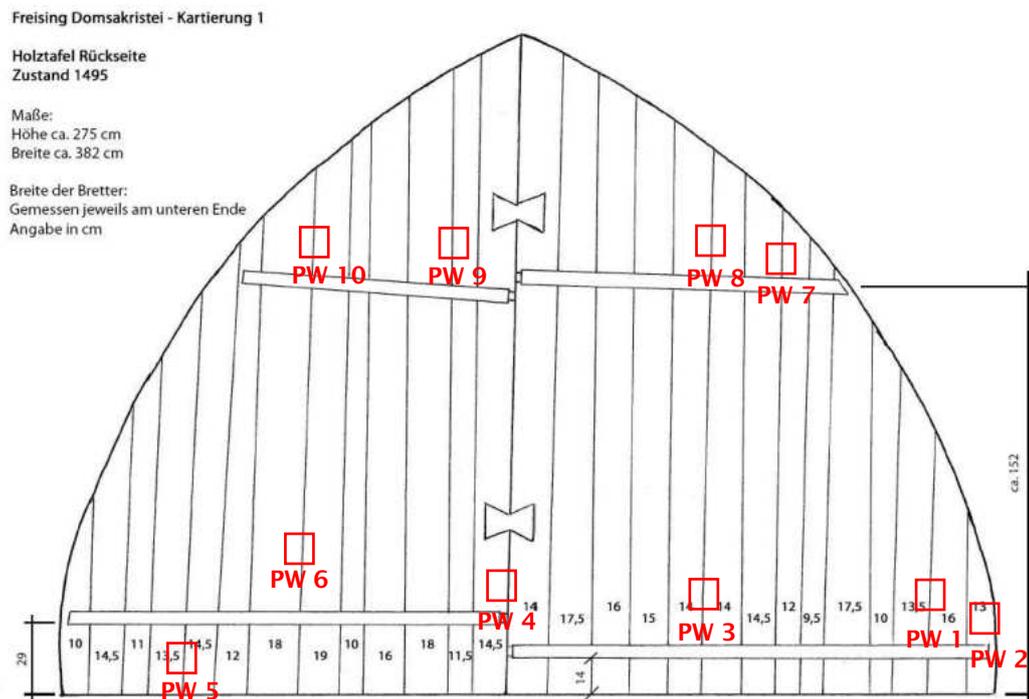
D6, 3 | 68159 Mannheim

www.ceza.de

Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte 04-Untersuchungsbericht Werg, Tafelbild Rückseite

Werkbezeichnung	Gründonnerstagsretabel
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Dom St. Maria u. Korbinian in Freising (Obb., Lkr. Freising, D-1-78-124-43)
Methode	Lichtmikroskopische Untersuchung
Probenform	Fasern
Probenanzahl	10
AuftraggeberIn	BLfD
BearbeiterIn	Johanna Gerling
Entnahme	Johanna Gerling
Datum	Probennahme 14.07.2023; Mikroskopie 25.07.-03.08.2023; Auswertung 07.08.-08.08.2023
Fragestellung	Faseranalyse des Wergs zur Bestimmung des kunsttechnologischen Aufbaus des Holztafelgemäldes

Übersicht der Probenentnahmestelle



Rückseite: Kartierung Landskron (2016)

Probennummer	PW 1 – Rückseite	
Beschreibung	Verhärtete, teils verklebte braune Fasern	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 2 – Rückseite	
Beschreibung	Bräunliche Fasern, jedoch nicht so stark verhärtet und überzogen wie PW 1	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 3 – Rückseite	
Beschreibung	Verhärtete, teils wie verklebte braune Fasern	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 4 – Rückseite	
Beschreibung	Verhärtete, teils verklebte braune Fasern	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 5 – Rückseite	
Beschreibung	Verhärtete, teils sehr stark verklebte braune Fasern	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	

Probennummer	PW 6 – Rückseite	<p>Heising-Dachstuhlbau Karlsruhe I - Holzfachwerkstuhl - Dachstuhl 1495 Mäße: Mäße ca. 275 cm Mäße ca. 902 cm Stühle des Stuhls: Längsmaß (Innen/außen) 14/16 Kragmaß (Innen)</p>
Beschreibung	Hellbraune Fasern, ohne großflächigen Überzug	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 7 – Rückseite	<p>Heising-Dachstuhlbau Karlsruhe I - Holzfachwerkstuhl - Dachstuhl 1495 Mäße: Mäße ca. 275 cm Mäße ca. 902 cm Stühle des Stuhls: Längsmaß (Innen/außen) 14/16 Kragmaß (Innen)</p>
Beschreibung	Teils stark verklebte Faserbündel	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 8 – Rückseite	<p>Heising-Dachstuhlbau Karlsruhe I - Holzfachwerkstuhl - Dachstuhl 1495 Mäße: Mäße ca. 275 cm Mäße ca. 902 cm Stühle des Stuhls: Längsmaß (Innen/außen) 14/16 Kragmaß (Innen)</p>
Beschreibung	Hellbraune bis gelbliche Fasern, ohne großflächigen Überzug	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 9 – Rückseite	<p>Heising-Dachstuhlbau Karlsruhe I - Holzfachwerkstuhl - Dachstuhl 1495 Mäße: Mäße ca. 275 cm Mäße ca. 902 cm Stühle des Stuhls: Längsmaß (Innen/außen) 14/16 Kragmaß (Innen)</p>
Beschreibung	Verhärtete, teils verklebte braune Fasern	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	
Probennummer	PW 10 – Rückseite	<p>Heising-Dachstuhlbau Karlsruhe I - Holzfachwerkstuhl - Dachstuhl 1495 Mäße: Mäße ca. 275 cm Mäße ca. 902 cm Stühle des Stuhls: Längsmaß (Innen/außen) 14/16 Kragmaß (Innen)</p>
Beschreibung	Verhärtete, teils verklebte braune Fasern	
Probenform	Faserprobe	
Entnahme	Johanna Gerling	

Allgemeine Anmerkung zur Probenentnahme

Die bereits abstehenden Wergfasern werden mit einer Pinzette gegriffen und mit einer Schere abgeschnitten (siehe Abb. 1-3). Die Entnahme erfolgt an möglichst allen Bereichen, die mit Werg beklebt wurden. Bei der Probenauswahl wird außerdem darauf geachtet, ein breites Spektrum an Fasern von weniger bis stark mit Bindemittel getränkten abzudecken. Die Fasern sind vermutlich sowohl durch das Bindemittel, mit dem es aufgebracht wurde, als auch durch einen zusätzlichen Bindemittelauftrag mit Leinöl teilweise durchzogen (siehe Abb. 5/6).

Methode

Die Faserproben werden mit dem Skalpell geteilt und mit diesem weitestgehend von der Auflagerung befreit. Anschließend erfolgt die lichtmikroskopische Untersuchung. Im Laufe der Untersuchung wird die Vorbereitungsmethode der Fasern angepasst, da die mechanische Freilegung der Faser durch ein Skalpell vermehrt zu einer fast vollständigen Zerstörung der Probe führte, anstatt die Identifizierbarkeit zu unterstützen. Ab PW2 Probe 3 werden alle Proben zwischen 40 bis 70 Stunden in entmin. Wasser eingelegt, um eine Quellung zu verursachen (siehe Tabelle 2). Nach der Einlegezeit erfolgt die Entnahme der Proben und die weitere mechanische Aufschließung mit zwei Präpariernadeln, um feinere Fasern zu erhalten, die eine eindeutige Bestimmung zulassen. Für die aufbereiteten Proben wird dabei der Herzog-Test angewendet, wobei auf einem drehbaren Mikroskopiertisch, im gekreuzten polarisierten Licht ein Faserabschnitt gesucht wird, der hohe Interferenzfarben zeigt und in den Orthogonalstellungen auslöscht (normalerweise um 5° verschoben zum Achsenkreuz). Anhand des dann eingeschobenen Lambdaplättchens im 45° Winkel stellt sich bei manchen Fasern ein Indigoblau oder Rotorange vor magentafarbenen Hintergrund ein und ermöglicht eine genauere Bestimmung.

Geräteinformationen

Die Faserprobe wird mit dem Mikroskop Axiolab der Firma Zeiss, ausgestattet mit visuellem Licht, verschiedenen Objektiven (Epiplan, 10x 0.30HD, 20x 0.50HD) und Filtern (Lambdaplättchen) im Durchlicht und auf einem Drehtisch betrachtet. Die Aufnahmen werden mit der Kamera AxioCam MRc5 und dem Computerprogramm AxioVision SE64 Rel. 4.9 angefertigt.

Ergebnisse und Fotodokumentation:

Die Auswertung wird anhand der Mitschriften und Mikroskopaufnahmen durchgeführt. Unter polarisiertem Licht leuchten Hanffasern in liegender (horizontaler) Position rot auf und in stehender (vertikaler) Position blau. Bei Flachs ist dies umgekehrt: liegend blau und stehend rot.¹ Von 145 Aufnahmen unter polarisiertem Licht sind 102 Bilder Hanf zuzuordnen und neun Flachs. 32 Bilder sind nicht eindeutig bestimmbar.² Es ist anzunehmen, dass das Werg aus einem Hanf-Flachs-Gemisch besteht, wobei mehr Hanf als Flachs vorhanden ist. Einschränkung muss gesagt werden, dass einige Proben nicht aussagekräftig für einen Herzog-Test waren, da manche Fasern durch ihre Oberflächenstruktur im polarisierten Licht nicht eindeutig identifizierbar waren. Dabei fiel besonders eine gewellte Struktur der Faser auf, die im polarisierten Licht in den Wellungen jeweils rot und blau leuchtete und damit keine genaue Bestimmung möglich war (vgl. Abb. 4, 13 und 14). Wodurch die gewellte Struktur verursacht wurde, ist nicht bekannt. Zudem ist unklar, inwiefern der Überzug bzw. das Bindemittel die Lichtbrechung beeinflusst und damit das Ergebnis verändert bzw. verfälschen kann, da dieser nicht abgenommen werden konnte, ohne die Faser zu schädigen. Selbst nach Einlegen der Fasern in entmin. Wasser zwischen 40 und 70 Stunden hatte sich der Überzug nicht gelöst und stand durch die Quellung der Faser schollenartig ab. Erst bei der mechanischen Aufschließung der Fasern durch zwei Präpariernadeln lösten sich die gelockerten Partikel.

¹ WÜLFERT 1999, S. 290 f.

² Siehe Tabelle 1: Auswertung der Mikroskopaufnahmen.

Nicht jede der beprobten Fasern konnte erfolgreich mechanisch weiter aufgeschlossen werden, was ebenfalls eine potenzielle Fehlerquelle ergibt. Technische Faserbündel reflektieren das polarisierte Licht anders und uneindeutiger als Elementarfasern, da für den Herzog-Test die zweite Zellwand dieser Elementarfasern maßgeblich für die Farbgebung ist.³

Auswertung der 145 Mikroskopaufnahmen mit polarisiertem Licht		
Hanf	Flachs	Nicht eindeutig
102	9	34

Tabelle 1: Auswertung der Mikroskopaufnahmen



Abb. 1 und 2: Probeentnahme von PW 2 in der unteren rechten Ecke auf der Rückseite des Tafelbildes

³ WÜLFERT 1999, S. 257 und S. 290 f.



Abb. 3: Probeentnahme von PW 7 im oberen Abschnitt auf der Rückseite des Tafelbildes



Abb. 4: Aufnahme unter dem Mikroskop, 10-fache Vergrößerung von PW7 Probe 3. Gut erkennbar ist die wellige Oberflächenstruktur und nur leichte Auflagerungen.

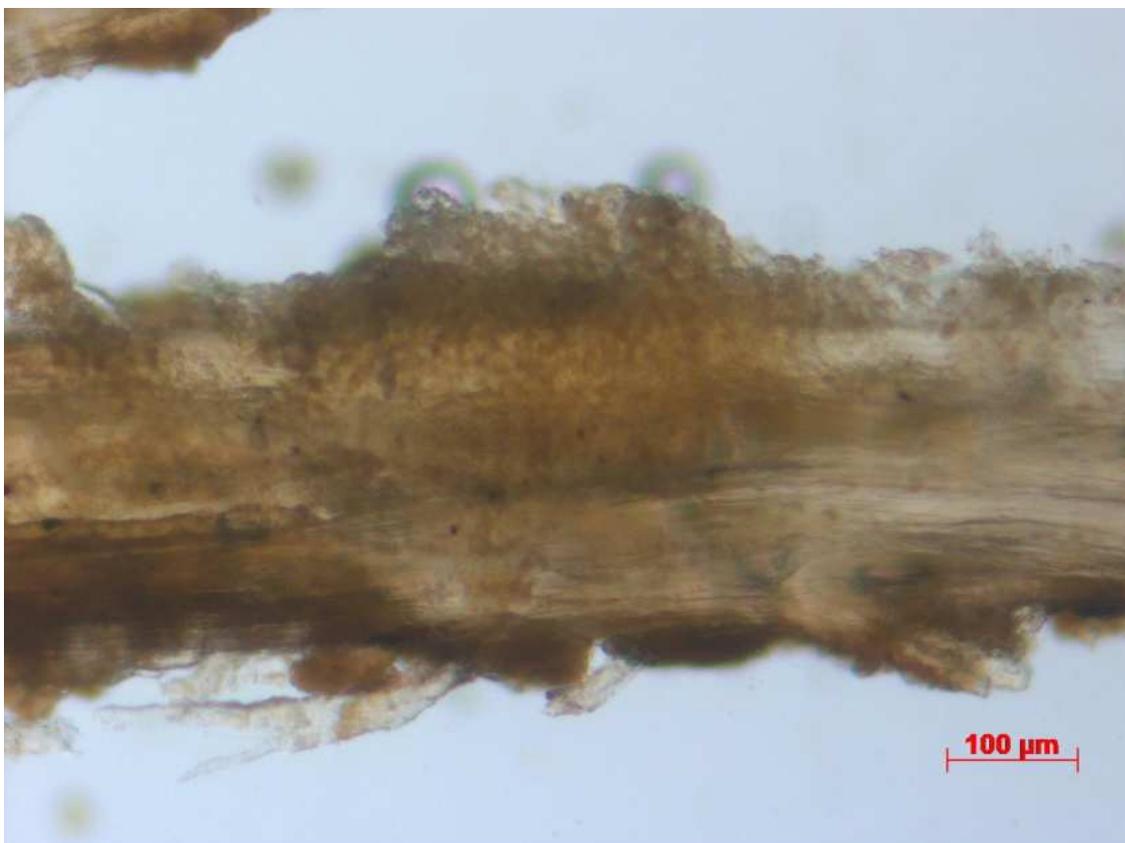


Abb. 5: Aufnahme unter dem Mikroskop, 20-fache Vergrößerung von PW7 Probe 2. Es sind deutliche Auflagerungen erkennbar.

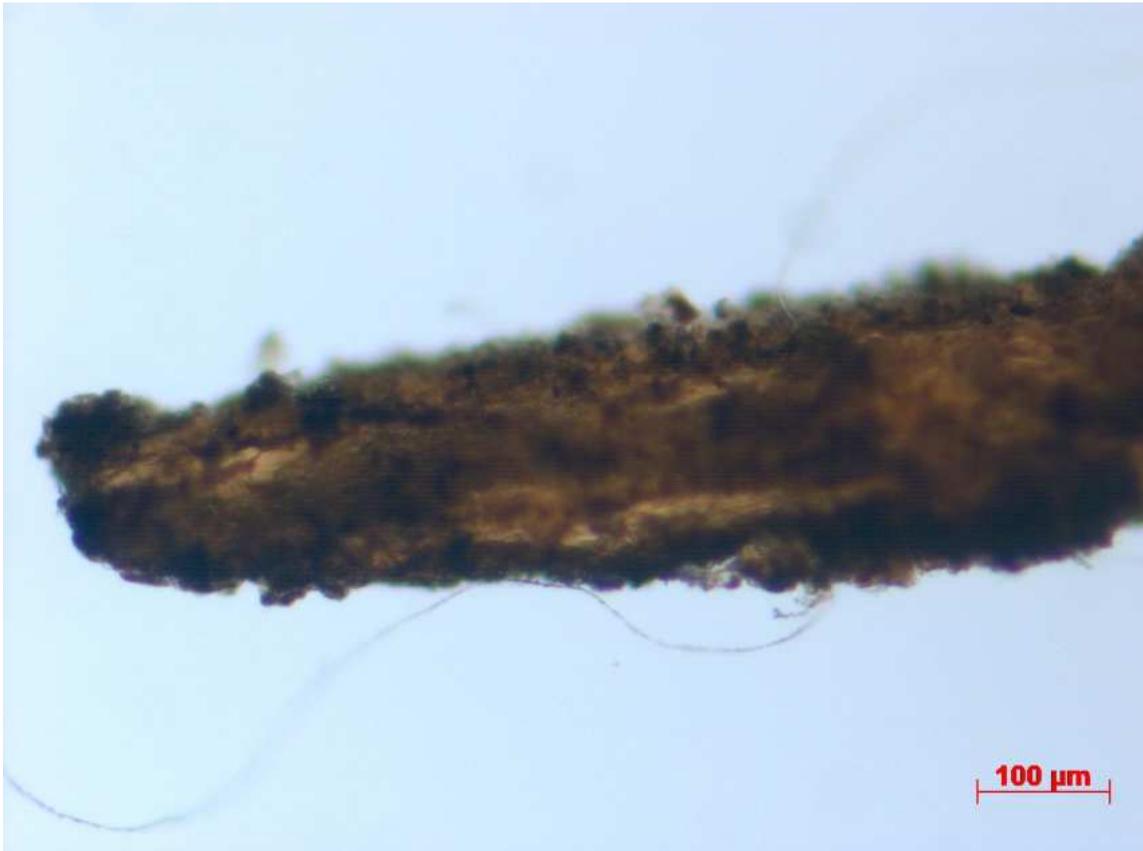


Abb. 6: Aufnahme unter dem Mikroskop, 20-fache Vergrößerung von PW 9 Probe 2. Es sind deutlich braune bis fast schwarze Auflagerungen erkennbar. Dadurch wird die eigentliche Faserstruktur vollständig verdeckt.

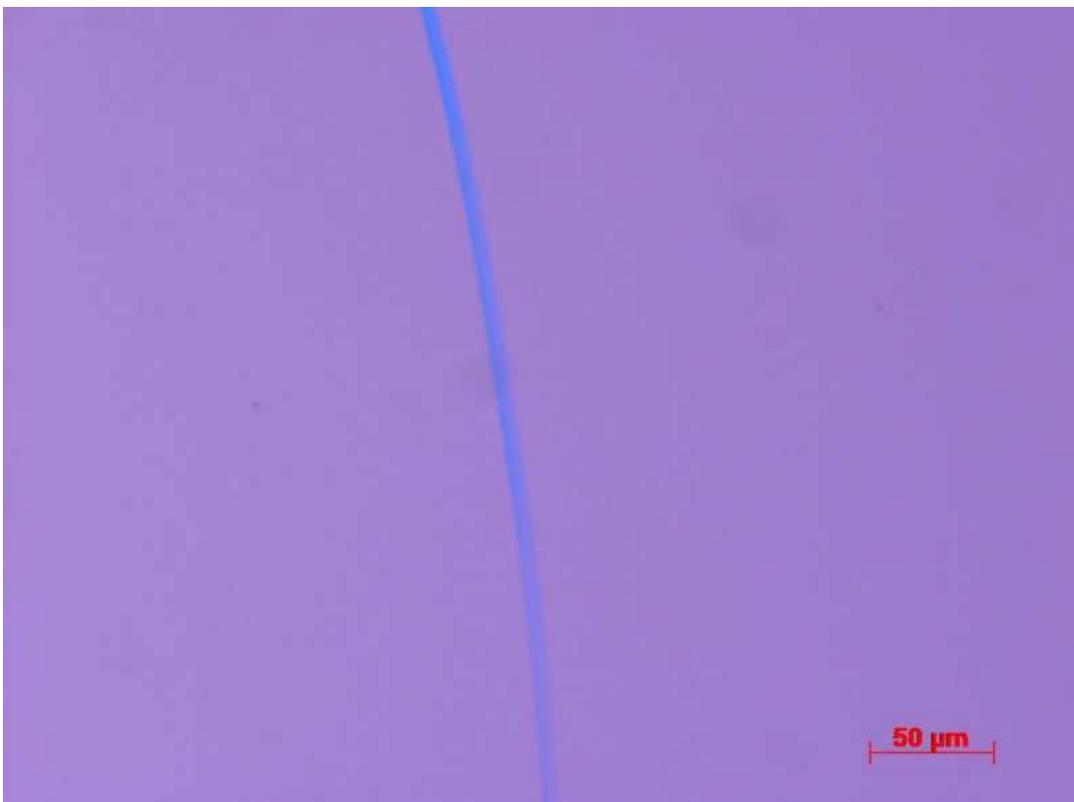


Abb. 7: Aufnahme unter dem Mikroskop bei polarisiertem Licht, 20-fache Vergrößerung von PW 3 Probe 3. In stehender Position ist eindeutig die blaue Farbe sichtbar und deutet damit auf eine Hanffaser hin.



Abb. 8: Aufnahme unter dem Mikroskop bei polarisiertem Licht, 20-fache Vergrößerung von PW3 Probe 3. In liegender Position ist das rote Aufleuchten erkennbar.

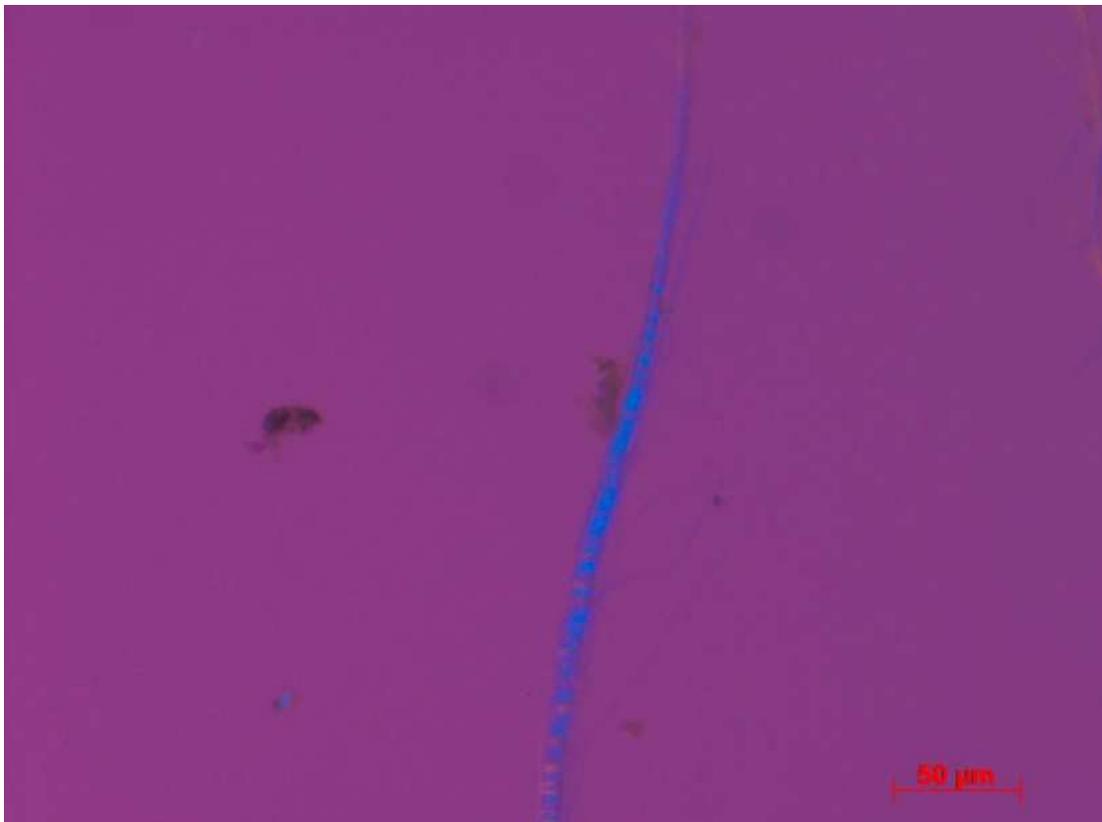


Abb. 9: Aufnahme unter dem Mikroskop bei polarisiertem Licht. 20-fache Vergrößerung von PW 6 Probe 1. Wie bei Abb. 7 ist auch hier in stehender Position die blaue Farbe erkennbar.

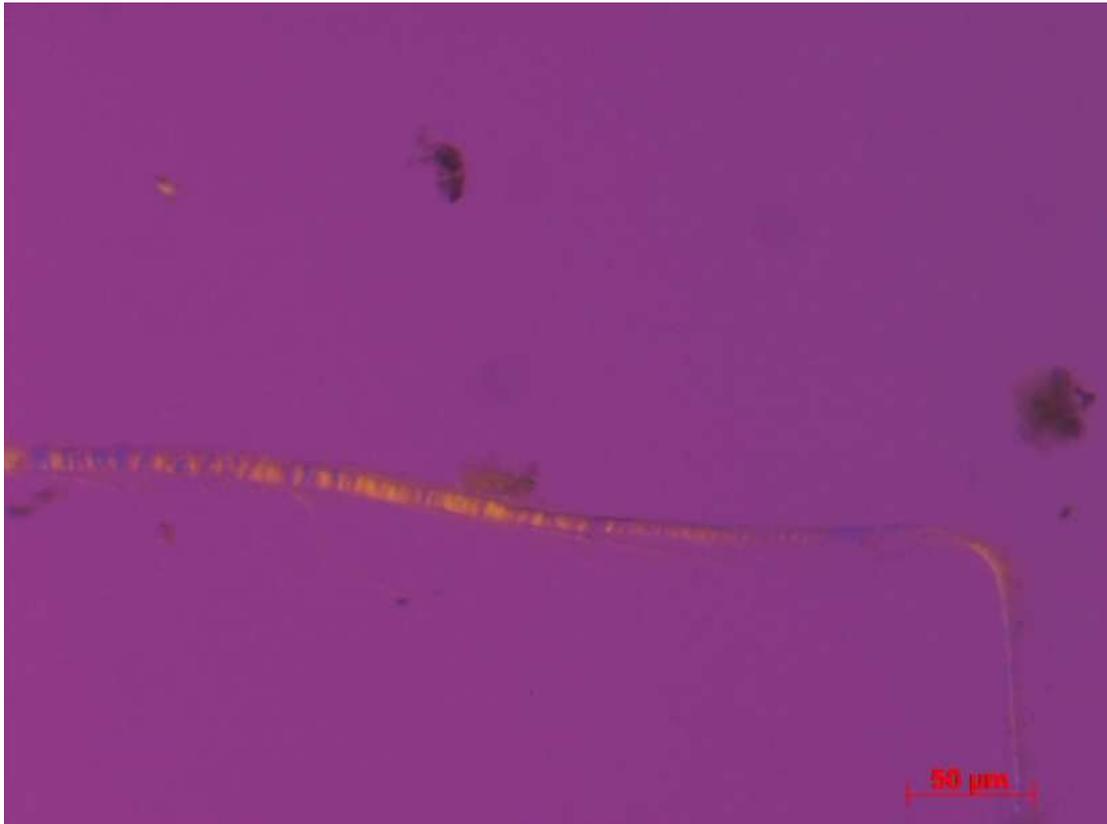


Abb. 10: Aufnahme unter dem Mikroskop bei polarisiertem Licht, 20-Vergrößerung von PW 6 Probe 1. Vgl. Abb. 8.

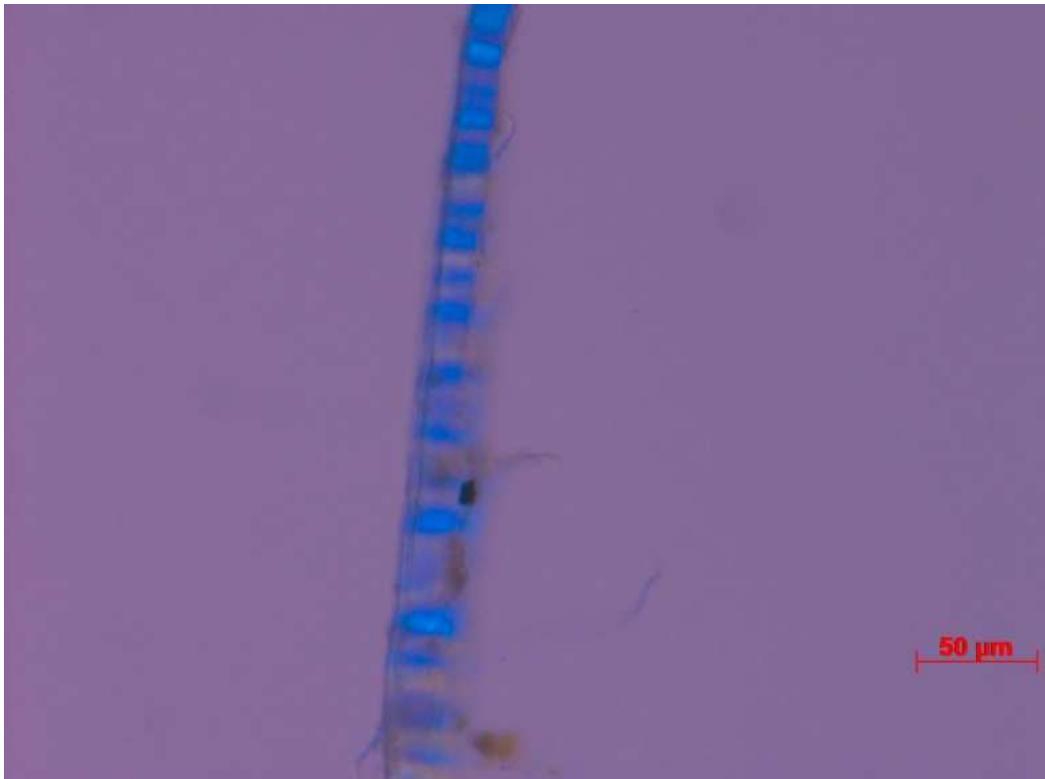


Abb. 11: Mikroskopaufnahme unter polarisiertem Licht bei 20-facher Vergrößerung von PW 2 Probe 3.



Abb. 12: Mikroskopaufnahme unter polarisiertem Licht bei 20-facher Vergrößerung von PW2 Probe 3.

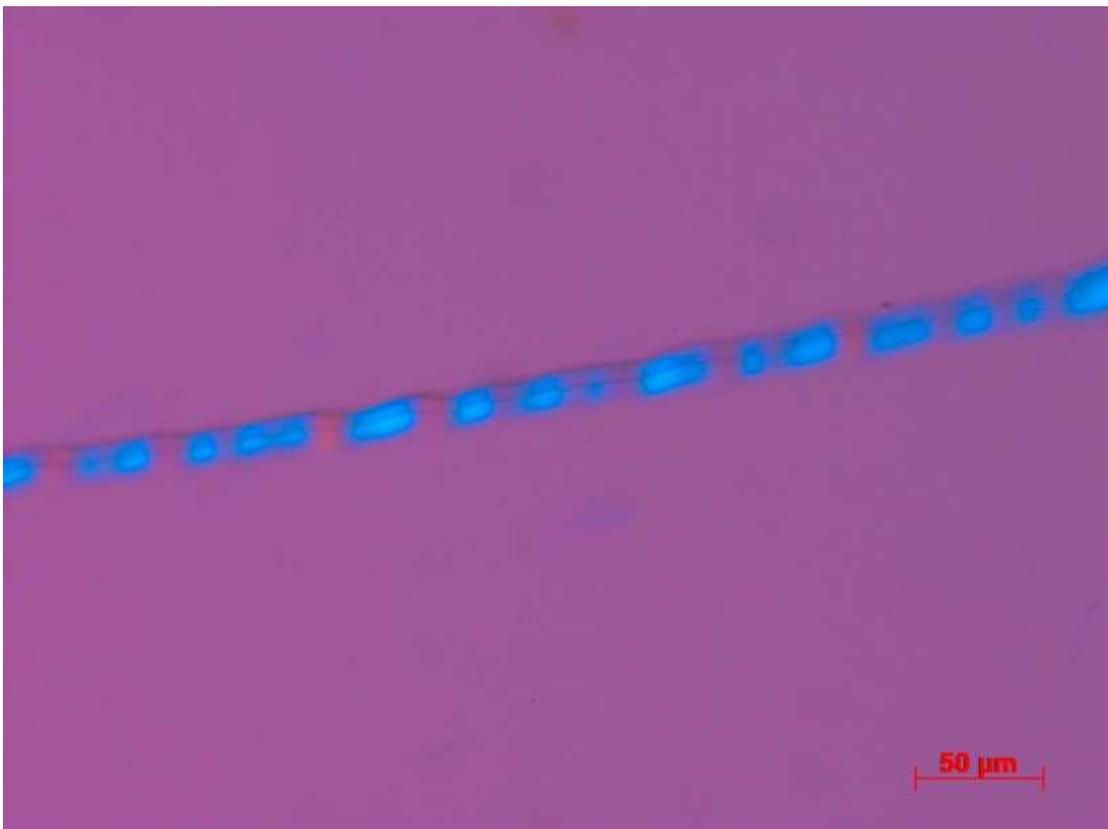


Abb. 13: Mikroskopaufnahme unter polarisiertem Licht bei 20-facher Vergrößerung von PW 7 Probe 1. Hier wird durch die wellige Oberflächenstruktur der Faser beide Farben angezeigt, was eine Zuordnung erschweren kann.

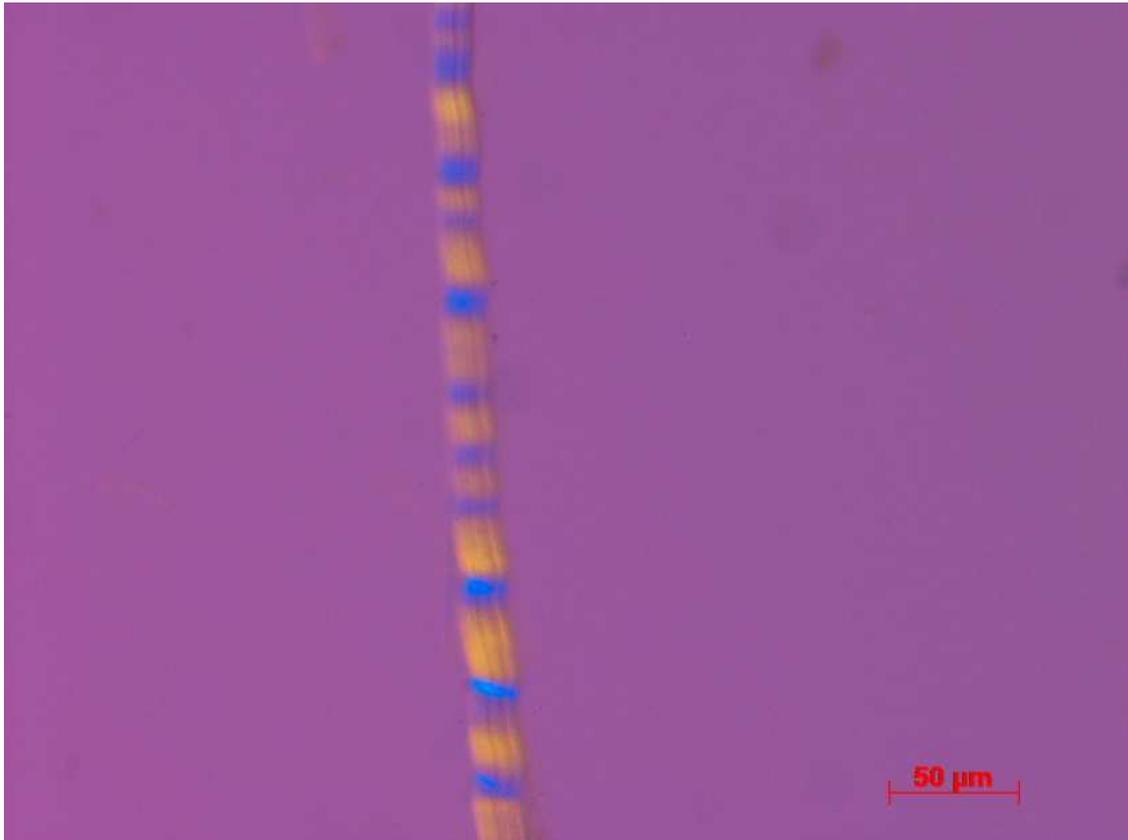


Abb. 14: Mikroskopaufnahme unter polarisiertem Licht bei 20-facher Vergrößerung von PW 7 Probe 1.

Literatur

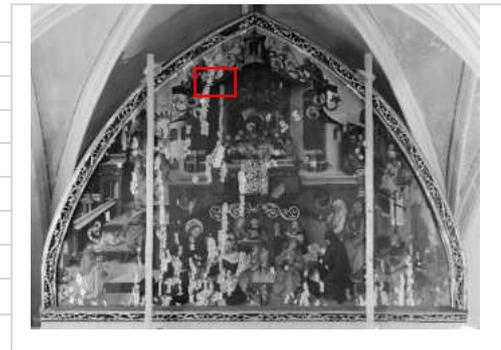
Wülfert, Stefan. (1999). Der Blick ins Bild. Lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten. Bücherei des Restaurators, Bd. 4. Hg. Ulrich Schließl. Ravensburg.

Landskron, G. & A. (2016). Holztafelgemälde in der Domsakristei. Zwischenbericht zur Untersuchung. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Dokumentationsarchiv.

Einlegezeiten der Fasern				Inhalt der Proben
Proben	Einlegestartzeit	Entnahmezeit	Gesamtzeit	
PW 1	Probe 1 – 3 25.07.2023, 15:35 Uhr	Probe 1 – 3 27.07.23, 7:55 Uhr	40 h 20 min	Hanf, Leinen(?) und nicht eindeutige Ergebnisse
PW 2 (Probe 1 und 3 wurden zweimal ins Wasser eingelegt)	Probe 1 und 3 27.07.2023, 10:27 Uhr	Probe 1 und 3 28.07.2023, 7:40 Uhr	21 h 48 min	Hanf und nicht eindeutige Ergebnisse
	Probe 1 und 3 28.07.2023, 8:15 Uhr	Probe 1 und 3 31.07.2023, 9:12 Uhr	72 h 57 min	
	Probe 4 31.07.2023, 11:13 Uhr	Probe 4 03.08.2023, 7:45 Uhr	68 h 32 min	
PW 3	Probe 1 – 3 31.07.2023, 11:40 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 8:05 Uhr	68 h 25 min	Hanf und nicht eindeutige Ergebnisse
PW 4	Probe 1 – 3 31.07.2023, 12:10 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 8:50 Uhr	68 h 40 min	Hanf und nicht eindeutige Ergebnisse
PW 5	Probe 1 – 3 31.07.2023, 12: 40 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 9:30	68 h 49 min	Hanf und Leinen(?)
PW6	Probe 1 – 3 01.08.2023, 8:35 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 10:20 Uhr	49 h 45 min	Hanf und nicht eindeutige Ergebnisse
PW 7	Probe 1 – 3 01.08.2023, 9:10 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 11:00 Uhr	49 h 50 min	Nicht eindeutige Ergebnisse und Probe 2 war nicht verwertbar
PW 8	Probe 1 – 3 01.08.2023, 9:55 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 11:51 Uhr	49 h 51 min	Hanf und nicht eindeutige Ergebnisse
PW 9	Probe 1 – 3 01.08.2023, 10:20 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 13:31 Uhr	51 h 11 min	Hanf und nicht eindeutige Ergebnisse
PW 10	Probe 1 – 3 01.08.2023, 11:00 Uhr	Probe 1 – 3 03.08.2023, 14:35 Uhr	51 h 35 min	Nicht eindeutige Ergebnisse

Tabelle 2: Übersicht über die Einlegezeiten des Wergs

Probennummer	PF 1 – Vergoldung
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Querschliff und GC-MS
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Theresa Hilger
Anschliffe und Fotos	Vanessa Klee
Protokoll	Theresa Hilger
Entnahmedatum	04.08.2022



Vorderseite: BLfD, Giorgia Petta (2022)

Probenentnahmestelle



Detailsansicht Tafelbild mit markierter Probenstelle | Fotos: Diözesanmuseum, Walter Bayer (2021)



Detailsansicht mit markierter Probenstelle | Fotos: BLfD, Theresa Hilger (2022)

Die Probe wurde mit dem Skalpell und einer Pinzette entnommen.

Methode

Die Malschicht Probe wird mit dem Skalpell geteilt. Ein Teil der Probe wird zur Bindemittelanalyse an ein externes Labor versendet. Der zweite Teil der Probe wird in einer Silikonform eingebettet. Auf einer vorgefertigten Bodenplatte aus 20 min. gehärtetem Araldite® werden wenige Tropfen flüssiges Araldite® gegeben, um die Probe mit Pinzette und Skalpell darauf zu betten. Die Form wird anschließend bis zur Oberkante mit Araldite® aufgefüllt. Nach der 20 minutigen Trockenzeit unter Blaulicht wird die Probe grob angeschliffen (Trockenschleifpapier, Körnung P600) und danach mit micromesh Schleifpapier (Körnungen 1500 – 12000) aufpoliert.

Geräteinformationen

Der Anschliff der Probe wird mit dem Mikroskop AxioPhot der Firma Zeiss, ausgestattet mit visuellem Licht¹ und UV-Strahlung (Kompaktlichtquelle HPX 120-UV²), verschiedenen Objektiven (5x 0.5HD, 10x 0.30HD, 20x 0.50HD, 50x) und Filtern im Auflicht betrachtet. Die Aufnahmen werden mit der Kamera AxioCam MRc5 und dem Computerprogramm AxioVision SE64 Rel. 4.9 angefertigt.

Folgende Abkürzungen werden bei der Beschreibung und Interpretation verwendet:

UV = ultraviolette Strahlung BP450-490nm (Filtersatz 15) | VIS = visuelles Licht | HF = Hellfeld | DF = Dunkelfeld | XPL = gekreuzte Polarisatoren | PPL = parallele Polarisatoren.

Ergebnisse und Fotodokumentation:



Abb. 1 : Gesamtansicht (5:1 | VIS Auflicht | DF)

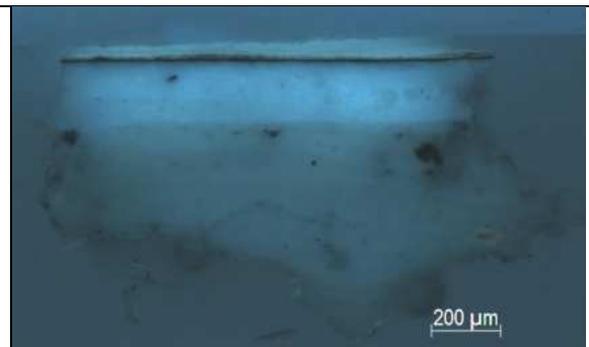


Abb. 2 : Gesamtansicht (5:1 | UV)

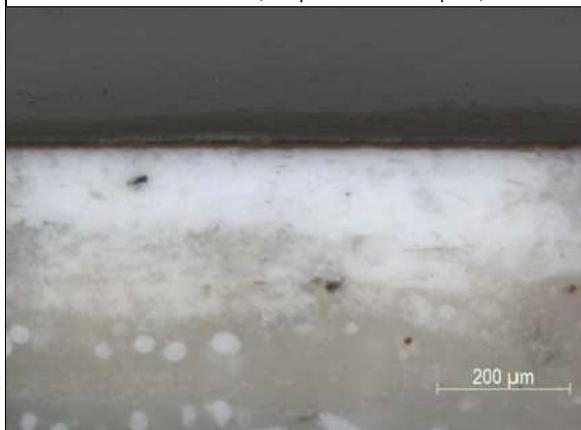


Abb. 3 : Detailansicht (10:1 | VIS Auflicht | DF)

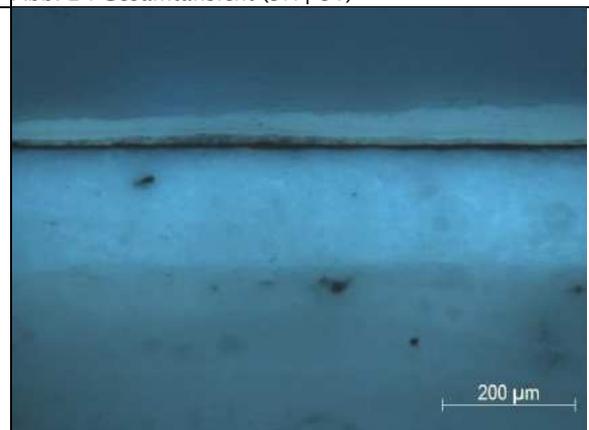


Abb. 4 : Detailansicht (10:1 | UV)

¹ Halogenlampe 12V / 100W.

² Quecksilberhöchstdrucklampe OSRAM HPX-R120W/45C UV.

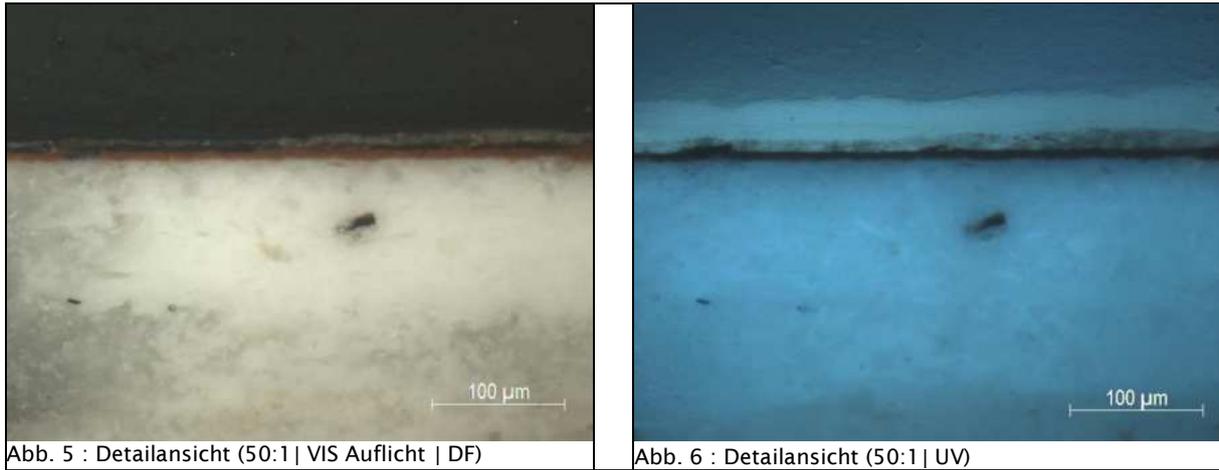


Abb. 5 : Detailansicht (50:1 | VIS Auflicht | DF)

Abb. 6 : Detailansicht (50:1 | UV)

Nr.	Schicht	Beschreibung
8	Überzug 2	Durchgehende transparent bzw. dunkel erscheinende, dicke Schicht; unter UV bläulich fluoreszierend; Schichtdicke ca. 30 µm

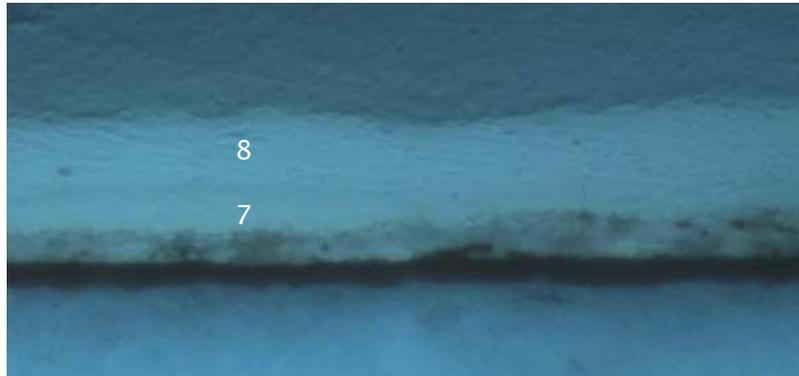


Abb. 7 : Detailansicht oberster Überzug (50:1 | UV)

7	Überzug 1	Durchgehende transparent bzw. dunkel erscheinende, dünne Schicht; unter UV bläulich fluoreszierend. Am oberen Rand eine sehr dünne dunkle Ansammlung (ggf. Schmutzschicht?); durchschnittliche Schichtdicke: ca. 5 µm
---	-----------	---



Abb. 8 : Detailansicht unterer Überzug (10:1 | UV)

6	Braune Schicht	Durchgehende braune Schicht mit bunten und schwarzen kleineren Partikeln; unter UV nur schwach fluoreszierend; durchschnittliche Schichtdicke: ca. 10 µm
---	----------------	--

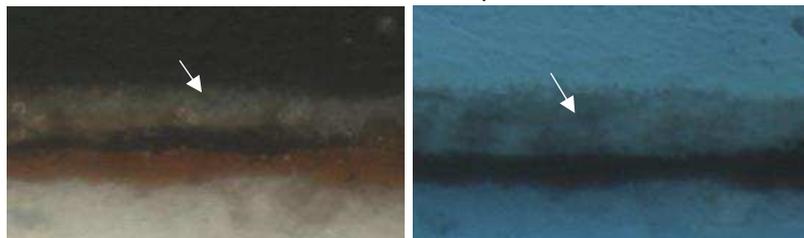
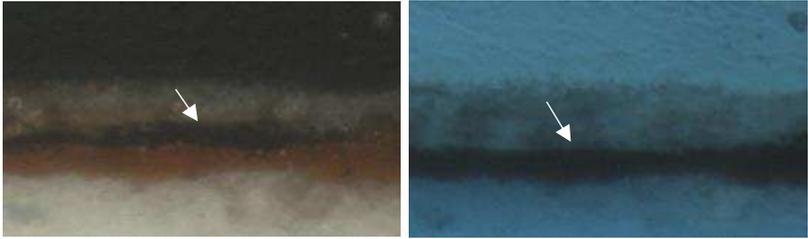


Abb. 9 : Detail Farbschichten (50 : 1 | VIS (links) | UV (rechts))

<p>5 Schwarze Schicht</p>	<p>Durchgehende, dünne, schwarze Schicht; unter UV ebenfalls schwarz</p> 
<p>Abb. 10 : Detail Farbschichten (50 : 1 VIS (links) UV (rechts))</p>	
<p>4 Schwarze Schicht bzw. Metallauflage</p>	<p>Durchgehende, hauchdünne Schicht, unter UV schwarz - im HF kann die Schicht als Metallauflage identifiziert werden.</p> 
<p>Abb. 11 : Detail Metallauflage (50 : 1 VIS (links) UV (rechts))</p>	
	
<p>Abb. 12 : Detail Metallauflage (10 : 1 HF)</p>	
<p>3 Rötlich-braune Schicht</p>	<p>Durchgehende, dünne, rötlich-braune, homogene Schicht mit minimalen dunklen Partikelchen; unter UV schwarz</p> 
<p>Abb. 13 : Detail röt.-br. Schicht (50 : 1 UV (links) VIS (rechts))</p>	
<p>2 Grundierung</p>	<p>Durchgehende Grundierung mit mehrschichtigem Aufbau; im unteren Bereich gräulich, im oberen Bereich weiß erscheinend; unten sehr homogen (kaum Einschlüsse), oben mit wenigen Einschlüssen. Unter UV leichte Fluoreszenz zwischen einzelnen Aufträgen (augenscheinlich min. 5 Schichten); durchschnittliche Gesamtschichtdicke: ca. 660 µm (max. 815 µm); oberste, hellere Schicht: ca. 175 µm</p>

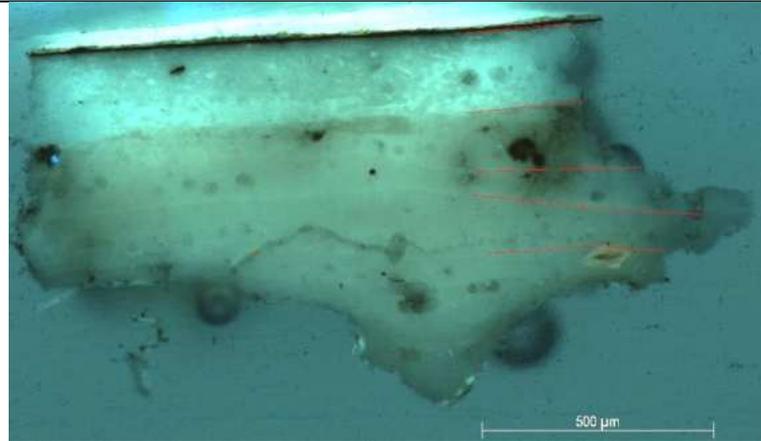


Abb. 14 : Detail Grundierung (5 :1 | UV (links) | VIS (rechts))

- | | | |
|---|----------------------|---|
| 1 | Transparente Schicht | Partielle, transparente, sehr dünne Schicht (vermutlich Bindemittel), unter UV bläulich fluoreszierend mit kleinen schwarzen Partikeln. |
|---|----------------------|---|

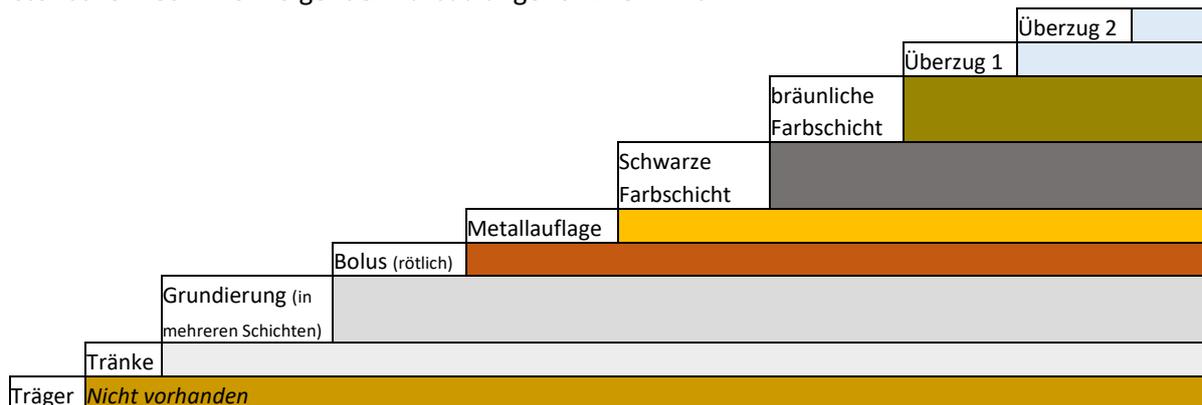


Abb. 15 : Detail fluoreszierende partielle Schicht (5 :1 | UV)

- | | | |
|---|--------|---|
| 0 | Träger | Kein Trägermaterial mit Probe entnommen |
|---|--------|---|

Interpretation:

Es handelt sich um 8 Schichten von denen anhand der mikroskopischen Untersuchung und bekannter historischer Techniken folgender Aufbau angenommen wird:



Es handelt sich höchstwahrscheinlich um eine mehrschichtige Grundierung auf einer vermutlich proteinischen Leimtränke des Trägers. Darauf liegt ein rötlicher Bolus auf dem eine goldene Blattmetallaufgabe angeschossen wurde. Darauf liegen zwei Farbschichten (schwarz und braun), die vermutlich als Patinierung der Vergoldung dienen sollten. Es liegen zwei Überzüge vor, ein dünnerer sowie ein recht dicker.

Probennummer	PF 2 – braune Malschicht
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Querschliff und GC-MS
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Theresa Hilger
Anschliffe und Fotos	Vanessa Klee
Protokoll	Theresa Hilger & Manuela Hörmann
Entnahmedatum	04.08.2022



Vorderseite: BLfD, Girogia Petta (2022)

Probenentnahmestelle



Detailsansicht Tafelbild mit markierter Probenstelle | Fotos: Diözesanmuseum, Walter Bayer (2021)



Detailsansicht mit markierter Probenstelle | Fotos: BLfD, Theresa Hilger (2022)

Die Probe wurde mit dem Skalpell und einer Pinzette entnommen.

Methode

Die Malschicht Probe wird mit dem Skalpell geteilt. Ein Teil der Probe wird zur Bindemittelanalyse an ein externes Labor versendet. Der zweite Teil der Probe wird in einer Silikonform eingebettet. Auf einer vorgefertigten Bodenplatte aus 20 min. gehärtetem Araldite® werden wenige Tropfen flüssiges Araldite® gegeben, um die Probe mit Pinzette und Skalpell darauf zu betten. Die Form wird anschließend bis zur Oberkante mit Araldite® aufgefüllt. Nach der 20-minütigen Trockenzeit unter Blaulicht wird die Probe grob angeschliffen (Trockenschleifpapier, Körnung P600) und danach mit micromesh Schleifpapier (Körnungen 1500 – 12000) aufpoliert.

Geräteinformationen

Der Anschliff der Probe wird mit dem Mikroskop Axiophot der Firma Zeiss, ausgestattet mit visuellem Licht¹ und UV-Strahlung (Kompaktlichtquelle HPX 120-UV²), verschiedenen Objektiven (5x 0.5HD, 10x 0.30HD, 20x 0.50HD, 50x) und Filtern im Auflicht betrachtet. Die Aufnahmen werden mit der Kamera AxioCam MRC5 und dem Computerprogramm AxioVision SE64 Rel. 4.9 angefertigt.

Folgende Abkürzungen werden bei der Beschreibung und Interpretation verwendet:

UV = ultraviolette Strahlung BP450-490nm (Filtersatz 15) | VIS = visuelles Licht | HF = Hellfeld | DF = Dunkelfeld | XPL = gekreuzte Polarisatoren | PPL = parallele Polarisatoren.

Ergebnisse und Fotodokumentation:

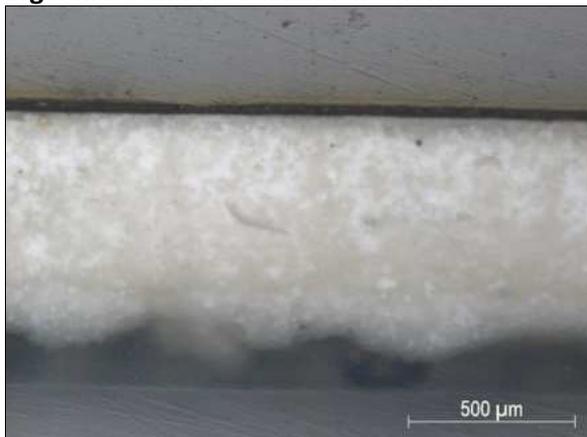


Abb. 1 : Gesamtansicht (5:1 | VIS Auflicht | DF)

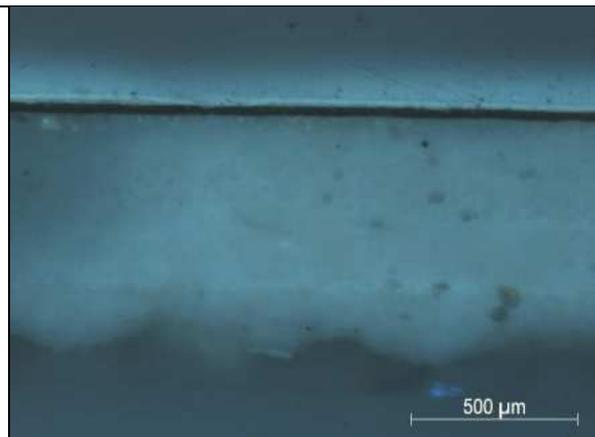


Abb. 2 : Gesamtansicht (5:1 | UV)

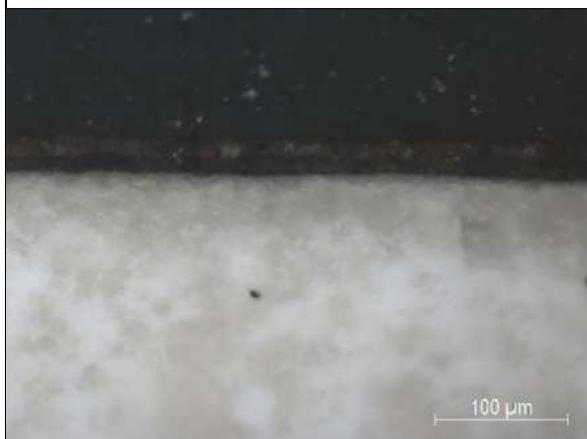


Abb. 3 : Detailansicht (20 :1 | VIS Auflicht | DF)

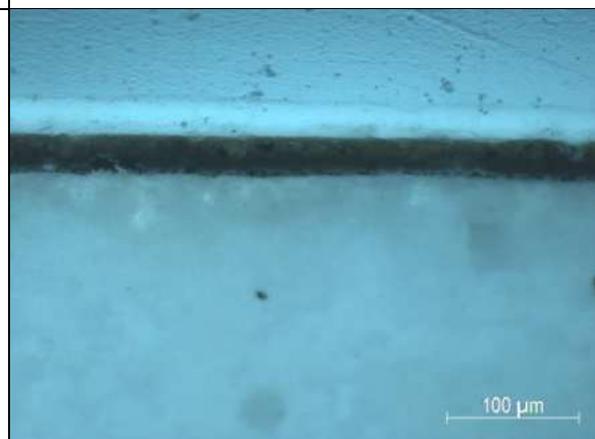


Abb. 4 : Detailansicht (20:1 | UV)

¹ Halogenlampe 12V / 100W.

² Quecksilberhöchststrahlungsquelle OSRAM HPX-R120W/45C UV.

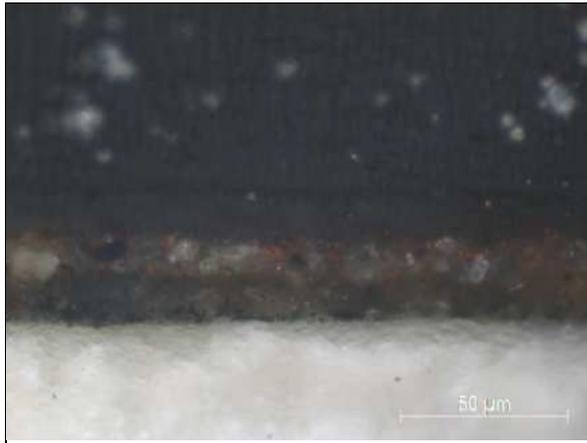


Abb. 5 : Detailansicht (50 :1 | VIS Auflicht | DF)

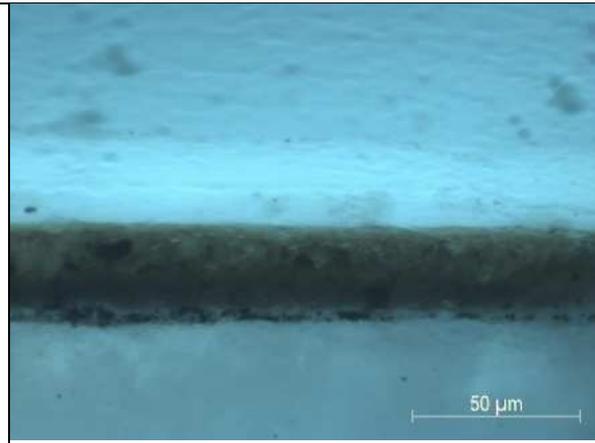


Abb. 6 : Detailansicht (50:1 | UV)

Nr.	Schicht	Beschreibung
7	Überzug 2	Durchgehende transparent bzw. dunkel erscheinende, dicke Schicht; unter UV bläulich fluoreszierend. Am oberen Rand eine sehr dunkle Ansammlung –vermutl. Schmutzschicht (siehe Nr. 7); durchschnittliche Schichtdicke: ca. 15 µm
6	Überzug 1	Durchgehende transparent bzw. dunkel erscheinende, dünne Schicht; unter UV bläulich fluoreszierend. Am oberen Rand eine sehr dünne dunkle Ansammlung (ggf. Schmutzschicht?); durchschnittliche Schichtdicke: ca. 9 µm

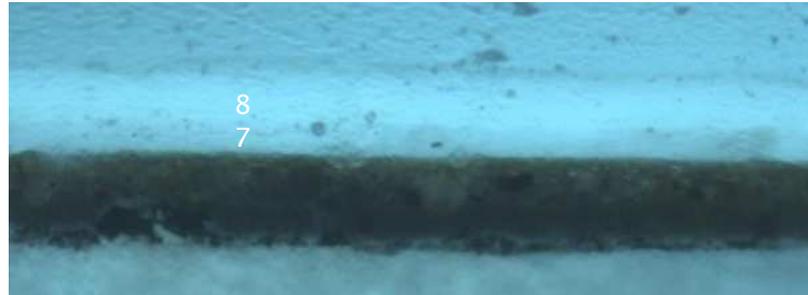


Abb. 7 : Detail Überzüge (20:1 | UV)

6	Reste von transp. Schicht	Kleine Bereiche mit dünner transp. Schicht; unter UV gelblich/bräunlich (fluoresz.?) – ggf. Reste eines alten Überzugs
5	Braune Schicht	Durchgehende, hellbraune Schicht mit roten, weißen und schwarzen Partikeln; unter UV braun mit Einschlüssen; vereinzelte große bläulich-grüne Partikel; durchschnittliche Schichtdicke: ca. 15 µm

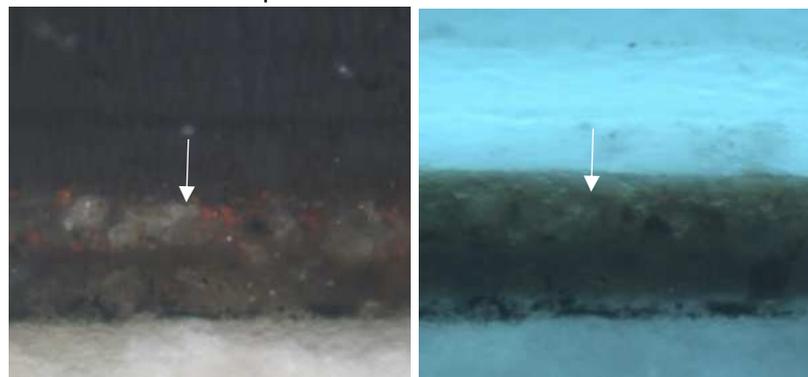
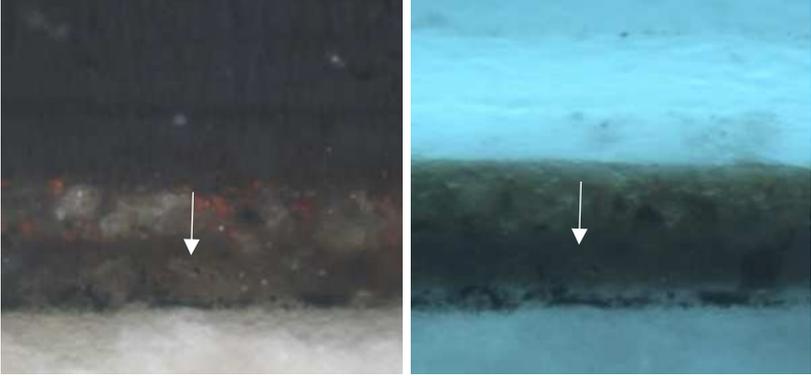
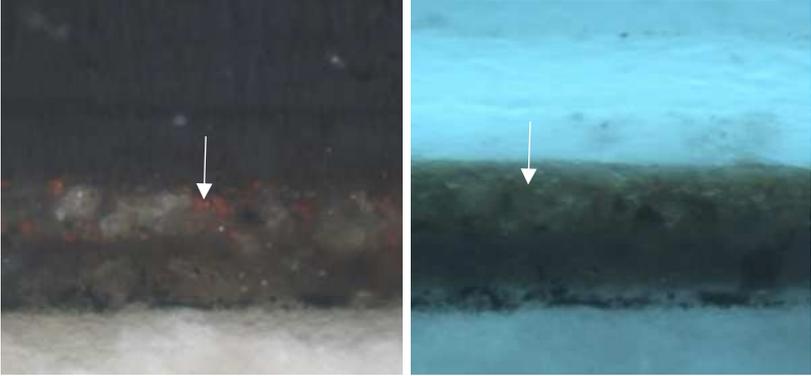


Abb. 8 : Detail braune Schicht (50 : 1 | VIS (links) | UV (rechts))

4	Dunkelbraune Schicht	Durchgehende, homogene, dunkelbraune Schicht (kaum Einschlüsse), unter UV sehr homogen und dunkel, durchschnittliche Schichtdicke: ca. 18 μm
		
Abb. 9 : Detail dunkelbraune Schicht (50 : 1 VIS (links) UV (rechts))		
3	dunkle Schicht	Partiell wirkende, sehr dünne und körnige, dunkle Schicht; unter UV schwarze, eingeschlossene Partikelchen, eingebettet in blau-grau fluoreszierende Schicht
		
Abb. 10 : Detail dunkle Schicht (20 : 1 VIS (links) UV (rechts))		
2	Grundierung	Durchgehende Grundierung mit mehrschichtigem Aufbau; im unteren 1/5 gräulich, darüber creme-weiß erscheinend; unten eher homogen (mit homogenen weißen Einschlüssen), oben ebenfalls mit weißen Einschlüssen, partiell aber auch verdichteten Bereichen. Unter UV fluoresziert der Übergang zwischen dem unteren 1/5 sowie den darüber liegenden Schichten bläulich; leichte Fluoreszenz zwischen einzelnen Aufträgen darüber (augenscheinlich min. 3 Schichten); durchschnittliche Gesamtschichtdicke: ca. 730 μm (max. 820 μm)

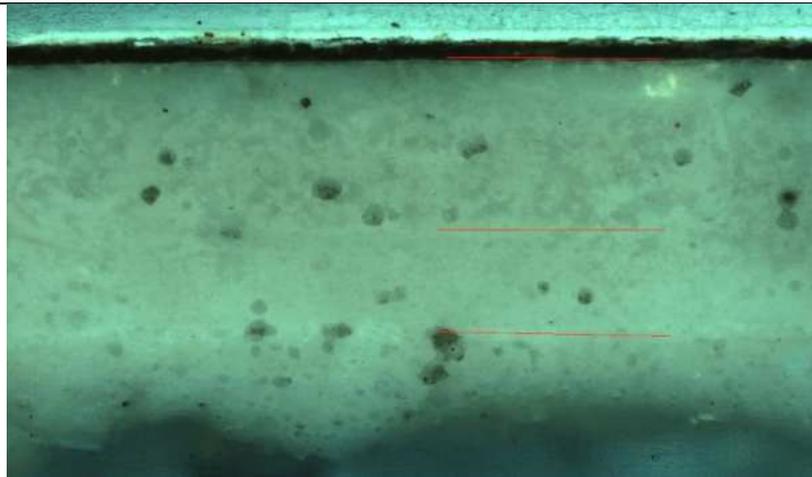


Abb. 11 : Detail Grundierung, Schichtgrenzen rot markiert (5 :1 | UV)

1	Transparente Schicht	Partielle, transparente, sehr dünne Schicht (vermutlich Bindemittel), unter UV bläulich fluoreszierend
---	----------------------	--

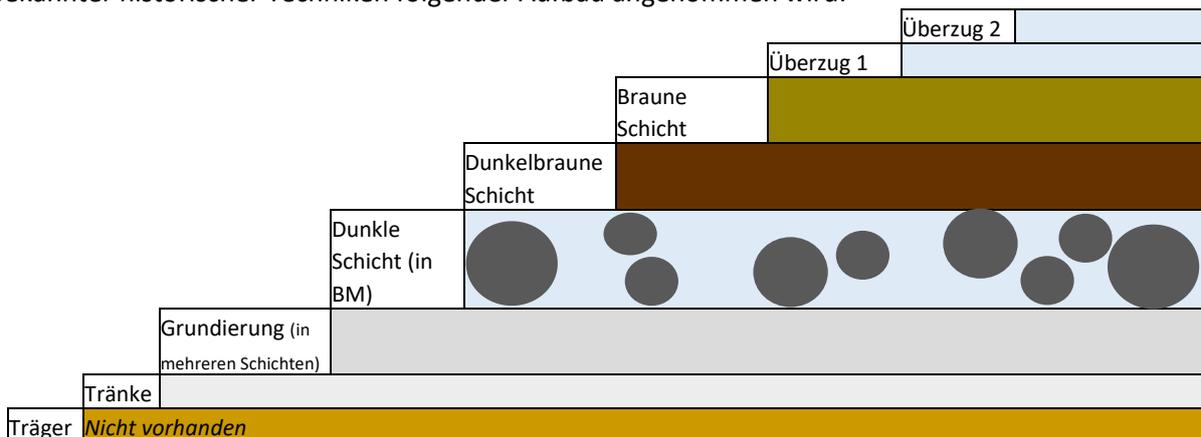


Abb. 12 : Detail fluoreszierende partielle Schicht (5 :1 | UV)

0	Träger	Kein Trägermaterial mit Probe entnommen
---	--------	---

Interpretation

Es handelt sich um 7 (bzw. 8) Schichten, von denen anhand der mikroskopischen Untersuchung und bekannter historischer Techniken folgender Aufbau angenommen wird:



Es handelt sich höchstwahrscheinlich um eine mehrschichtige Grundierung auf einer (vermutlich proteinischen) Leimtränke des Trägers. Darauf liegen schwarze Partikelchen – eingebettet in ein fluoreszierendes Bindemittel (ggf. eine Vorzeichnung?). Darauf liegen zwei Farbschichten (homogen dunkelbraun und braun mit Partikeln). Es liegen zwei Überzüge vor, ein dünnerer sowie ein recht dicker. Beide scheinen eine aufliegende Schmutzschicht aufzuweisen. Zwischen Malschicht und den Überzügen zeigen sich vereinzelt Reste eines transparenten Materials, möglicherweise handelt es sich hier um Reste eines früheren, bereits abgenommenen, Firnisses.

Probennummer	PF 3 – rosa Malschicht
Werkbezeichnung	Tafelbild Freising
Datierung	1495
Standort	Untere Domsakristei, Freising
Methode	Querschliff und GC-MS
AuftraggeberIn	BLfD, DBU-Projekt
Entnahme	Julia Brandt & Theresa Hilger
Anschliffe und Fotos	Vanessa Klee
Protokoll	Theresa Hilger
Entnahmedatum	04.08.2022

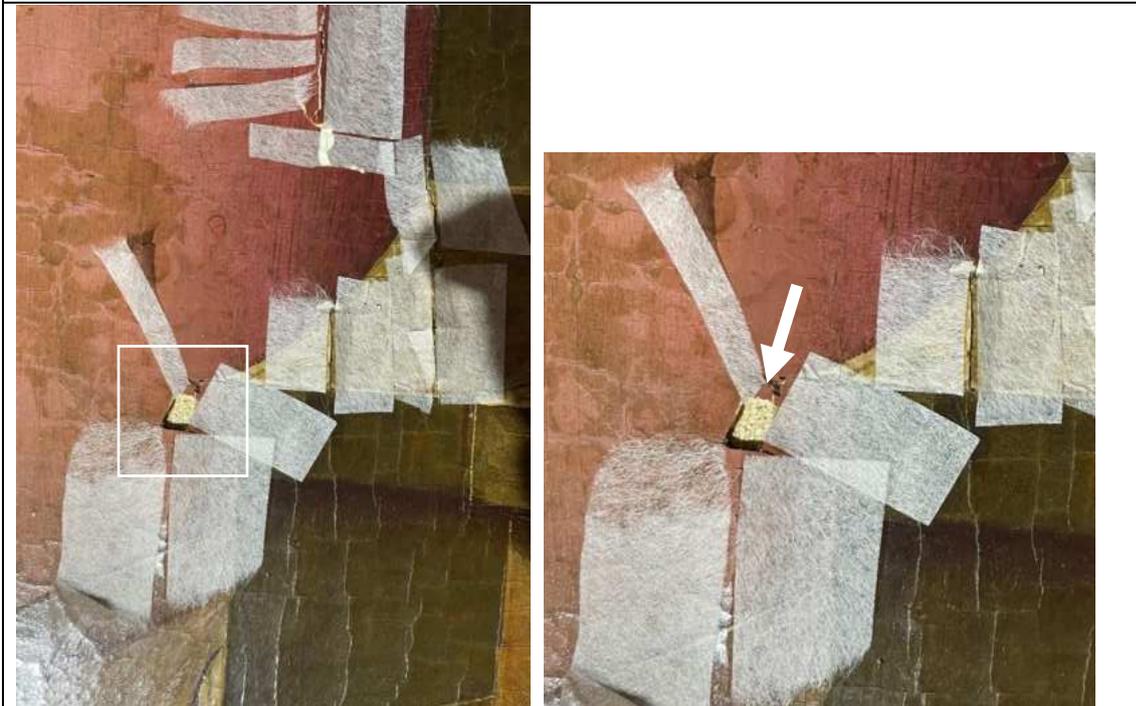


Vorderseite: BLfD, Giorgia Petta (2022)

Probenentnahmestelle



Detailsansicht Tafelbild mit markierter Probenstelle | Fotos: Diözesanmuseum, Walter Bayer (2021)



Detailsansicht mit markierter Probenstelle | Fotos: BLfD, Theresa Hilger (2022)

Die Probe wurde mit dem Skalpell und einer Pinzette entnommen.

Methode

Die Malschicht Probe wird mit dem Skalpell geteilt. Ein Teil der Probe wird zur Bindemittelanalyse an ein externes Labor versendet. Der zweite Teil der Probe wird in einer Silikonform eingebettet. Auf einer vorgefertigten Bodenplatte aus 20 min. gehärtetem Araldite® werden wenige Tropfen flüssiges Araldite® gegeben, um die Probe mit Pinzette und Skalpell darauf zu betten. Die Form wird anschließend bis zur Oberkante mit Araldite® aufgefüllt. Nach der 20 minutigen Trockenzeit unter Blaulicht wird die Probe grob angeschliffen (Trockenschleifpapier, Körnung P600) und danach mit micromesh Schleifpapier (Körnungen 1500 – 12000) aufpoliert.

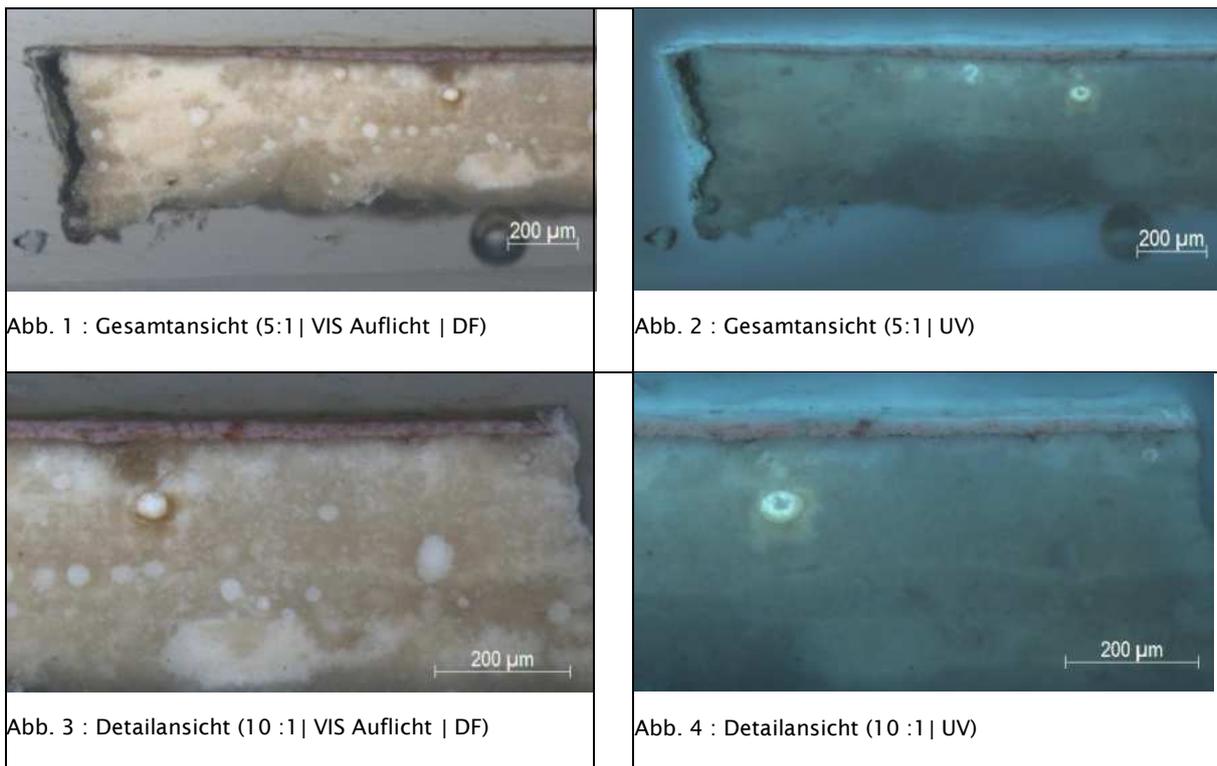
Geräteinformationen

Der Anschlag der Probe wird mit dem Mikroskop Axiophot der Firma Zeiss, ausgestattet mit visuellem Licht¹ und UV-Strahlung (Kompaktlichtquelle HPX 120-UV²), verschiedenen Objektiven (5x 0.5HD, 10x 0.30HD, 20x 0.50HD, 50x) und Filtern im Auflicht betrachtet. Die Aufnahmen werden mit der Kamera AxioCam MRC5 und dem Computerprogramm AxioVision SE64 Rel. 4.9 angefertigt.

Folgende Abkürzungen werden bei der Beschreibung und Interpretation verwendet:

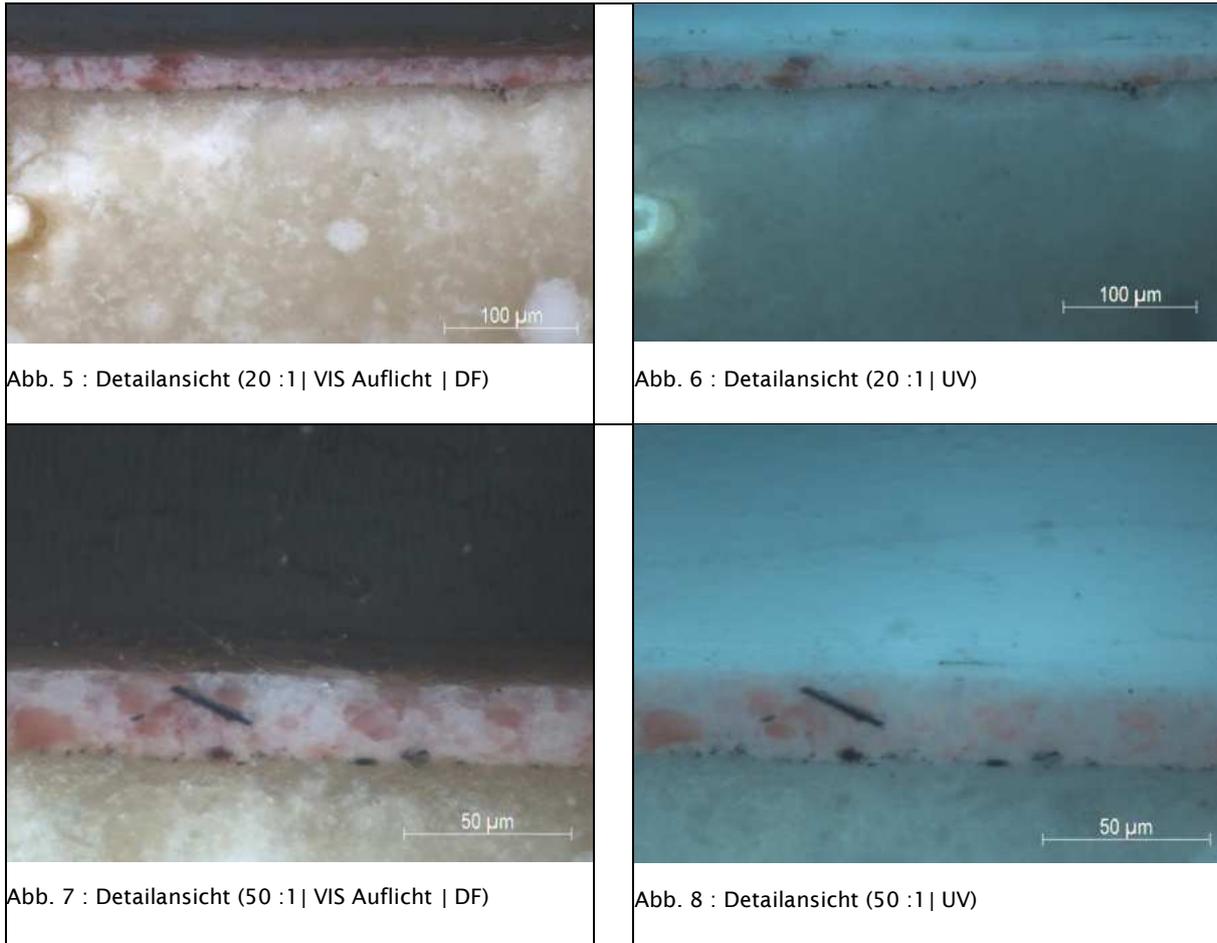
UV = ultraviolette Strahlung BP450-490nm (Filtersatz 15) | VIS = visuelles Licht | HF = Hellfeld | DF = Dunkelfeld | XPL = gekreuzte Polarisatoren | PPL = parallele Polarisatoren.

Ergebnisse und Fotodokumentation:



¹ Halogenlampe 12V / 100W.

² Quecksilberhöchstdrucklampe OSRAM HPX-R120W/45C UV.



Nr.	Schicht	Beschreibung
6	Überzug 2	Durchgehende transparent bzw. dunkel erscheinende, dicke Schicht; unter UV bläulich fluoreszierend. Am oberen Rand eine sehr dunkle Ansammlung –vermutl. Schmutzschicht (siehe Nr. 5); durchschnittliche Schichtdicke: ca. 17 μm
5	Überzug 1	Durchgehende transparent bzw. dunkel erscheinende, dünne Schicht; unter UV bläulich fluoreszierend. Am oberen Rand eine sehr dünne dunkle Ansammlung (ggf. Schmutzschicht?); durchschnittliche Schichtdicke: ca. 8 μm
<p>Abb. 9 : Detail Überzüge (50 : 1 UV)</p>		
4	Rosafarbene Schicht	Durchgehende, inhomogene rosa Schicht mit zahlreichen rötlichen Einschlüssen/orange-roten Partikeln; unter UV fluoreszierend; durchschnittliche Schichtdicke: 23 μm

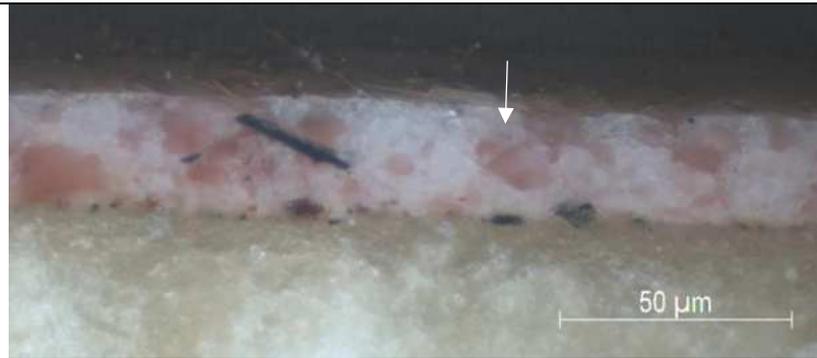


Abb. 10 : Detail rosa Schicht (50 : 1 | VIS)

- | | | |
|---|----------------|--|
| 3 | dunkle Schicht | Partiell wirkende, sehr dünne und körnige, dunkle Schicht mit schwarzen und roten Partikeln; unter UV schwarze/rote Partikel, eingebettet in blau-grau fluoreszierende Schicht |
|---|----------------|--|



Abb. 11 : Detail dunkle Schicht (10 : 1 | VIS (links) | UV (rechts))

- | | | |
|---|-------------|--|
| 2 | Grundierung | Durchgehende Grundierung mit mehrschichtigem Aufbau; im unteren 1/5 gräulich, darüber creme-weiß erscheinend; unten eher homogen (mit homogenen weißen Einschlüssen), oben ebenfalls mit weißen Einschlüssen, partiell aber auch verdichteten Bereichen. Unter UV leichte Fluoreszenz zwischen den einzelnen Aufträgen (augenscheinlich ca. 5-6 Schichten), durchschnittliche Gesamtschichtdicke: ca. 420 µm |
|---|-------------|--|

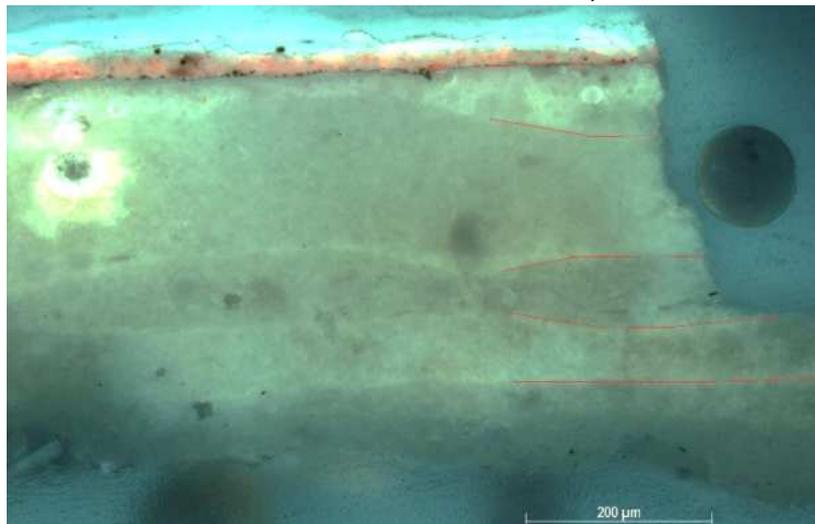


Abb. 12 : Detail Grundierung (5 : 1 | VIS (links) | UV (rechts))

- | | | |
|---|----------------------|--|
| 1 | Transparente Schicht | Partielle, transparente, sehr dünne Schicht (vermutlich Bindemittel), unter UV bläulich fluoreszierend |
|---|----------------------|--|

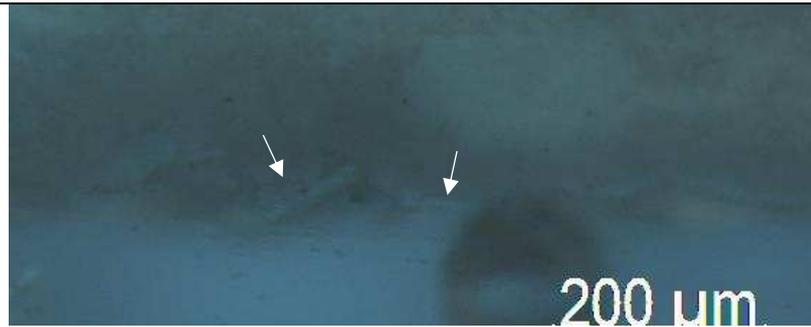
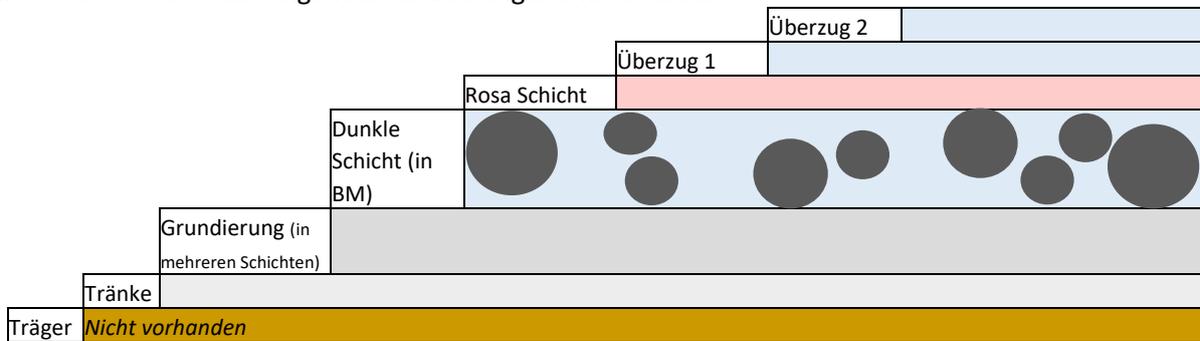


Abb. 13 : Detail fluoreszierende partielle Schicht (5 :1 | UV)

0 Träger Kein Trägermaterial mit Probe entnommen

Interpretation:

Es handelt sich um 6 Schichten von denen anhand der mikroskopischen Untersuchung und bekannter historischer Techniken folgender Aufbau angenommen wird:



Es handelt sich höchstwahrscheinlich um eine mehrschichtige Grundierung auf einer vermutlich proteinischen Leimtränke des Trägers. Darauf liegen schwarze Partikelchen – eingebettet in ein fluoreszierendes Bindemittel (ggf. eine Vorzeichnung?). Darauf liegen zwei Farbschichten (homogen dunkelbraun und braun mit Partikeln). Es liegen zwei Überzüge vor, ein dünnerer sowie ein recht dicker. Beide scheinen eine aufliegende Schmutzschicht aufzuweisen.

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege

Referat Z V
Zentrallabor und Geo-Erkundung

Hofgraben 4
80539 München

Tel. 089/2114-320
E-Mail: Markus.Roos@blfd.bayern.de

26.01.2023

**Reg.-Bez. Oberbayern,
Landkreis Freising,
Stadt Freising,
Domsakristei**

D-1-78-124-43

Hier: Farbmateriale- und Bindemittelanlysen zum Abendmahl-Holztafelbild

1	Anlass der Untersuchung.....	2
2	Gegenstände und Fragestellung	2
3	Untersuchungen	7
3.1	Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR).....	7
3.2	Energiedispersive Röntgenspektroskopie am Rasterelektronenmikroskop (REM-EDX)	11
4	Diskussion	22
4.1	FTIR-Analysen	22
4.2	REM-EDX-Analysen.....	25
5	Zusammenfassung	26

1 Anlass der Untersuchung

Das großformatige Abendmahl-Holztafelbild in der unteren Domsakristei in Freising (siehe Abbildung 1), welches 1495 von Hans Mair v. Landshut als Altaraufsatz angefertigt wurde, dient im Rahmen eines von der DBU geförderten wissenschaftlichen Forschungsprojekts als Fallbeispiel für die Erforschung schädlicher Auswirkungen von Trockenheit auf Kulturgüter und mögliche Ansätze zu deren Restaurierung. Das Holztafelbild ist im Laufe der letzten Jahrzehnte aufgrund des trockenen Raumklimas in der Sakristei geschrumpft. Der in seinen Dimensionen verkleinerte Holzträger verübt dadurch erhebliche Spannungen auf die darüber befindliche Malschicht, wodurch sich diese bereits an vielen Stellen teils erheblich abhebt und in Schollen aufstellt. Langfristiges Ziel des Forschungsprojekts soll daher die kontrollierte Wiederbefeuchtung und damit verbundene Ausdehnung der Holztafel sein, um unwiederbringliche Fassungsverluste am kulturhistorisch wertvollen Tafelbild zu vermeiden.



Abbildung 1: Holztafelbild in der unteren Domsakristei Freising (Bild: Diözesanmuseum Freising, Walter Bayer, 2021).

Um die geplante Befeuchtung so kontrolliert und materialverträglich wie möglich zu gestalten, soll zunächst das Verhalten von Referenzmustern des Tafelbilds unter systematischer Klimatisierung und Befeuchtung genau beobachtet und erforscht werden. Daneben sollen auch hygrothermischen Simulationen der Tafelbildmaterialien erfolgen, um deren Ausdehnungsverhalten bei Befeuchtung bestmöglich vorherzusagen. Zur Vorbereitung beider Verfahren müssen im ersten Schritt die Materialien des Tafelbilds analysiert werden. Zu diesem Zweck wurden am 25.10.2022 bei einem Ortstermin von Theresa Hilger (BLfD, Referat A V), Manuela Hörmann (BLfD, Referat A V) und dem Berichtverfasser mehrere Materialproben am Holztafelbild entnommen und im Zentrallabor zur Materialanalyse eingereicht.

2 Gegenstände und Fragestellung

In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die genauen Probeentnahmestellen der eingereichten Materialproben am Holztafelbild dargestellt. Zur Analyse des Holzüberzugs auf der Tafelrückseite wurden dort insgesamt zwei Schabeprobe entnommen (Proben PB 1 und PB 2, siehe Abbildung 2). An den entsprechenden Stellen befanden sich jeweils getrocknete tropfenförmige Ansammlungen des aufgetragenen Überzugs, welche sich dort vermutlich

unmittelbar nach Auftragung gebildet haben. Aus diesem Grund konnte dort relativ leicht das für die Analyse benötigte Probenmaterial extrahiert werden (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).

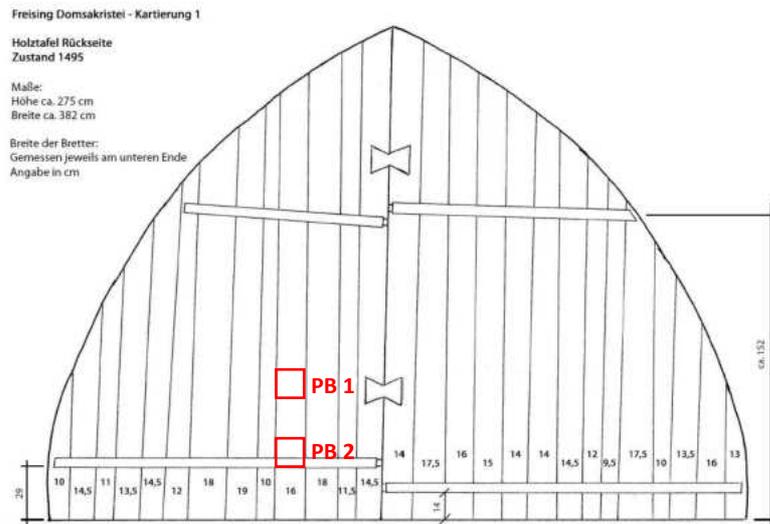


Abbildung 2: Kartierung der Probeentnahmestellen auf der Holztafelrückseite (Bild: Restaurierungswerkstatt Landskron, 2016).



Abbildung 3: Kartierung der Probeentnahmestellen auf der Tafelbildvorderseite (Bild: BLfD, Giorgia Petta, 2022).

In Abbildung 3 sind die Probeentnahmestellen auf der Tafelbildvorderseite dargestellt. Wie zu Beginn erwähnt, sollen bei den Untersuchungen v. a. die im Tafelbild verwendeten Materialien, insbesondere die eingesetzten Binde- und Farbmittel, bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden an zentraler Position des Bildes mehrere Materialproben entnommen. Bei der Wahl der Probenentnahmestelle wurde zum einen darauf geachtet, dass ein im Gesamtbild häufig vorkommender Farbton vorliegt. Auf diese Weise soll die Repräsentanz der Untersuchungsergebnisse erhöht werden. Zum anderen sollten an der entsprechenden Stelle möglichst keine Überarbeitungen im Zuge zurückliegender Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt worden sein, um möglichst die originalen Bildmaterialien zu analysieren. Die entsprechend gewählte Probenentnahmestelle befindet sich darstellungsbezogen an einem Architekturelement mit dunkelbrauner bis grünlicher Farbgebung und wies zum Zeitpunkt der Beprobung bereits eine erhebliche Schollenbildung mit stellenweiser Abplatzungserscheinung auf

(siehe Abbildung 3 und Abbildung 6). Dementsprechend wurde die Schadstelle bereits durch vorherige Restaurierungsmaßnahmen u. a. durch Aufbringen von Japanpapier notgesichert. Zur Ermittlung der genauen Schichtabfolge und deren elementarer Zusammensetzung an der gewählten Entnahmestelle wurde zunächst eine Farbscholle mit komplettem Schichtaufbau (Probe PB 3) entnommen. Neben der entsprechenden Untersuchung unter dem Rasterelektronenmikroskop soll aus dieser Farbscholle darüber hinaus auch das Probenmaterial für eine schwingungsspektroskopische Analyse der Malschicht gewonnen werden. In Abbildung 7 ist eine lichtmikroskopische Aufnahme der Vorder- und Rückseite der entnommenen Fassungssprobe dargestellt. Anschließend wurde an gleicher Stelle eine Schabeprobe der sich darunter bzw. daneben befindlichen hellen Grundierungsschicht entnommen (Probe PB 4).



Abbildung 4: Aufnahmen der Probeentnahmestelle der Überzugsschabeprobe PB 1 auf der Holztafelrückseite (Bild: BLfD, Theresa Hilger, 2022).

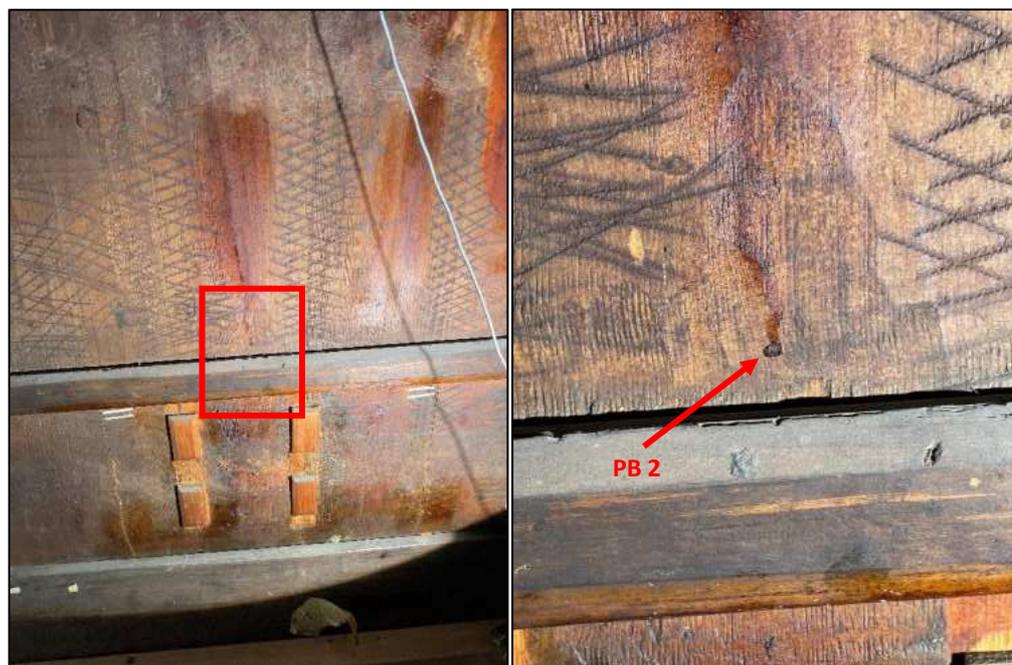


Abbildung 5: Aufnahmen der Probeentnahmestelle der Überzugsschabeprobe PB 2 auf der Holztafelrückseite (Bild: BLfD, Theresa Hilger, 2022).



Abbildung 6: Aufnahmen der Probeentnahmestelle der Fassungsscholle PB 3 und der Grundierungsschabeprobe PB 4 auf der Tafelbildvorderseite (Bild: BLfD, Theresa Hilger, 2022).

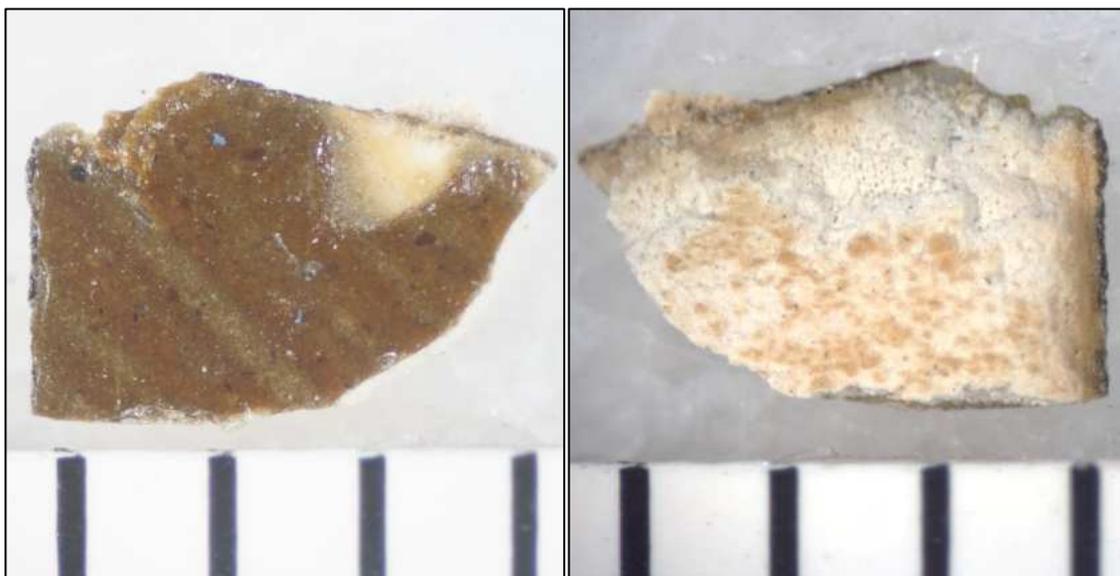


Abbildung 7: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Vorder- (links) und Rückseite (rechts) der entnommenen Fassungsscholle (Probe PB 3) mit Millimetermaßstab in den unteren Bildbereichen.

Weiterhin wurde unmittelbar neben der Probeentnahmestelle von PB 3 und PB 4 eine Schabeprobe des Firnisses (Probe PB 5) entnommen, um diese hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung zu untersuchen (siehe Abbildung 8). Vor Ort wurden darüber hinaus auch Löslichkeitsversuche am Firnis mit einem mit reinem Ethanol getränkten Wattestäbchen in unmittelbarer Nähe zur Entnahmestelle von PB 5 durchgeführt. Hierbei zeigte der Überzug eine mindestens partielle Löslichkeit durch sofortiges Eintrüben an den entsprechend behandelten Stellen. Ein vollständiges Ablösen des Firnisses gelang jedoch auch durch mehrmaliges Überstreichen augenscheinlich nicht.

Wie in Abbildung 9 dargestellt, wurde neben den oben beschriebenen Materialproben auf der Rück- sowie Vorderseite des Holztafelbilds noch eine Schabeprobe des Überzugs auf dem Holzrahmen entnommen (Probe PB 7). Diese soll, analog zu den anderen extrahierten Schabeproben, schwingungsspektroskopisch analysiert werden, um nach Möglichkeit die darin enthaltenen chemischen Verbindungen zu identifizieren. In Abbildung 10

sind lichtmikroskopische Aufnahmen der Probe PB 7 dargestellt. Diese zeigt unter Vergrößerung einen klar zweischichtigen Aufbau. Auf der äußeren Seite kann eine leicht vergilbte und spröde Schicht beobachtet werden. Auf der inneren Seite liegt eine farblose und in ihrer Konsistenz eher zähe Schicht vor.

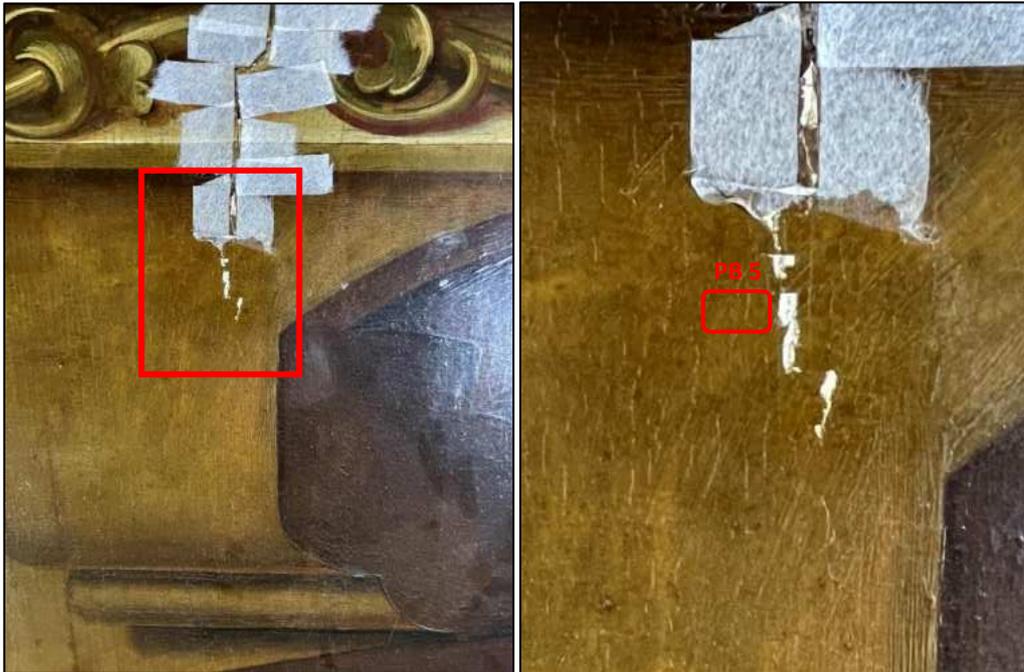


Abbildung 8: Aufnahmen der Probeentnahmestelle der Überzugsschabprobe PB 5 auf der Tafelbildvorderseite (Bild: BLfD, Theresa Hilger, 2022):



Abbildung 9: Aufnahmen der Probeentnahmestelle der Überzugsschabprobe PB 7 auf dem Bildrahmen (Bild: BLfD, Theresa Hilger, 2022):

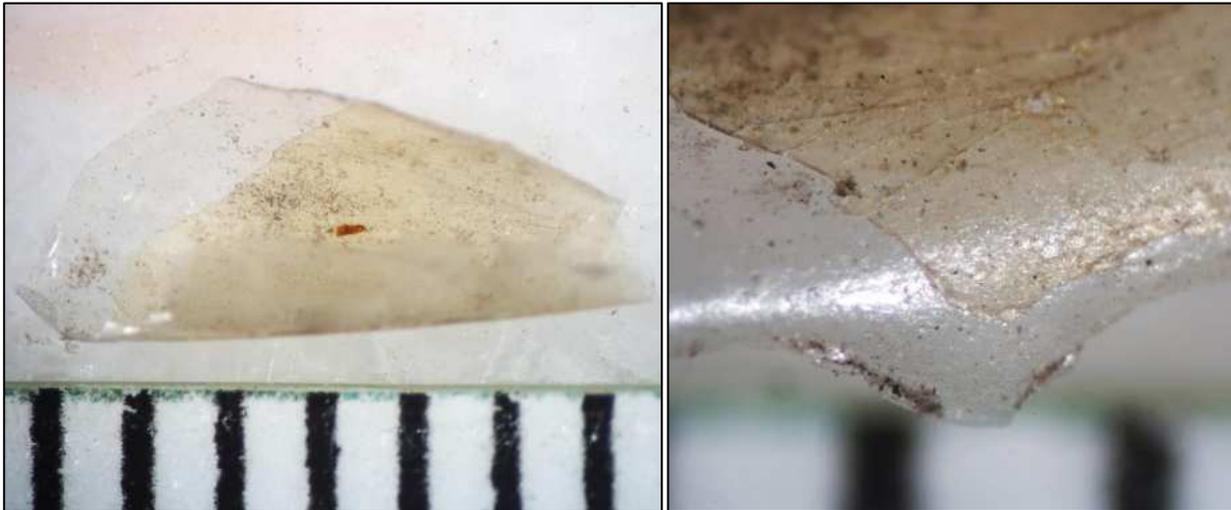


Abbildung 10: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Rahmenüberzugsprobe PB 7 mit Millimetermaßstab in den unteren Bildbereichen.

3 Untersuchungen

3.1 Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR)

Zur Ermittlung der in den Probenmaterialien vorliegenden chemischen Verbindungen wurden diese im Zentrallabor des BLfD durch den Berichtverfasser schwingungsspektroskopisch mithilfe des LUMOS FTIR-Mikroskops der Firma Bruker Corp. aus Billerica (Massachusetts, USA) analysiert. Die Messungen erfolgten je nach Probenmaterial entweder im Transmissionsmodus oder im Modus der abgeschwächten Totalreflexion (ATR). Alle Messungen erfolgten im Bereich von $4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$ mit einer spektralen Auflösung von 4 nm . Die entsprechenden FTIR-Spektren wurden durch Mittelung über je 128 Einzelmessungen erhalten und, falls angegeben, durch einfache lineare Grundlinienkorrektur angepasst.

Wie in Abbildung 11 und Abbildung 12 angegeben, konnten bei der Probenvorbereitung von Probe PB 1 unter einem Stereomikroskop zwei Schichten ausgemacht werden. Beide Schichten wurden voneinander getrennt und jeweils einzeln schwingungsspektroskopisch analysiert. In Abbildung 11 ist das entsprechende Spektrum der unteren Schicht dargestellt, an der sich noch einzelne Holzfasern der Holztafel befanden. In Abbildung 12 ist das aufgenommene Spektrum der äußeren Schicht abgebildet.

Für die FTIR-Analyse der Malschicht aus der Farbscholle (siehe Abbildung 14) wurde die entsprechende Schicht zunächst aus Probe PB 3 unter einem Stereomikroskop freipräpariert. Anschließend wurde das freipräparierte Analysenmaterial analog zu den anderen Proben unter dem FTIR-Mikroskop untersucht.

Wie bereits im Abschnitt 2 erläutert, konnten auch bei der optischen Begutachtung der Rahmenüberzugsprobe PB 7 zwei Schichten unter dem Stereomikroskop identifiziert und im Zuge der Probenvorbereitung separiert werden. In Abbildung 17 ist das aufgenommene FTIR-Spektrum der unteren, holzanliegenden Schicht und in Abbildung 18 das entsprechende Spektrum der äußeren Schicht dargestellt.

Im Folgenden sind die erhaltenen FTIR-Spektren zu den einzelnen Materialproben zusammen mit den unter den angegebenen Messbedingungen aufgenommenen Spektren der Referenzproben aus dem Bestand des Zentrallabors aufgeführt. Beim Vergleich zweier Spektren mit signifikant unterschiedlichen Absorptionsintensitäten, welche bspw. durch unterschiedliche Messmodi bedingt sind, werden beide Spektren aufgrund besserer Vergleichbarkeit normiert dargestellt.

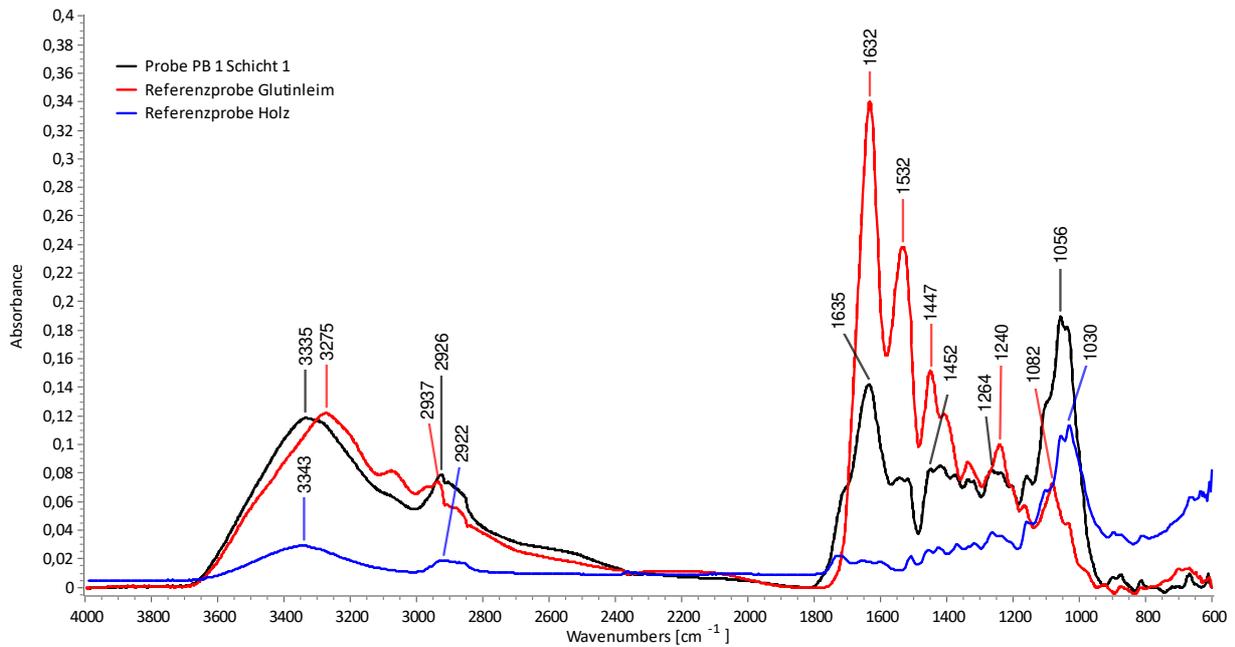


Abbildung 11: FTIR-Spektrum von Probe PB 1 Schicht 1 (Holzüberzug Rückseite, schwarz), sowie Referenzspektren von Glutinelim (rot) und Holz (blau). Alle Spektren wurden im ATR-Modus gemessen. Das Proben- und Glutinelimspektrum wurden zusätzlich grundlinienkorrigiert.

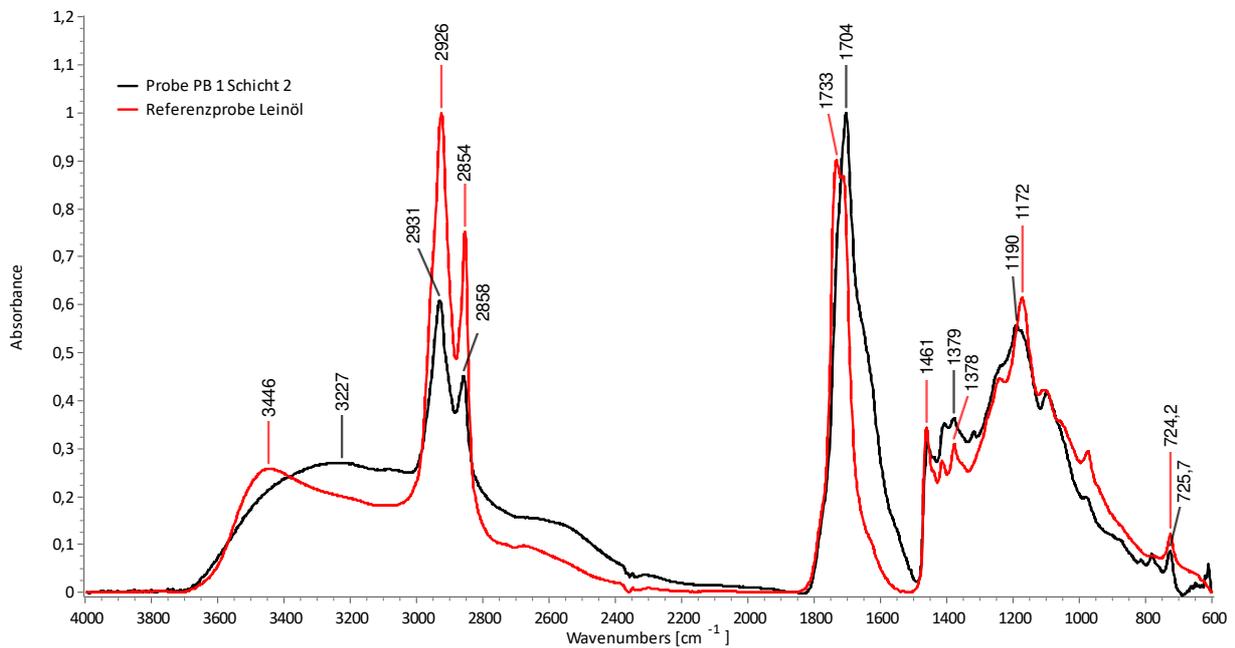


Abbildung 12: FTIR-Spektrum von Probe PB 1 Schicht 2 (Holzüberzug Rückseite, schwarz) und Referenzspektrum von Leinöl (rot). Die Spektren wurden jeweils im ATR-Modus gemessen und grundlinienkorrigiert.

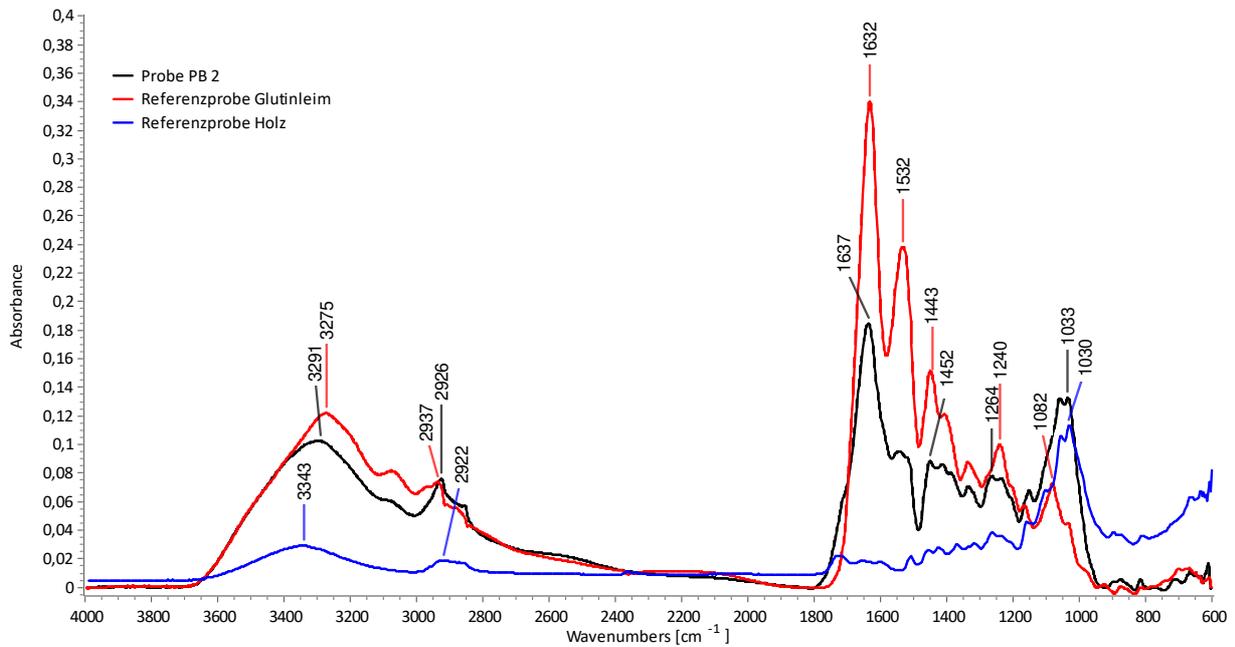


Abbildung 13: FTIR-Spektrum von Probe PB 2 (Holzüberzug Rückseite, schwarz), sowie Referenzspektren von Glutinleim (rot) und Holz (blau). Alle Spektren wurden im ATR-Modus gemessen. Das Proben- und Glutinleimspektrum wurden zusätzlich grundlinienkorrigiert.

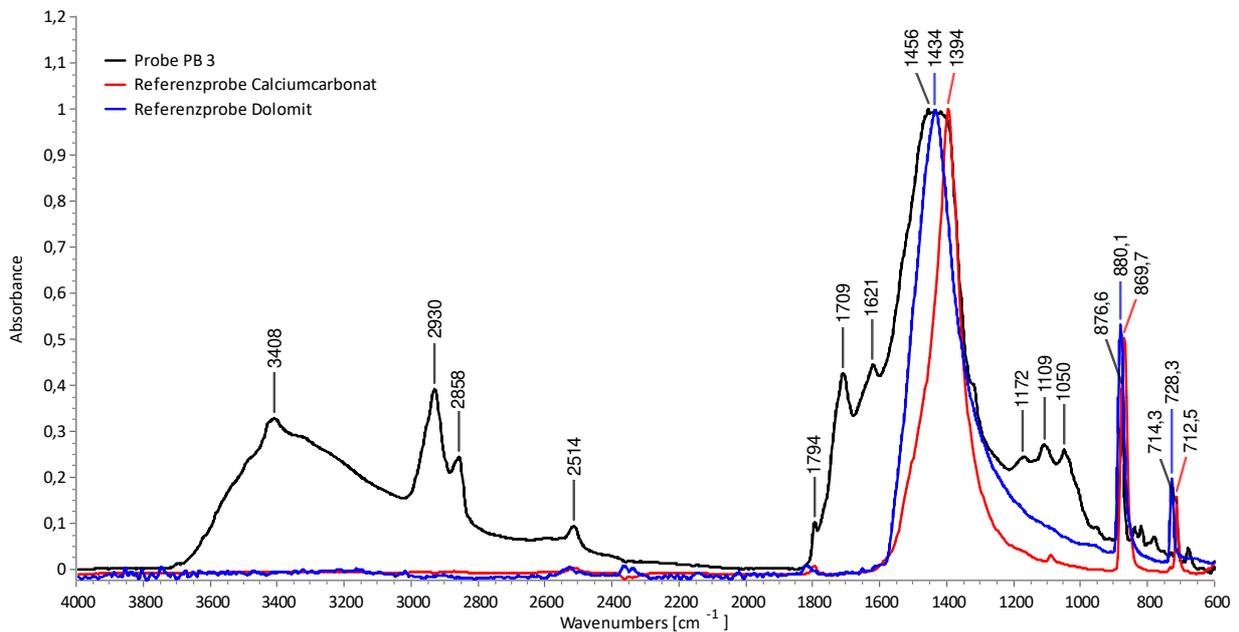


Abbildung 14: Normierte Darstellung des FTIR-Spektrums von Probe PB 3 (Farbscholle, schwarz), sowie der Referenzspektren von Calciumcarbonat (rot) und Dolomit (blau). Das Probenspektrum wurde im Transmissionsmodus und die Referenzspektren im ATR-Modus gemessen. Alle Spektren wurden grundlinienkorrigiert. Während der Aufnahme des Probenspektrums befand sich der MCT-Detektor stellenweise im Sättigungsbereich, weshalb die Spitze der Carbonatschwingungsbande im Bereich von 1460 – 1390 cm^{-1} nicht aufgelöst werden konnte.

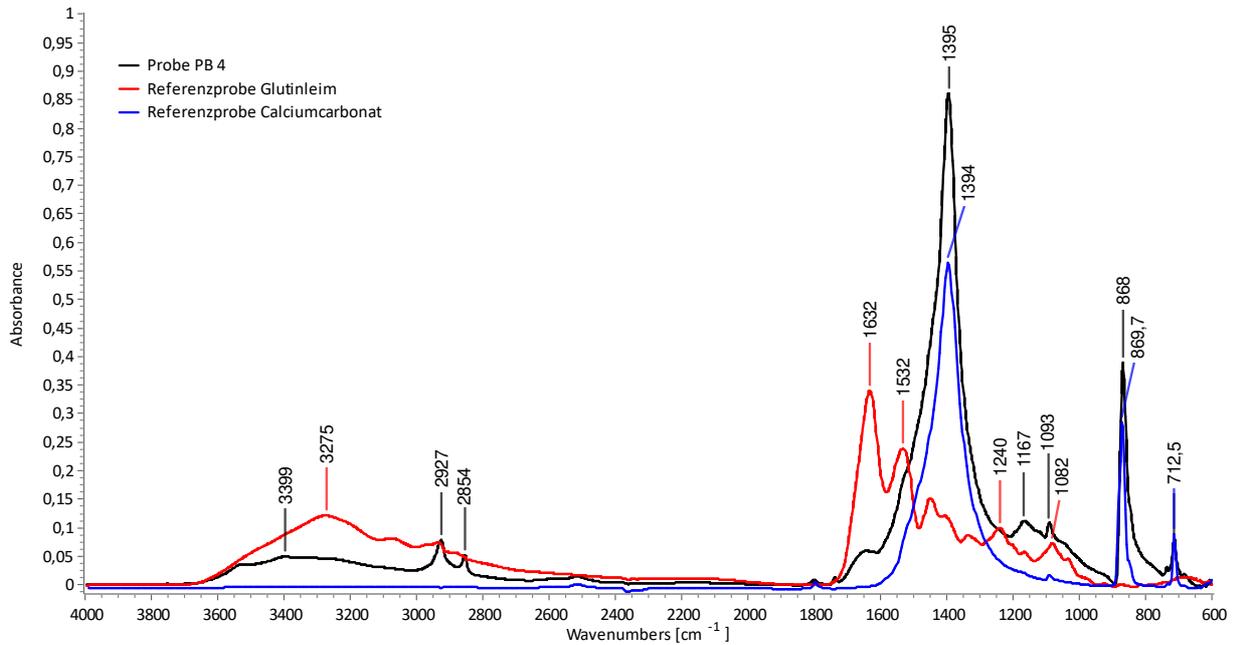


Abbildung 15: FTIR-Spektrum von Probe PB 4 (Grundierung, schwarz), sowie Referenzspektren von Glutulinleim (rot) und Calciumcarbonat (blau). Alle Spektren wurden jeweils im ATR-Modus gemessen und grundlinienkorrigiert.

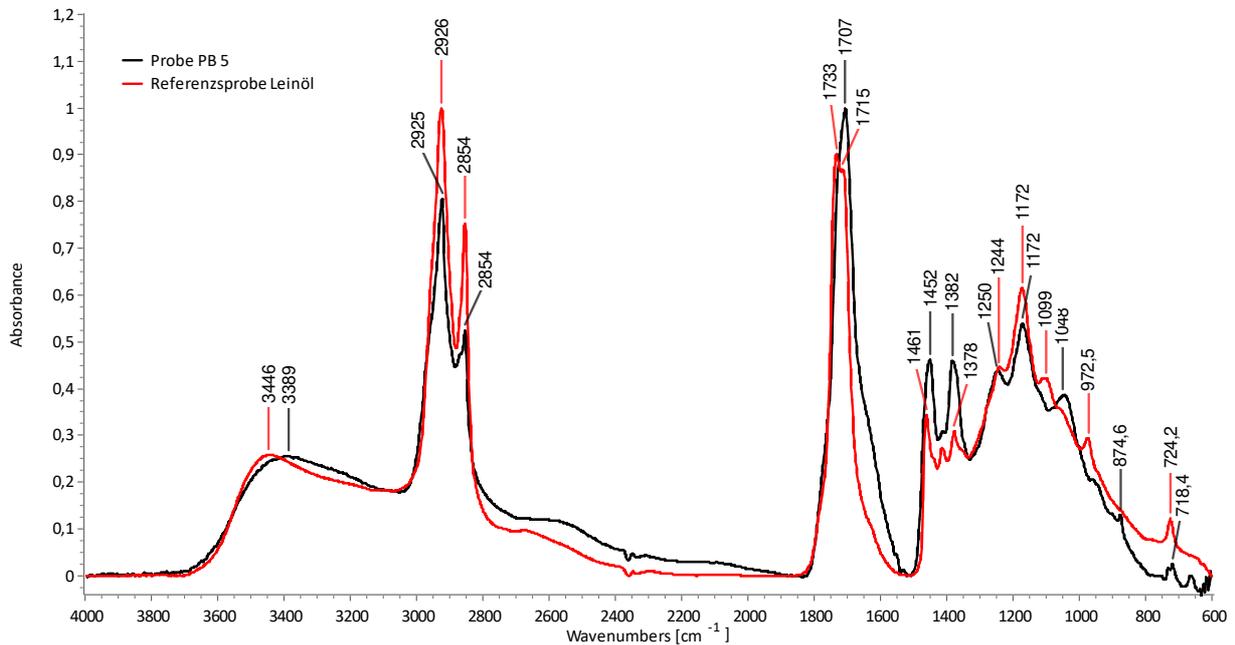


Abbildung 16: Normierte Darstellung des FTIR-Spektrums von Probe PB 5 (Firniss, schwarz) und des Referenzspektrums von Leinöl (rot). Das Probenspektrum wurde im ATR-Modus und das Referenzspektrum im Transmissionsmodus gemessen. Alle Spektren wurden grundlinienkorrigiert.

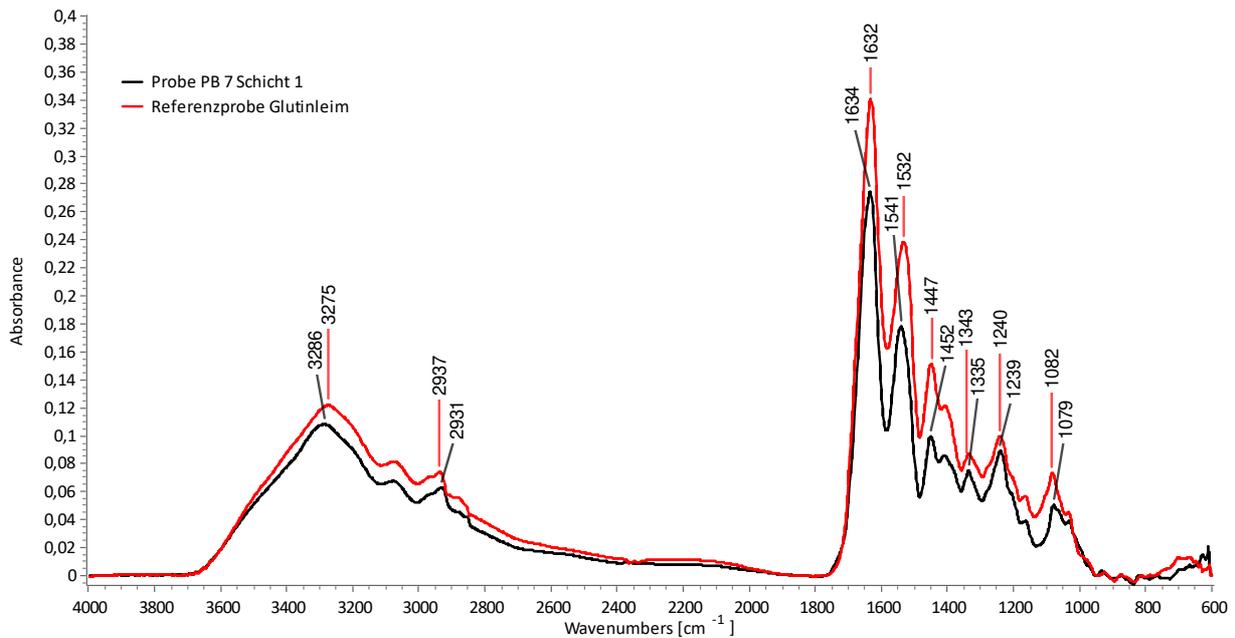


Abbildung 17: FTIR-Spektrum von Probe PB 7 Schicht 1 (Rahmenüberzug, schwarz) und Referenzspektrum von Glutinleim (rot). Alle Spektren wurden jeweils im ATR-Modus gemessen und grundlinienkorrigiert.

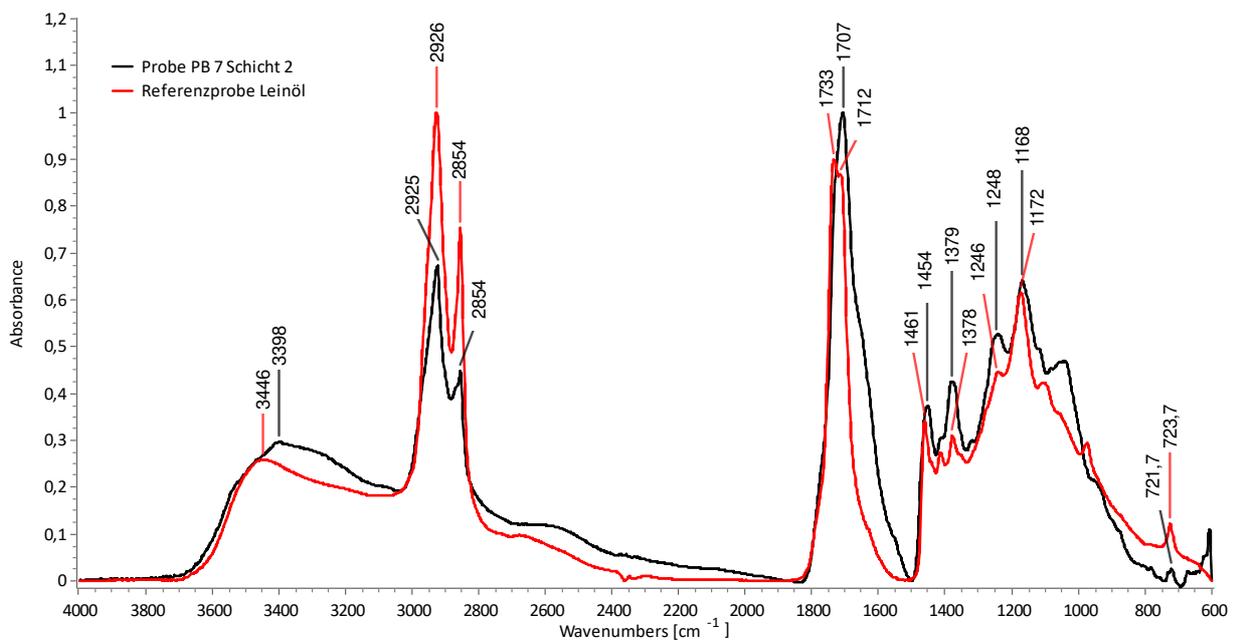


Abbildung 18: Normierte Darstellung des FTIR-Spektrums von Probe PB 7 Schicht 2 (Rahmenüberzug, schwarz) und des Referenzspektrums von Leinöl (rot). Das Probenspektrum wurde im ATR-Modus und das Referenzspektrum im Transmissionsmodus gemessen. Alle Spektren wurden grundlinienkorrigiert.

3.2 Energiedispersive Röntgenspektroskopie am Rasterelektronenmikroskop (REM-EDX)

Zur Ermittlung des genauen Schichtaufbaus von Fassungsprobe PB 3, sowie der elementanalytischen Zusammensetzung der einzelnen Schichten von PB 3 wurde ein entsprechendes Probenfragment von Simon Mindermann (BLfD, Z V) zunächst als Querschliff präpariert. Hierfür wurde das Fragment in Methacrylatharz (Technovit 2000 LC der Firma Kulzer aus Hanau) unter vermindertem Druck eingebettet und anschließend durch Anschleifen und Polieren als Querschliff angefertigt. Die Analyse des Querschliffs erfolgte ebenfalls durch Simon Mindermann unter dem Zeiss EVO 15 Rasterelektronenmikroskop (REM) der Firma Carl Zeiss Microscopy aus Oberkochen im Rückstreuelektronenmodus (BSE) und mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX). Als

Beschleunigungsspannung des Elektronenstrahls wurden dabei jeweils 20,0 kV angelegt. Im Folgenden sind in Abbildung 19 eine lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme eines Teils des eingebetteten Fragments und in Abbildung 20 eine REM-BSE-Aufnahme mit den kartierten EDX-Messbereichen abgebildet. Daran anschließend sind die aufgenommenen EDX-Spektren aufgeführt.



Abbildung 19: Ausschnitt aus der lichtmikroskopischen Aufnahme des in Acrylharz eingebetteten Querschliffs von Fassungsprobe PB 3. Die Markierung zeigt den ungefähren Aufnahmebereich der REM-BSE-Messung in Abbildung 20.

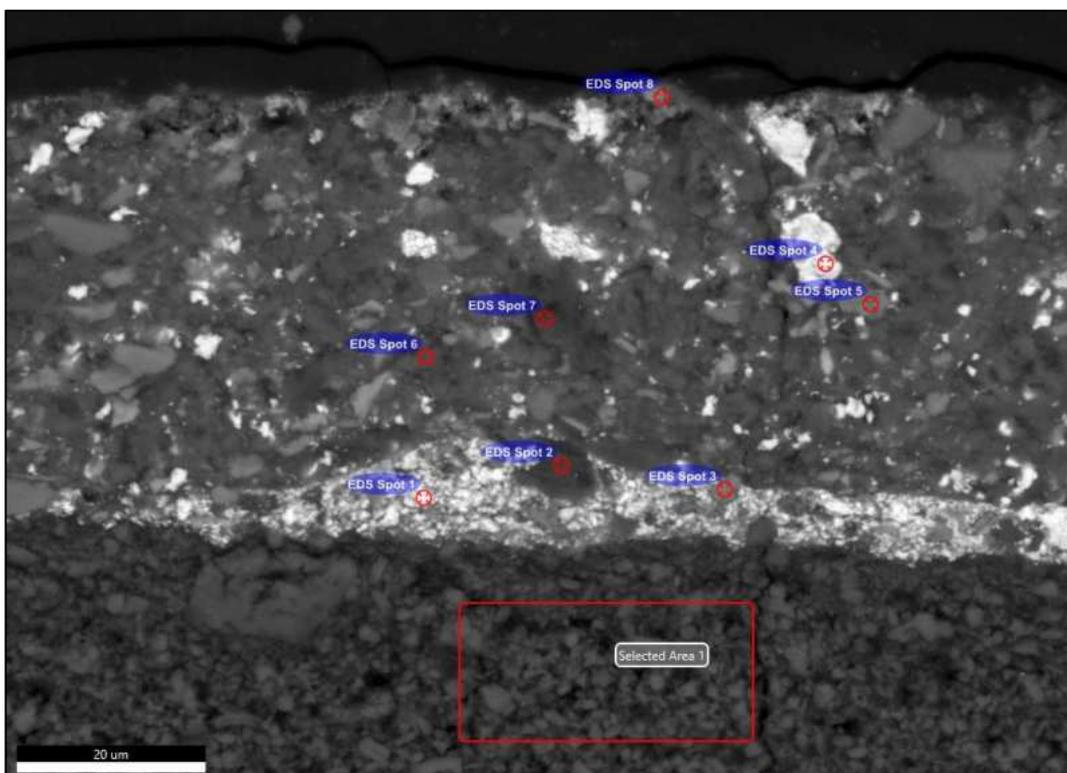


Abbildung 20: REM-BSE-Aufnahme eines Teilbereichs des Querschliffs von Fassungsprobe PB 3 mit Kartierung der EDX-Messstellen. Der Maßstab im Bildbereich unten links zeigt 20 µm.

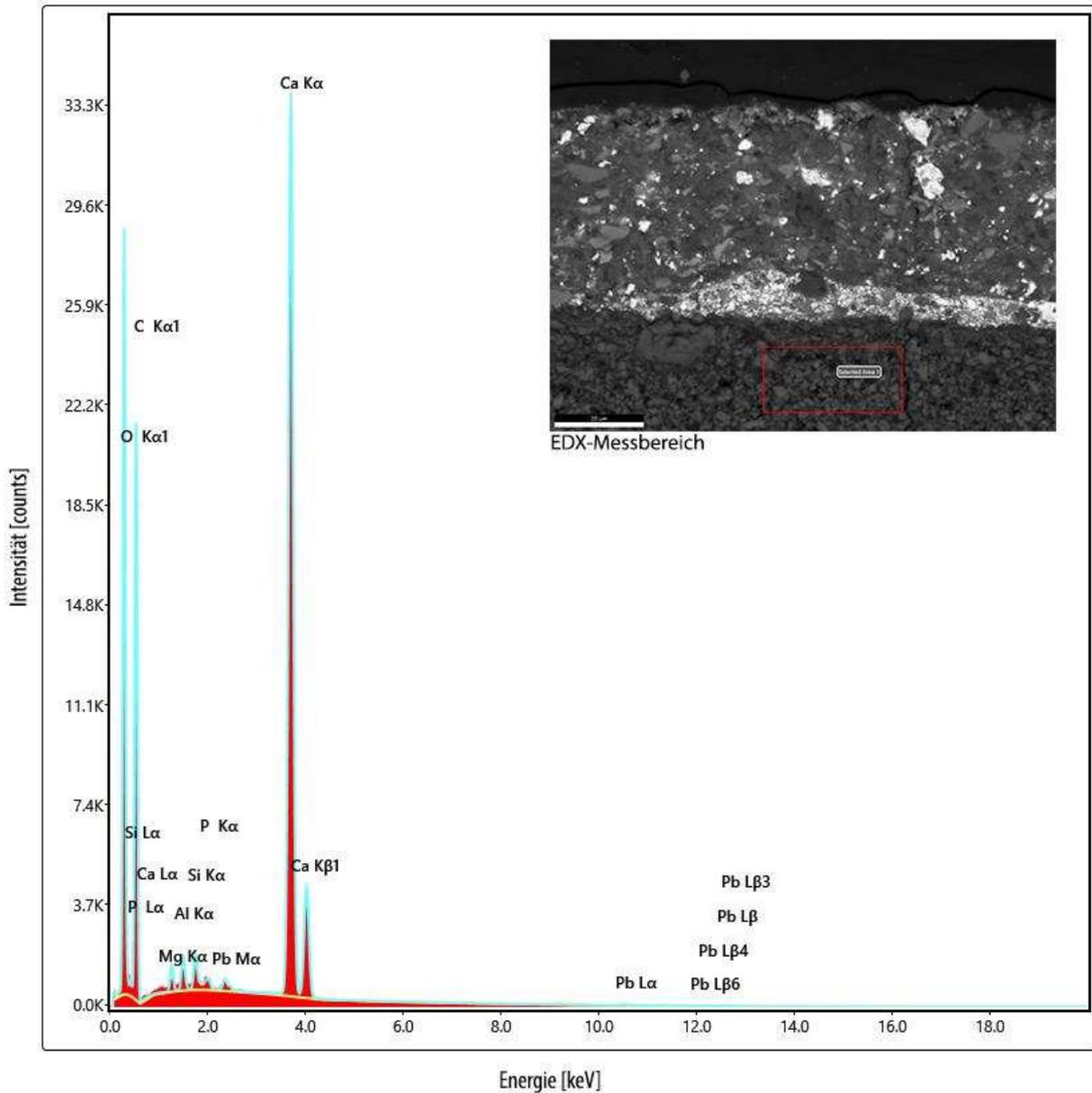


Abbildung 21: EDX-Spektrum der unteren Grundierungsschicht in Probe PB 3.

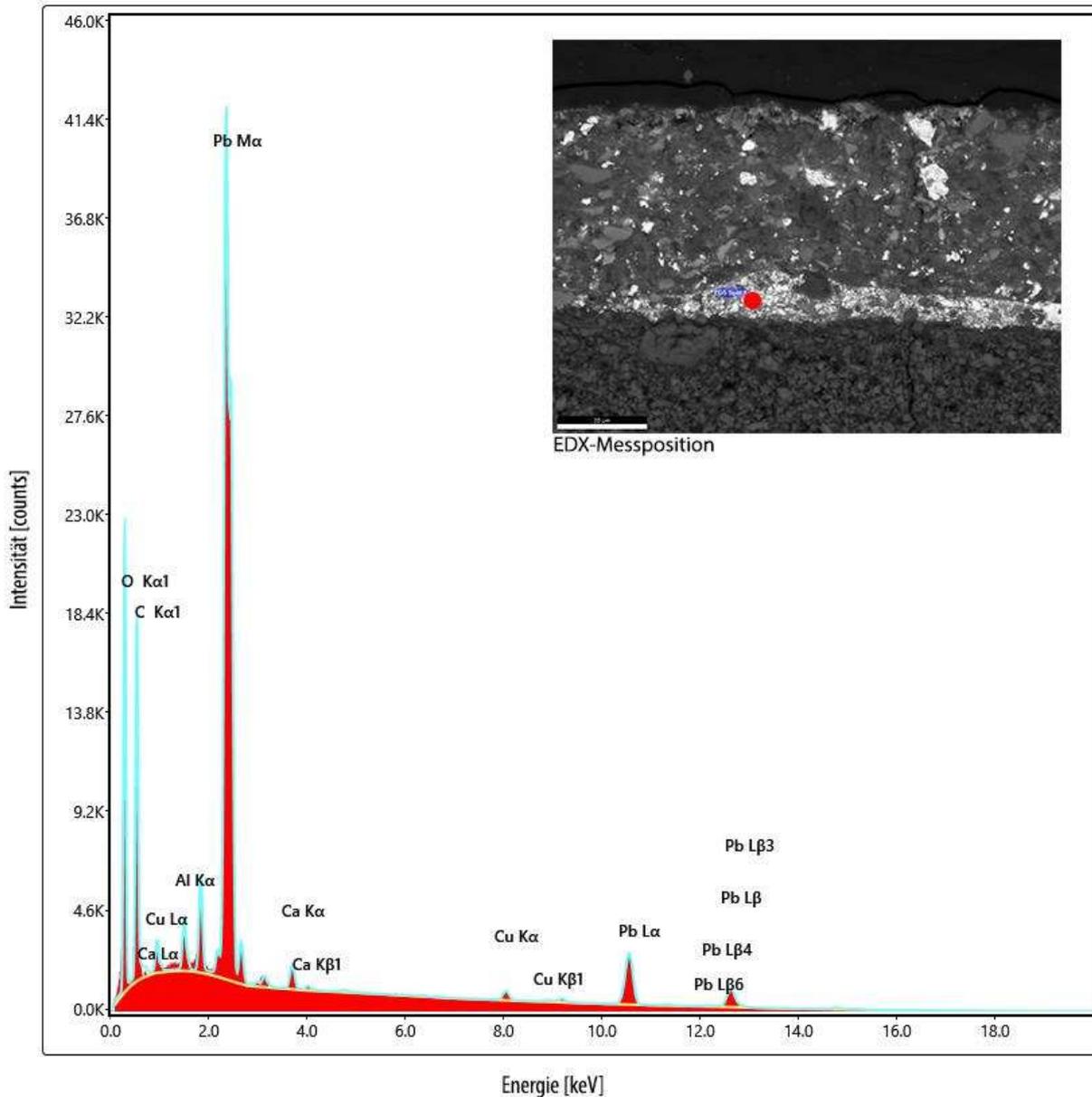


Abbildung 22: EDX-Spektrum der oberen Grundierungsschicht in Probe PB 3.

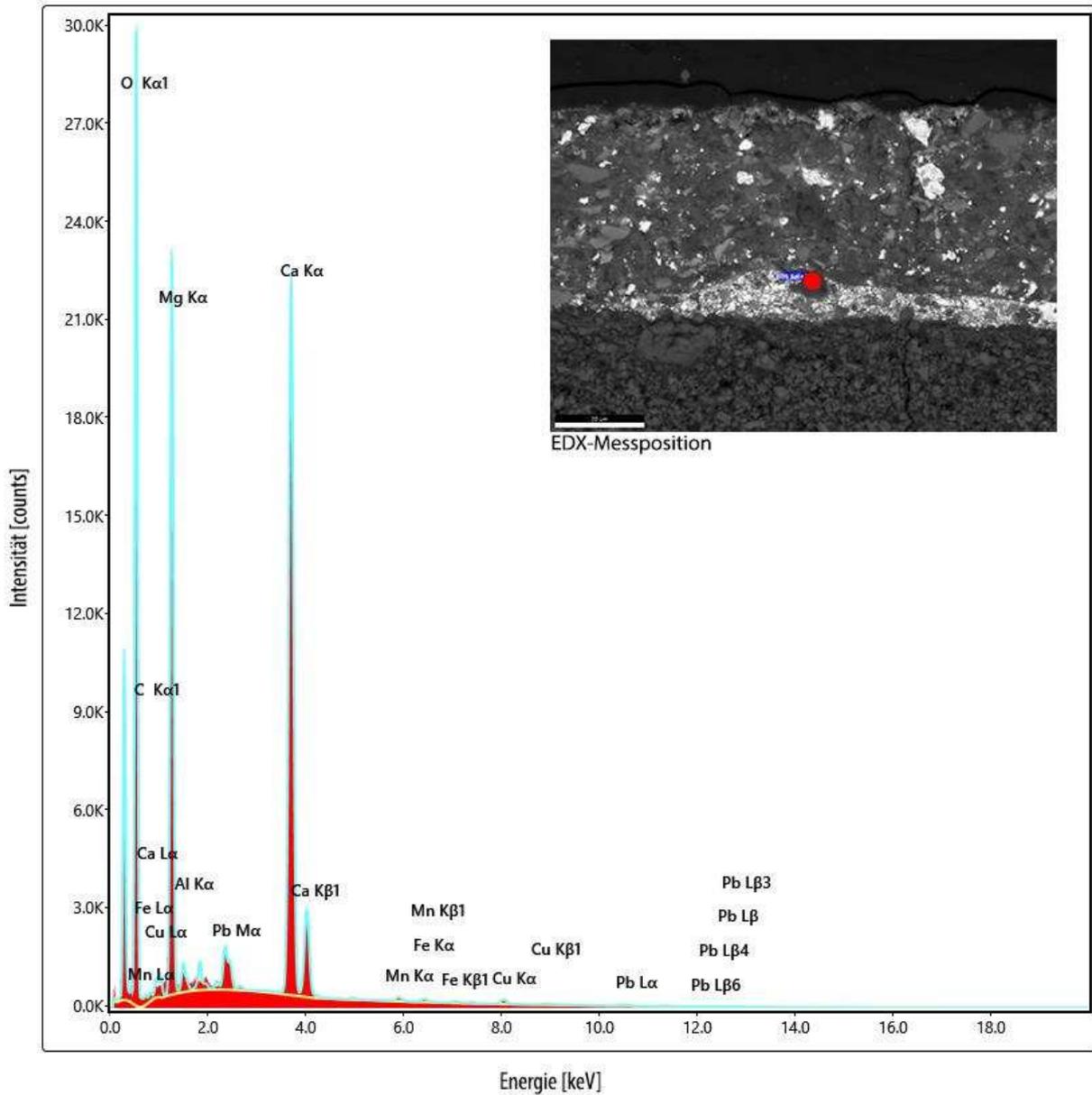


Abbildung 23: EDX-Spektrum eines mutmaßlichen Dolomitmikrorns zwischen Malschicht und oberer Grundierung von Probe PB 3.

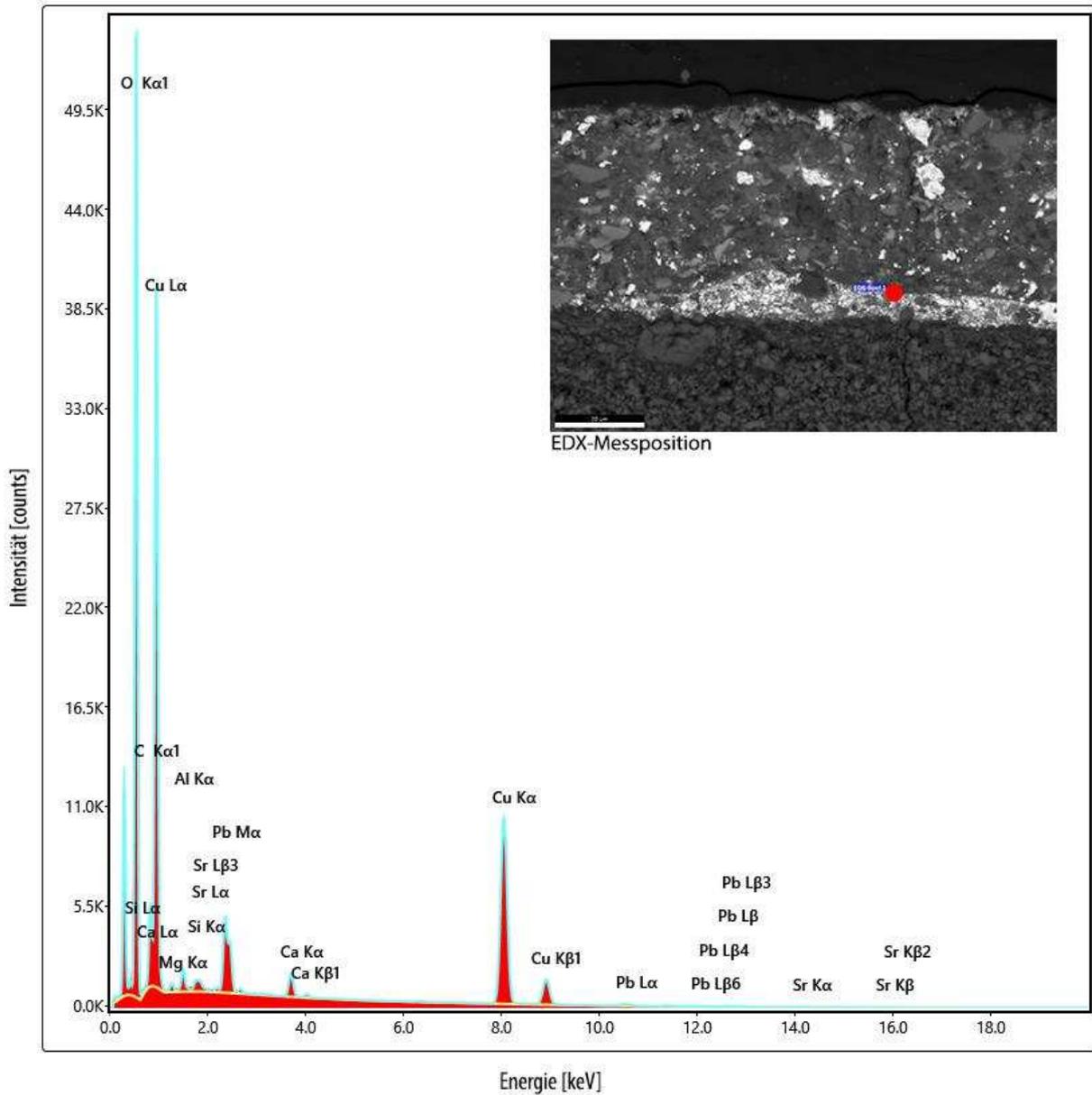


Abbildung 24: EDX-Spektrum eines kupferhaltigen Pigmentkorns zwischen Malschicht und oberer Grundierung von Probe PB 3.

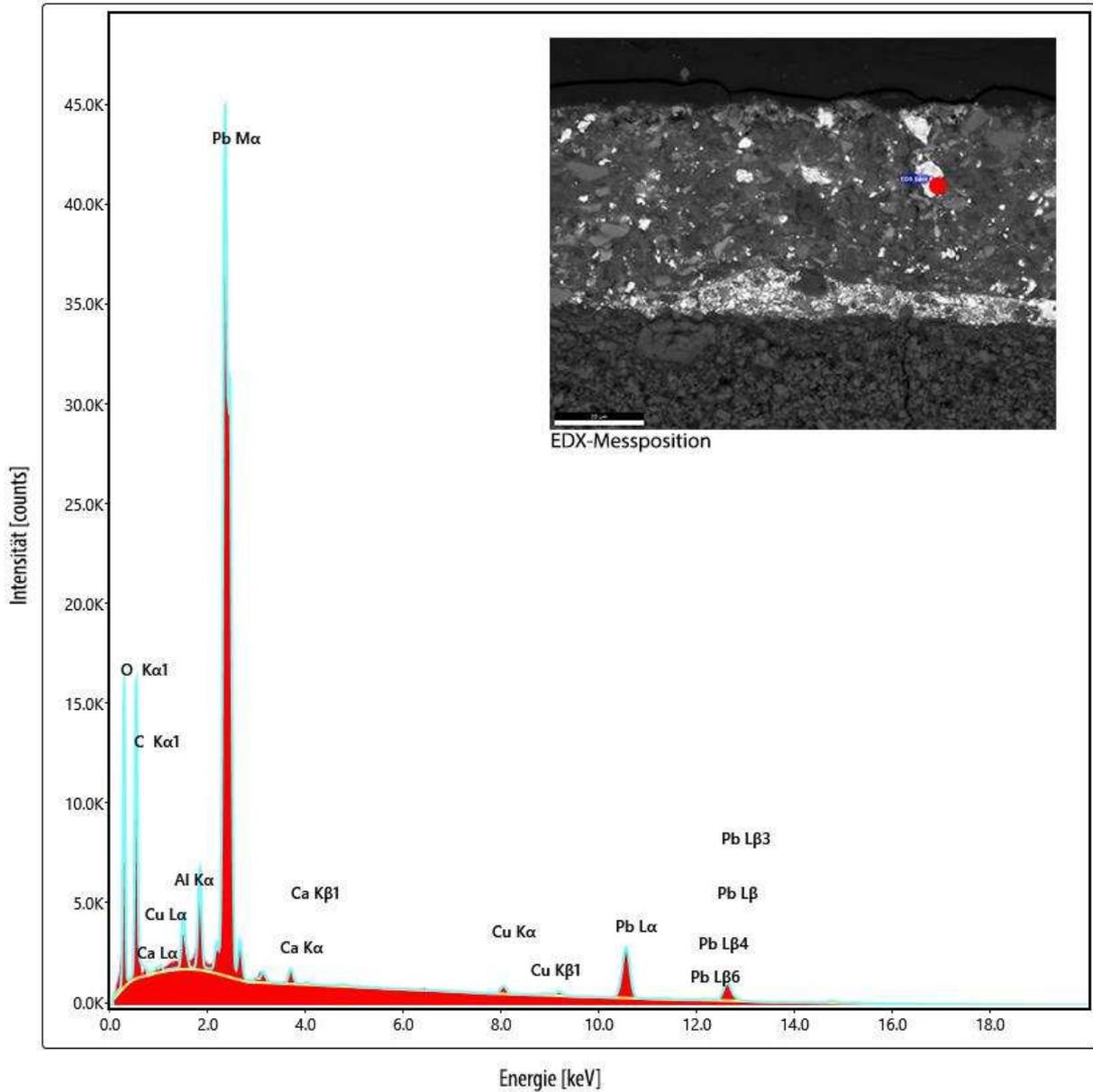


Abbildung 25: EDX-Spektrum eines mutmaßlichen Bleiweißkorns in der Malschicht von Probe PB 3.

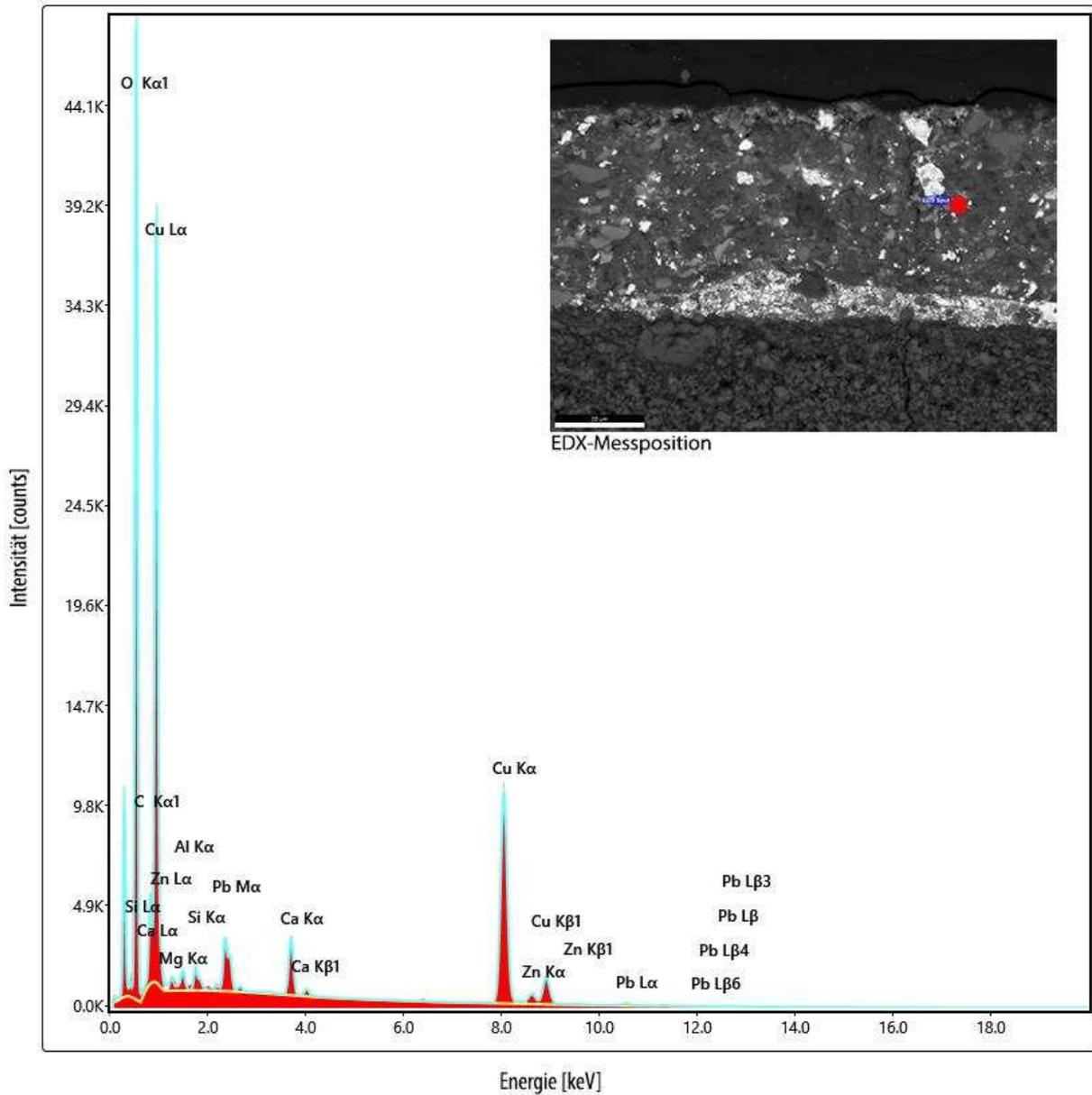


Abbildung 26: EDX-Spektrum eines kupferhaltigen Pigmentkorns in der Malschicht von Probe PB 3.

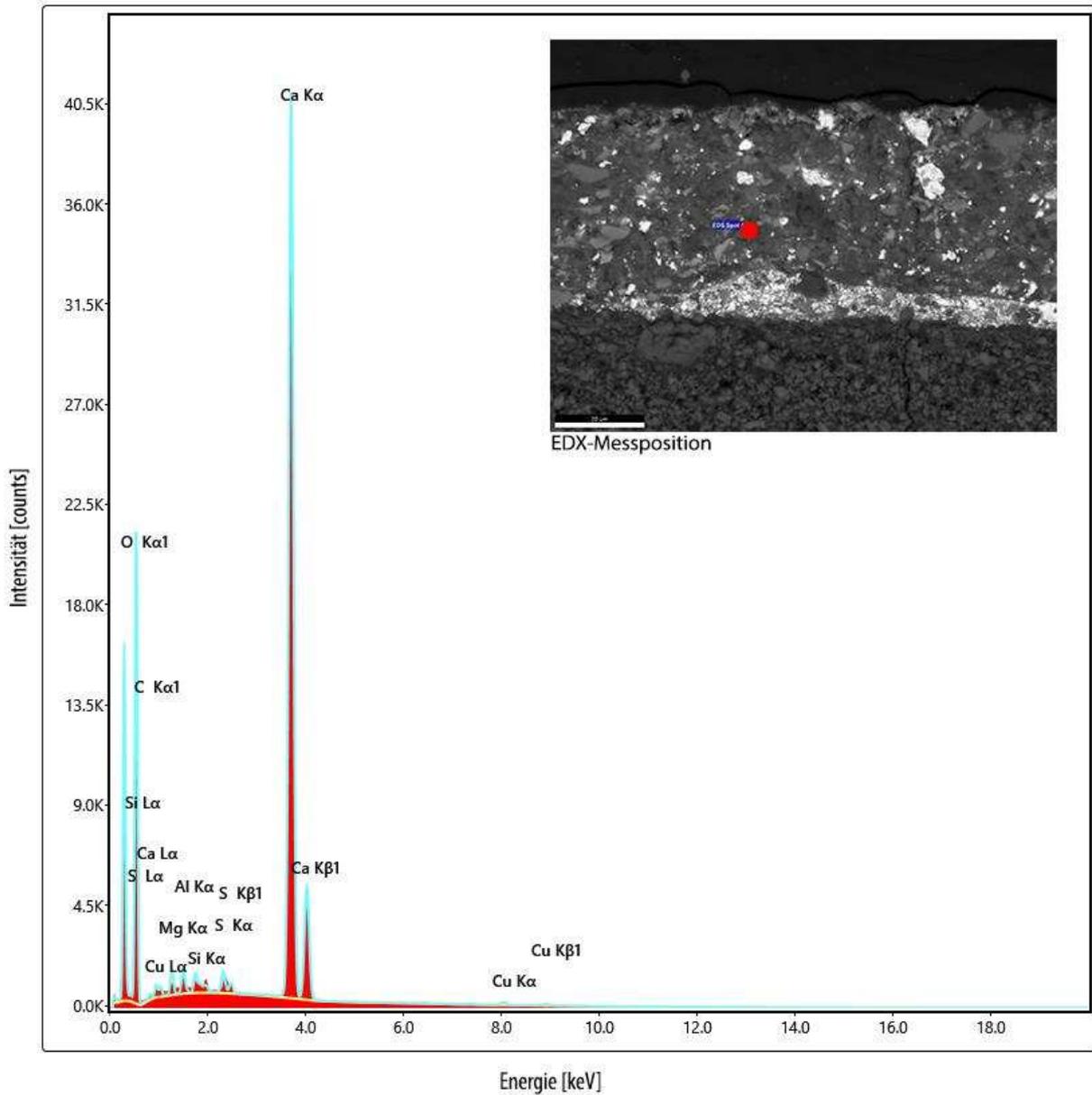


Abbildung 27: EDX-Spektrum eines mutmaßlichen Kreidekorns in der Malschicht von PB 3.

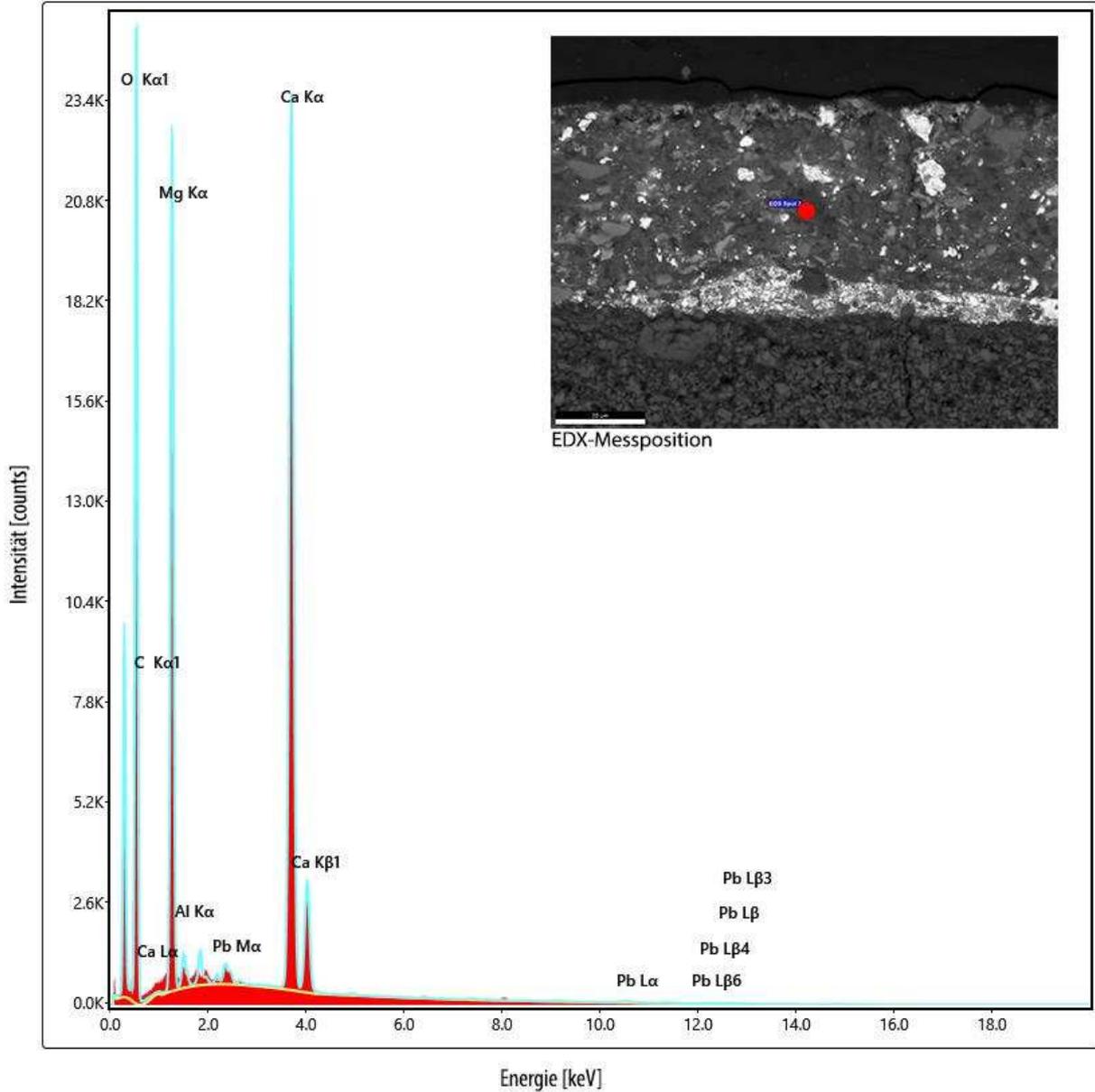


Abbildung 28: EDX-Spektrum eines mutmaßlichen Dolomitmikrokorns in der Malschicht von PB 3.

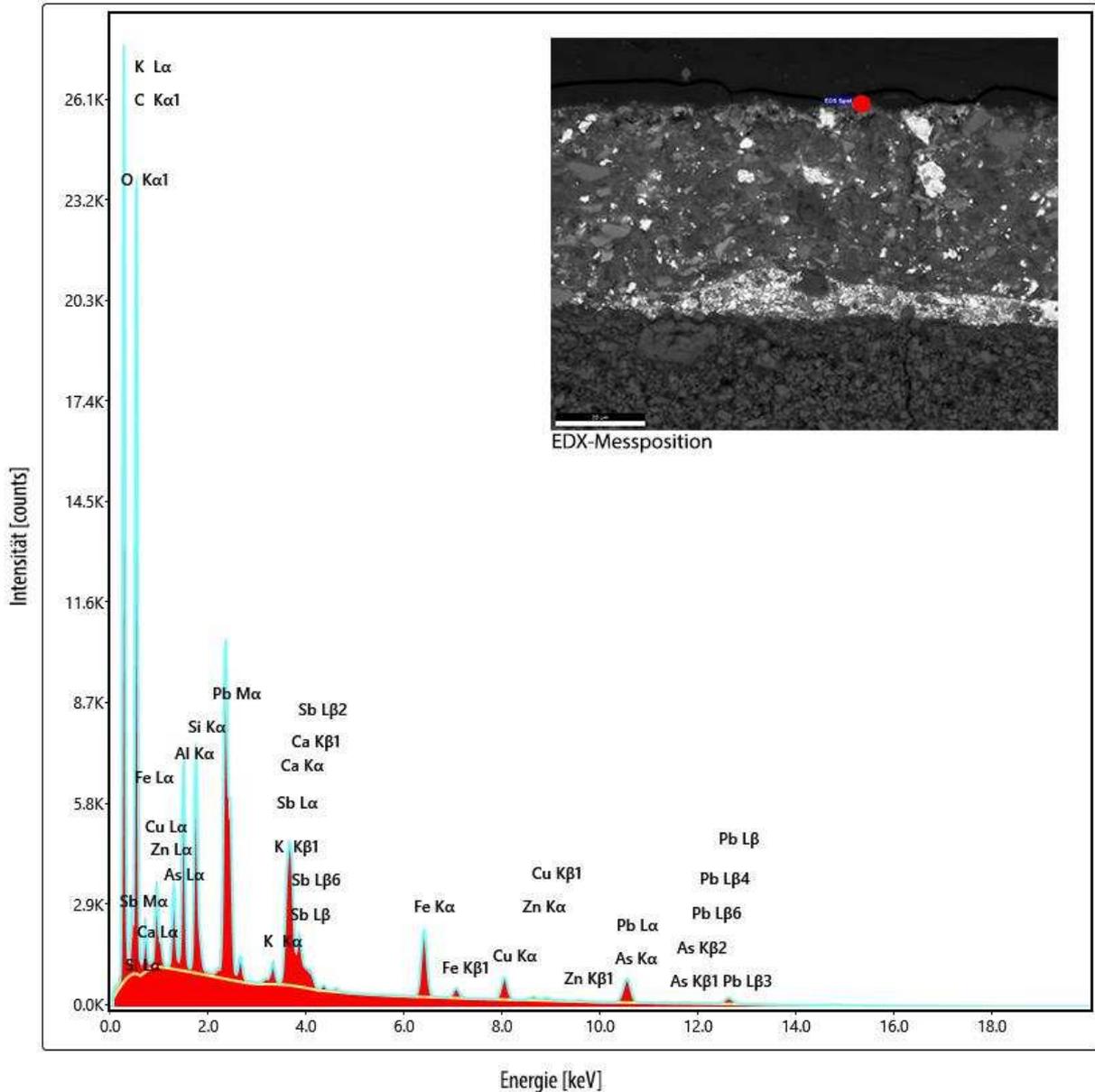


Abbildung 29: EDX-Spektrum von mutmaßlichen Neapelgelbbestandteilen auf der Malschicht in Probe PB 3.

4 Diskussion

4.1 FTIR-Analysen

Im Folgenden werden die erhaltenen FTIR-Spektren der untersuchten Materialproben diskutiert und interpretiert.

4.1.1 Probe PB 1

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, konnte bei der Probenvorbereitung von Probe PB 1, also von der Überzugsprobe der rückseitigen Holztafel, unter dem Stereomikroskop zwei Schichten separiert werden. Das FTIR-Spektrum der unteren, holzanliegenden Schicht 1 ist in Abbildung 11 dargestellt. Es zeichnet sich neben der recht intensiven und erwartungsgemäß breiten Schwingungsbande der O-H-Streckschwingung bei 3335 cm^{-1} und einer ebenso intensiven Carbonylstreckschwingungsbande bei 1635 cm^{-1} v. a. durch ein dominantes C-O-Streckschwingungssignal bei 1056 cm^{-1} aus.¹ Daneben weist es im spektralen Bereich zwischen 1600 cm^{-1} und 1200 cm^{-1} mehrere mittelstarke und relativ undefinierte Banden auf. Die spektrale Position der Carbonylstreckschwingungsbande ist für eine reine Ketoverbindung zu bathochrom verschoben, weshalb sich hier bereits ein Ester oder ein Amid als funktionelle Gruppe andeutet.¹ Aufgrund der etwas zähen Konsistenz der separierten Schicht wurde zusätzlich ein FTIR-Spektrum einer Glutinleim-Referenzprobe aufgenommen. Wie in Abbildung 11 erkennbar ist, stimmen die Schwingungsbanden insbesondere im spektralen Bereich von 1700 cm^{-1} bis 1140 cm^{-1} sehr gut überein. Lediglich die Amidbande II bei 1532 cm^{-1} und die Amidbande III bei 1447 cm^{-1} fallen in ihrer Intensität etwas niedriger als in der Referenzprobe aus.¹ Während der Probenvorbereitung unter dem Stereomikroskop fielen darüber hinaus kleinere Späne auf, welche an der separierten Schicht hafteten und sehr wahrscheinlich vom Holzträger stammen. Aus diesem Grund wurde noch ein FTIR-Spektrum einer Holz-Referenzprobe aus den Beständen des Zentrallabors aufgenommen und, wie in Abbildung 11 gezeigt, mit dem Probenspektrum verglichen. Die bereits oben erwähnte C-O-Schwingungsbande im Bereich von 1140 cm^{-1} bis 915 cm^{-1} kann hierdurch sehr gut den Cellulose- bzw. Hemicellulose-Bestandteilen der Holzfasern zugeordnet werden.² Insgesamt lassen die FTIR-Untersuchungsergebnisse den Schluss zu, dass die untere Schicht von Probe PB 1 aus Glutinleim besteht.

In Abbildung 12 ist das FTIR-Spektrum der äußeren Schicht von PB 1 dargestellt. Im kurzwelligen Spektralbereich treten neben der breiten O-H-Streckschwingung bei 3227 cm^{-1} v. a. die intensiven C-H-Streckschwingungen bei 2931 cm^{-1} und 2858 cm^{-1} hervor.¹ Im langwelligen Bereich dominiert die Carbonylstreckschwingung bei 1704 cm^{-1} das Spektrum.¹ Daneben zeigt die Messung sehr charakteristische Schwingungsbanden im Bereich von 1490 cm^{-1} bis 690 cm^{-1} mit einem Absorptionsmaximum bei 1190 cm^{-1} , welches C-O-Streckschwingungen zugeordnet werden kann.¹ Dieses Bandenmuster ist typisch für eine Reihe von pflanzlichen Ölen.¹ Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein Referenzspektrum von gealtertem Leinöl aufgenommen und dem Probenspektrum vergleichend gegenübergestellt (siehe Abbildung 12). Das Referenzspektrum stimmt in allen wesentlichen Molekülschwingungen mit dem Probenspektrum überein. Lediglich im Bereich der breiten O-H-Streckschwingungen ($3700 - 3010\text{ cm}^{-1}$), der Carbonylstreckschwingung und der C-H-Biegeschwingungen (ca. $1490 - 1335\text{ cm}^{-1}$) sind kleinere Abweichungen erkennbar.¹ Insbesondere das im Vergleich zum Spektrum der Referenzprobe relativ schwache O-H-Valenzschwingungssignal bei 3450 cm^{-1} und das Vorhandensein der C=C-Streckschwingung als Schulterband bei 1650 cm^{-1} könnten auf eine stellenweise unvollständige Autoxidation des aufgetragenen Leinöls hindeuten.³ Dies könnte u. a. mit dem Luftabschluss im Inneren der beprobten tropfenförmigen Ansammlung erklärt werden. Möglicherweise könnte jedoch auch ein anderes, dem Leinöl sehr ähnliches Pflanzenöl als Überzugsmaterial verwendet worden sein. Mit dem aufgenommenen FTIR-Spektrum allein kann dies nicht abschließend geklärt werden. Hierfür wären weiterführende Analysen notwendig. Daher lassen die Untersuchungsergebnisse insgesamt lediglich den Schluss zu, dass als Überzug für die Holztafelrückseite ein Öl verwendet wurde.

4.1.2 Probe PB 2

In Abbildung 13 ist das FTIR-Spektrum der zweiten Probe PB 2 des Holzüberzugs von der Tafelrückseite abgebildet. Das Spektrum zeigt die gleichen Charakteristika wie das oben beschriebene Spektrum der unteren Schicht von Probe PB 1. Dementsprechend weist es beim Vergleich mit den aufgenommenen Referenzspektren von Glutinleim und Holz ebenfalls die oben beschriebenen Übereinstimmungen auf (siehe Abbildung 13). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um das gleiche Material, sehr wahrscheinlich ein Glutinleim, handeln muss. Interessanterweise konnte bei der Probenvorbereitung im Gegensatz zu Probe PB 1 keine zweite Schicht ausgemacht werden. Aufgrund der äußerlichen Ähnlichkeit der beiden beprobten Stellen ist ein analoger Schichtaufbau zu Probe PB 1 relativ wahrscheinlich. Möglicherweise hat sich der vermutete ölhaltige Überzug aufgrund seiner etwas spröden Konsistenz bereits beim Entnehmen der Probe größtenteils abgelöst. Inwieweit

alle dunkelbraun erscheinenden Stellen auf der Holztafelrückseite mit einem Öl überzogen wurden, lässt sich jedoch an dieser Stelle nicht beurteilen.

4.1.3 Probe PB 3

Bei der Probenvorbereitung für die Messung von Probe PB 3 wurde von der entnommenen Farbscholle zunächst unter einem Stereomikroskop ein Teilstück abgetrennt und davon die dunkelbraun erscheinende Farbschicht mittels Skalpell freipräpariert. In Abbildung 14 ist das FTIR-Spektrum des entsprechenden Probenmaterials dargestellt. Es zeigt im kurzwelligen Bereich ein sehr breites Signal mit einem Maximum bei 3408 cm^{-1} , was der O-H-Valenzschwingung zugeordnet werden kann.¹ Daneben sind noch die charakteristischen C-H-Streckschwingungsbanden bei 2930 cm^{-1} und 2858 cm^{-1} , sowie eine kleinere Schwingungsbande bei 2514 cm^{-1} erkennbar.¹ Der langwellige Spektralbereich wird von einem sehr intensiven Schwingungssignal bei ca. 1430 cm^{-1} dominiert. Dort absorbieren typischerweise Carbonate.¹ Daher wurde, wie in Abbildung 14 gezeigt, ein FTIR-Spektrum einer Calcit-Referenzprobe aufgenommen und mit dem Probenspektrum verglichen. Auf diese Weise konnte die dominante Absorption einer CO_3 -Valenzschwingung zugeordnet werden.¹ Darüber hinaus konnten damit noch die schmalen CO_3 -Biegeschwingungsbanden bei 877 cm^{-1} und 714 cm^{-1} identifiziert und aufgrund der kationenspezifischen Lage dieser Banden letztendlich Calciumcarbonat zugeordnet werden.¹ Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, absorbiert jedoch die dominante CO_3 -Biegeschwingung des Calcits im Vergleich zum Probenspektrum leicht bathochrom verschoben. Es wird daher angenommen, dass im untersuchten Probenmaterial noch mindestens eine weitere Substanz vorhanden ist, welche ebenfalls in dieser spektralen Region absorbiert. Sehr wahrscheinlich handelt es sich dabei auch um ein Carbonat.¹ Da durch die REM-EDX-Untersuchungen in der Malschicht u. a. eine elementanalytische Zusammensetzung nachgewiesen werden konnte, welche auf Dolomit als eingesetzten Füllstoff hinweist (siehe Abschnitt 4.2), ist in Abbildung 14 zusätzlich ein FTIR-Referenzspektrum von Dolomit abgebildet. Beim Vergleich mit dem Probenspektrum fällt auf, dass das Absorptionsmaximum des Dolomit-Referenzspektrums sehr gut mit der entsprechenden Molekülschwingung im Probenmaterial übereinstimmt. Die in ihrer spektralen Lage im Vergleich zu CaCO_3 leicht verschobenen CO_3 -Biegeschwingungsbanden konnten darüber hinaus ebenfalls entsprechenden Banden im Probenspektrum zugeordnet werden. Hinsichtlich der nachgewiesenen Kreidebestandteile ist es in Kombination mit den unten ausgeführten REM-EDX-Untersuchungsergebnissen sehr wahrscheinlich, dass diese aus der Malschicht selbst stammen (siehe Abschnitt 4.2). Nichtsdestotrotz könnte es sich dabei auch um Reste aus der Grundierungsschicht handeln, welche vermutlich bei der Probenvorbereitung nicht vollständig entfernt werden konnten (siehe Abschnitt 4.1.4). Daneben tauchen noch weitere Schwingungsbanden im langwelligen Spektralbereich auf, welche jedoch keiner spezifischen Substanz zugeordnet werden konnten. Die Banden im typischen Bereich der Carbonylstreckschwingung bei 1794 cm^{-1} und 1709 cm^{-1} zeigen jedoch, dass erwartungsgemäß noch mindestens eine organische Substanz, welche wahrscheinlich als Bindemittel in der Farbschicht fungiert, im Probenmaterial vorliegt.¹ Wie bereits erwähnt, ist eine belastbare Stoffidentifikation anhand der wenigen vorliegenden Signale jedoch aufgrund der massiven Bandenüberlagerung u. a. durch die dominanten Carbonat-Valenzschwingungen nicht möglich. Um abgesehen vom organischen Bindemittel weitere Informationen über die verwendeten Farbmittel zu erhalten, wurde im Zuge der REM-EDX-Untersuchungen versucht, entsprechende Verbindungen anhand der entnommenen Farbscholle zu identifizieren (siehe Abschnitt 4.2).

4.1.4 Probe PB 4

Das FTIR-Spektrum von Probe PB 4 (siehe Abbildung 15) zeigt, analog zum entsprechenden Spektrum von PB 3, eine dominante Absorptionsbande bei 1395 cm^{-1} und zwei scharfe Schwingungsbanden bei 868 cm^{-1} bzw. 713 cm^{-1} . Durch einen Vergleich mit dem FTIR-Spektrum der Calciumcarbonat-Referenzprobe (siehe Abbildung 15) konnten diese Schwingungssignale eindeutig CaCO_3 zugeordnet und somit Kreide in der Grundierung nachgewiesen werden.¹ Darüber hinaus tauchen im Spektrum noch einige relativ schwache Schwingungsbanden auf. Im Bereich von 1210 cm^{-1} bis 890 cm^{-1} können diese aufgrund der recht unspezifischen Signale keiner konkreten Substanz zugeordnet werden. Bei 1644 cm^{-1} deutet sich eine relativ schwache Carbonylstreckschwingung an.¹ Aufgrund ihrer spektralen Lage handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein Ester oder ein Amid.¹ Da sich bei ca. 1520 cm^{-1} außerdem noch ein Schulter signal andeutet, wird hier eine amidhaltige Substanz vermutet.¹ Der Vergleich mit der Glutinleim-Referenzprobe zeigt, dass möglicherweise neben besagten Amid I und Amid II Banden auch eine C-H-Biegeschwingungsbande bei 1093 cm^{-1} vorliegt und es sich folglich um einen Leimbinder in der Grundierung handeln könnte (siehe Abbildung 15).¹ Allerdings kann diese Hypothese aufgrund der sehr geringen Signalintensitäten der Bindemittelschwingungen und der gleichzeitigen Überlagerung des sehr intensiven Calcit-Signals nicht mit letzter Sicherheit anhand der Untersuchungsergebnisse

verifiziert werden. Glutinleim als Bindemittel würde in Kombination mit Kreide als Hauptbestandteil auf eine typische Kreidegrundierung hinweisen.

4.1.5 Probe PB 5

In Abbildung 16 ist das FTIR-Spektrum der Firnisprobe PB 5 dargestellt. Es zeigt bei 3389 cm^{-1} eine breite O-H-Valenzschwingung, sowie bei 2925 cm^{-1} und 2854 cm^{-1} intensive C-H-Streckschwingungen.¹ Bei 1707 cm^{-1} ist eine dominante Carbonylstreckschwingungsbande mit einem vergleichsweise schwachem Schulter-signal der C=C-Streckschwingungen bei ca. 1650 cm^{-1} zu erkennen.³ Bei 1452 cm^{-1} und 1382 cm^{-1} tauchen vergleichsweise intensive Absorptionsbanden von C-H-Biegeschwingungen auf.¹ Im spektralen Bereich von 1330 cm^{-1} bis 680 cm^{-1} lässt sich anhand der hier detektierten C-O-Streckschwingungen mit einem Absorptionsmaximum bei 1172 cm^{-1} erneut die typische Signalverteilung bestimmter pflanzlicher Öle erkennen.¹ Der Vergleich mit dem Referenzspektrum von gealtertem Leinöl bestätigt diese Beobachtung, da dieses sehr gut mit dem Probenspektrum übereinstimmt (siehe Abbildung 16). Im Vergleich zum Spektrum der äußeren Schicht von PB 1 (siehe Abschnitt 4.1.1) fallen hier die erkennbaren Unterschiede zum Referenzspektrum noch geringer aus. Insbesondere deutet die im Vergleich zum Probenmaterial von PB 1 etwas schwächere C=C-Streckschwingung auf einen höheren Grad der Vernetzung und damit auf eine weiter fortgeschrittene Autoxidation hin.³ Da es sich bei Probe PB 1 um eine tropfenförmige Ansammlung mit vergleichsweise schlechtem Sauerstoffzugang im Inneren und bei Probe PB 5 jedoch um eine dünne, relativ gut trocknende Firnis-schicht handelt, war dies eine durchaus erwartbare Beobachtung und lässt daher keine direkten Schlüsse auf das Alter des Firnisses zu. Die Tatsache, dass der Firnis bei der Beprobung vor Ort eine vergleichsweise gute Löslichkeit in Ethanol zeigte (siehe Abschnitt 2), könnte in dem Zusammenhang sogar auf eine ebenfalls nicht quantitativ vollzogene Autoxidation zu Linoxin hinweisen.³ Da im entsprechenden Spektrum die C=C-Streckschwingung noch gut erkennbar ist und damit die molekulare Vernetzung des entstehenden Linoxins in Teilen noch nicht abgeschlossen zu sein scheint, würde dies prinzipiell eine Saponifikation mit Ethanol begünstigen und letztendlich die Löslichkeit erhöhen. Bei genauer Betrachtung des FTIR-Spektrums fallen kleine Unterschiede zum Leinöl-Referenzspektrum im Bereich von 1100 cm^{-1} und 1050 cm^{-1} auf. Aus diesem Grund kann trotz der sehr guten Übereinstimmung mit dem Referenzspektrum die Auftragung eines sehr ähnlichen Ölfirnisses an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden. Daher kann anhand der Untersuchungsergebnisse insgesamt lediglich auf einen Ölfirnis geschlossen werden.

4.1.6 Probe PB 7

Im Zuge der Probenvorbereitung für die FTIR-Analyse der Rahmenüberzugsprobe PB 7 konnte unter dem Stereomikroskop eine untere und eine äußere Schicht separiert werden (siehe Abschnitt 2). In Abbildung 17 ist das FTIR-Spektrum der unteren, holzanliegenden Schicht von PB 7 dargestellt. Im kurzwelligen Bereich wird es von einer breiten O-H-Streckschwingung bei 3286 cm^{-1} dominiert.¹ Im langwelligen Spektralbereich fallen insbesondere drei Schwingungsbanden bei 1634 cm^{-1} , 1541 cm^{-1} und 1452 cm^{-1} auf. Diese können gemäß der spektralen Position und der abgestuften Intensitätsverteilung dem charakteristischen Amid-Triplett zugeordnet werden.¹ Dieses besteht aus der Amid I Bande für die entsprechende C=O-Streckschwingung, der etwas abgeschwächten Amid II Bande für eine Mischung aus C-N- und N-H-Schwingungen, sowie der noch etwas schwächeren Amid III Bande für zugehörige C-H-Schwingungen.¹ Der spektrale Vergleich mit dem Glutinleim-Referenzspektrum zeigt eine in allen Molekülschwingungen sehr gute Übereinstimmung mit dem Probenspektrum (siehe Abbildung 17). Aus diesem Grund kann hier von Glutinleim als Probenmaterial ausgegangen werden.

In Abbildung 18 ist das FTIR-Spektrum der separierten äußeren Schicht des Rahmenüberzugs PB 7 dargestellt. Das aufgenommene Spektrum weist im kurzwelligen Spektralbereich eine breite O-H-Valenzschwingungsbande bei 3398 cm^{-1} und die charakteristischen Absorptionsbanden für die C-H-Valenzschwingungen bei 2925 cm^{-1} sowie bei 2854 cm^{-1} auf.¹ Im langwelligen Messbereich dominiert die Carbonylstreckschwingungsbande bei 1707 cm^{-1} mit einem relativ starken Schulter-signal der C=C-Valenzschwingung bei ca. 1650 cm^{-1} das Spektrum.³ Im Bereich von 1500 cm^{-1} bis 1340 cm^{-1} sind charakteristische Signale von C-H-Biegeschwingungen mit zwei Maxima bei 1454 cm^{-1} und 1379 cm^{-1} zu erkennen.¹ Im sich daran anschließenden Spektralbereich von 1340 cm^{-1} bis 690 cm^{-1} können, analog zum Spektrum von PB 5, C-O-Schwingungsbanden mit einem Maximum bei 1168 cm^{-1} detektiert werden, welche nach spektraler Position und Intensitätsverteilung typisch für einige pflanzliche Öle sind.¹ Der in Abbildung 18 dargestellte Vergleich mit dem FTIR-Spektrum einer gealterten Leinöl-Referenzprobe zeigt, dass das Probenspektrum der äußeren Schicht von PB 7, ähnlich wie im Fall des aufgenommenen Spektrums der Firnisprobe PB 5, eine sehr hohe Übereinstimmung aufweist. Es fallen lediglich leichte Intensitätsabweichungen bei oben genannter C=C-Valenzschwingungsbande (1650 cm^{-1}), sowie bei einer C-H-Biegeschwingung (1379 cm^{-1}) und einer C-O-Streckschwingung (1248 cm^{-1}) ins Auge.¹ Außerdem sind leicht abweichende C-O-Valenzschwingungen im Bereich von 1125 cm^{-1} bis 910 cm^{-1} erkennbar.¹ Aus diesem Grund ist es auch hier möglich, dass ein anderes, dem

Leinöl sehr ähnliches Öl als Überzug für den Rahmen verwendet wurde. An dieser Stelle kann daher erneut keine genaue Identifikation des aufgetragenen Öls erfolgen. Jedoch weisen die Untersuchungsergebnisse insgesamt sehr deutlich auf ein pflanzliches Öl als Rahmenüberzug hin.

4.2 REM-EDX-Analysen

Sowohl in der lichtmikroskopischen Übersichtsaufnahme des untersuchten Querschliffausschnitts der Farbschollenprobe PB 3 (siehe Abbildung 19), als auch in der zugehörigen REM-BSE Detailaufnahme (siehe Abbildung 20) ist im Wesentlichen ein dreischichtiger Aufbau erkennbar. Auf die sehr breite untere Grundierung folgt eine vergleichsweise dünne und helle obere Grundierungsschicht. Darüber schließt sich die eigentliche Malschicht, welche unter dem Mikroskop dunkelbraun erscheint, an. Die anhand der REM-BSE-Aufnahme beobachteten durchschnittlichen Schichtkorngrößen fallen recht unterschiedlich aus. Während die dünne, obere Grundierungsschicht insgesamt sehr feinkörnig wirkt, weist die untere Grundierung im Schnitt etwas größere Körner auf. Die Malschicht wirkt insgesamt sehr heterogen und enthält neben einigen großen Farbmittelagglomerationen auch feinkörnigere Bestandteile, welche sich dazwischen anordnen. Die durchschnittliche Korngröße ist unter den betrachteten Schichten in der Malschicht am größten. Um Hinweise auf die im Holztafelbild verwendeten Farbmittel zu erlangen, wurden die elementanalytische Zusammensetzung einzelner Farbmittelkörner durch REM-EDX-Analysen ermittelt. In Abbildung 20 sind die entsprechenden Messstellen auf der REM-BSE-Aufnahme kartiert. Im Folgenden werden die erhaltenen EDX-Spektren diskutiert und interpretiert.

In Abbildung 21 ist das EDX-Spektrum der unteren Grundierungsschicht dargestellt. Als Hauptbestandteile werden hier Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff nachgewiesen. Stark untergeordnet bzw. als Spuren tauchen darüber hinaus noch Silicium, Blei, Phosphor, Aluminium und Magnesium im Spektrum auf. Anhand der Untersuchungsergebnisse der FTIR-Analyse (siehe Abschnitt 4.1.4) wurde bereits eine kreidehaltige Grundierung vermutet. Dies wird durch die hier aufgeführten Analyseergebnisse bestätigt, da die nachgewiesenen Hauptbestandteile stark auf CaCO_3 hindeuten. Das stark untergeordnete Blei könnte möglicherweise aus der benachbarten oberen Grundierungsschicht (siehe unten) migriert bzw. durch die Probenpräparation eingeschleppt worden sein.

Das in Abbildung 22 abgebildete EDX-Spektrum der oberen Grundierungsschicht weist im Wesentlichen Blei, Sauerstoff und Kohlenstoff nach. Daneben enthält es noch schwächere Signale für Aluminium, Kupfer und Calcium, welche als untergeordnet bzw. stark untergeordnet klassifiziert werden können. In Kombination mit der hellen Farbgebung und der eher feinkörnigen Struktur weisen die nachgewiesenen Hauptbestandteile hier auf eine bleiweißhaltige Grundierung hin.⁴

In Abbildung 23 ist das EDX-Spektrum eines größeren Farbmittelkorns dargestellt, welches sich zwischen der eben beschriebenen oberen Grundierungsschicht und der eigentlichen Malschicht befindet. Unter dem Lichtmikroskop besitzt das Korn eine weiße Farbgebung und ist dementsprechend kaum von der oberen Grundierung zu unterscheiden. Als Hauptbestandteile zeigt das zugehörige EDX-Spektrum Sauerstoff, Magnesium, Calcium und Kohlenstoff an. Untergeordnet kann noch Blei, Kupfer, sowie das ubiquitäre Aluminium und Eisen nachgewiesen werden. Als Spurenelement taucht außerdem noch Mangan im Spektrum auf. Die nachgewiesenen Hauptbestandteile deuten auf Dolomit hin, welches wahrscheinlich als Füllstoff eingesetzt wurde.⁴ Das nachgewiesene Blei stammt sehr wahrscheinlich aus der umgebenden hellen Grundierungsschicht und das Kupfer möglicherweise aus benachbarten Farbmittelbestandteilen.

Ebenfalls unmittelbar auf der oberen Grundierungsschicht befindet sich ein weiteres Farbmittelkorn, welches mittels REM-EDX analysiert wurde. Unter dem Lichtmikroskop zeigt das Korn eine auffällig grüne Farbigekeit. In Abbildung 24 ist das entsprechende EDX-Spektrum dargestellt. Als Hauptelemente können Sauerstoff, Kupfer und Kohlenstoff nachgewiesen werden. Daneben erscheinen untergeordnet noch Blei, Calcium, Magnesium und Strontium. Aufgrund der Farbigekeit und der nachgewiesenen Hauptelemente wird hier ein kupferhaltiges Pigment vermutet. Möglicherweise handelt es sich um ein Kupfercarbonat.⁴ Dies kann jedoch anhand des Spektrums nicht weiter verifiziert werden. Die nachgewiesenen Nebenelemente stammen sehr wahrscheinlich aus benachbarten Farbmittelbestandteilen.

In Abbildung 25 ist das EDX-Spektrum eines weißen Farbmittelkorns in der Malschicht abgebildet. Als Hauptelemente erscheinen Blei, Kohlenstoff und Sauerstoff. Daneben tauchen noch untergeordnet Aluminium, Kupfer und Calcium auf. Sowohl die nachgewiesenen Hauptbestandteile als auch die weiße Farbgebung deuten hier auf ein Bleiweißkorn in der Malschicht hin.⁴ Bei genauerer Betrachtung handelt es sich bei dem

vergleichsweise großen Korn um eine Aggregation vieler kleiner Pigmentkörner. Vermutlich wurde hier mit Bleiweiß angemischt. Im Zuge der Verarbeitung kam es dann offensichtlich zu einer Anhäufung der Pigmente.

Abbildung 26 zeigt das EDX-Spektrum eines grünen Pigmentkorns in der Malschicht von Probe PB 3. Als Hauptelemente werden hier Sauerstoff, Kupfer und Kohlenstoff angezeigt. Außerdem können als untergeordnete Nebenelemente noch Blei, Calcium und Magnesium nachgewiesen werden. Die Zusammensetzung der Hauptelemente entspricht weitestgehend der des grünen kupferhaltigen Pigments auf der oberen Grundierungsschicht (siehe oben). Aus diesem Grund wird auch hier das gleiche kupferhaltige Pigment vermutet. Die übrigen Nebenelemente stammen sehr wahrscheinlich aus benachbarten Farbmittelbestandteilen.

Das in Abbildung 27 gezeigte EDX-Spektrum eines hellen Farbmittelkorns im zentralen Bereich des untersuchten Messfensters zeigt, analog zum entsprechenden Spektrum der unteren Grundierung, im Wesentlichen Calcium, Sauerstoff und Kohlenstoff als Hauptelemente. Als Nebenelemente erscheinen noch Kupfer, Aluminium und Magnesium. Aufgrund der hellen Farbgebung und der nachgewiesenen Hauptelemente wird hier auf CaCO_3 und damit auf ein Kreidekorn geschlossen.⁴ Wie bei den zuvor betrachteten Spektren stammen die Nebenelemente vermutlich aus umgebenden Substanzen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde auch ein zur eben beschriebenen Substanz benachbartes Farbmittelkorn mittels REM-EDX analysiert. In Abbildung 28 ist das entsprechende EDX-Spektrum abgebildet. Analog zum mutmaßlichen Dolomitmikron zwischen der oberen Grundierungsschicht und der Malschicht (siehe oben) zeigt auch dieses Spektrum Sauerstoff, Calcium, Magnesium und Kohlenstoff als Hauptelemente. Daneben können noch Blei und Aluminium nachgewiesen werden. Aufgrund dieser elementanalytischen Zusammensetzung wird auch hier Dolomit vermutet.

Abschließend wurde ein Bereich an der oberen Grenze zum Firnis analysiert, welcher unter dem Lichtmikroskop gelb erscheint. In Abbildung 29 ist das entsprechende EDX-Spektrum dargestellt. Es zeigt neben Kohlenstoff noch Sauerstoff, Blei und Antimon als Hauptelemente. Etwas schwächer können darüber hinaus noch Aluminium, Silicium, Eisen, Kupfer und Calcium nachgewiesen werden. Eine genaue Identifikation der verwendeten Farbmittel ist anhand der Vielzahl an relativ intensiven Nebenelementensignalen schwierig. Aufgrund der Farbigkeit und den eben aufgezählten intensivsten Elementensignalen wird hier Neapelgelb, also ein Bleiantimonat, vermutet.⁴ Eine Zuordnung der restlichen Signale kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Möglicherweise wurden bei der Messung benachbarte Pigmentkörner teilweise mit vermessen, sodass dies neben möglichen Migrationseffekten zu den zahlreichen Elementensignalen beigetragen hat. Da Neapelgelb in italienischen Quellen bereits in der Entstehungszeit des Holztafelbilds als Pigment in der Malerei Erwähnung fand, ist es durchaus vorstellbar, dass der untersuchte Bereich Teil der originalen Fassung ist.⁴ Inwieweit dieses Pigment zu dieser Zeit auch nördlich der Alpen verwendet wurde, ist jedoch fraglich. Möglicherweise wurde an dieser Stelle auch zu späterer Zeit mit dem entsprechenden Pigment retuschiert. Der sehr schmale Bereich, in dem die entsprechende Elementzusammensetzung gefunden wurde, könnte evtl. in diese Richtung deuten. Eine abschließende Beurteilung, ob es sich an der obersten Stelle der Malschicht um eine Retusche oder um Teil der originalen Fassung handelt, kann an dieser Stelle nicht abgegeben werden.

5 Zusammenfassung

Zusammengefasst konnten bei den durchgeführten Untersuchungen bis auf wenige Ausnahmen die Stoffklassen der verwendeten Materialien erfolgreich bestimmt werden. So handelt es sich bspw. beim verwendeten Überzugsmaterial sowohl auf der Holztafelrückseite als auch auf dem Rahmen und dem eigentlichen Tafelbild um ein Öl. Im Fall der Holztafelrückseite und des Rahmens wurde dieses auf eine sich darunter befindliche und holzanliegende Glutinleimschicht aufgetragen. Das Tafelbild selbst baut sehr wahrscheinlich auf eine leimgebundene Kreidegrundierung auf. An der beprobten Stelle, welche sich an einem dunkelbraun bis grünlich erscheinenden zentralen Architekturbereich befindet, schließt sich an die vermutete Kreidegrundierung eine aller Wahrscheinlichkeit nach bleiweißhaltige zweite Grundierungsschicht an. Darüber befindet sich die eigentliche Malschicht, in der mittels REM-EDX-Analysen mehrere unterschiedliche Materialien nachgewiesen werden konnten. So wurde die Malschicht vermutlich sowohl mit Bleiweiß, als auch mit Dolomit und Kreide als Füllstoffe angemischt. Als Pigmente kamen u. a. ein grünes Kupferpigment und vermutlich Neapelgelb zum Einsatz. Letzteres könnte möglicherweise bereits in der Entstehungszeit aufgetragen worden sein. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit einer nachträglichen Überarbeitung mit diesem Pigment. Das in der Malschicht verwendete Bindemittel konnte aufgrund von massiver Bandenüberlagerungen mittels FTIR-Analytik nicht bestimmt werden.

In den folgenden beiden Tabellen sind die abschließenden Interpretationen sowohl der FTIR- als auch der REM-EDX-Untersuchungsergebnisse nochmals zusammengefasst.

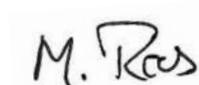
Tabelle 1: Interpretationen der FTIR-Untersuchungsergebnisse.

<i>Probe</i>	<i>Schicht 1</i>	<i>Schicht 2</i>
PB 1	Glutinleim mit anhaftenden Holzfasern	Ölüberzug
PB 2	Glutinleim mit anhaftenden Holzfasern	n. a.
PB 3	Calciumcarbonat, Dolomit, weitere nicht identifizierbare Substanzen	n. a.
PB 4	Calciumcarbonat mit org. Bindemittel	n. a.
PB 5	Ölüberzug	n. a.
PB 7	Glutinleim	Ölüberzug

Tabelle 2: Untersuchungsergebnisse der REM-EDX-Analysen mit möglichen Interpretationen. Die angegebenen Messpunkte beziehen sich auf die in Abbildung 20 dargestellte Messstellen-Kartierung.

<i>Messpunkt</i>	<i>Schicht</i>	<i>Messergebnis/Interpretation</i>
untere Grundierungsschicht	untere Grundierungsschicht	<u>Ca</u> , <u>C</u> , <u>O</u> , Si, Pb, P, Al, Mg Calciumcarbonat (Kreidegrund)
EDS Spot 1/weiße Pigmente	obere Grundierungsschicht	<u>Pb</u> , <u>O</u> , <u>C</u> , Al, Cu, Ca Bleiweiß-Grundierung
EDS Spot 2/helles Farbmittelkorn	obere Grundierungsschicht/Malschicht	<u>O</u> , <u>Mg</u> , <u>Ca</u> , <u>C</u> , Pb, Cu, Al, Fe, Mn Dolomit
EDS Spot 3/grünes Farbmittelkorn	obere Grundierungsschicht/Malschicht	<u>O</u> , <u>Cu</u> , <u>C</u> , Pb, Ca, Mg, Sr kupferhaltiges Pigment
EDS Spot 4/weißes Farbmittelkorn	Malschicht	<u>Pb</u> , <u>C</u> , <u>O</u> , Al, Cu, Ca Bleiweiß
EDS Spot 5/grünes Farbmittelkorn	Malschicht	<u>O</u> , <u>Cu</u> , <u>C</u> , Pb, Ca, Mg kupferhaltiges Pigment
EDS Spot 6/helles Farbmittelkorn	Malschicht	<u>Ca</u> , <u>O</u> , <u>C</u> , Cu, Al, Mg Calciumcarbonat (Kreide)
EDS Spot 7/helles Farbmittelkorn	Malschicht	<u>O</u> , <u>Ca</u> , <u>Mg</u> , <u>C</u> , Pb, Al Dolomit
EDS Spot 8/gelbes Farbmittelkorn	Malschicht	<u>C</u> , <u>O</u> , <u>Pb</u> , <u>Sb</u> , Al, Si, Fe, Cu, Ca Neapelgelb

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Markus Roos

6 Literatur

- ¹ DERRICK, M. R.; STULIK, D.; LANDRY, J. M. (1999): *Infrared Spectroscopy in Conservation Science. Scientific Tools for Conservation.*, Getty Publications Virtual Library, Los Angeles CA.
- ² PUCETAITE, M. (2012): *Archaeological wood from the Swedish warship Vasa studied by infrared microscopy*, Lund University Press, Lund.
- ³ HILFRICH, U. (2004): *Bioanorganische Chemie in der Restaurierung: Zur Reaktivität von Metallkomplexbildnern auf historischen Gemäldeoberflächen*, Tübingen University Press, Tübingen.
- ⁴ EASTAUGH, N.; WALSH, V.; CHAPLIN, T.; SIDDALL, R. (2008): *Pigment Compendium: A Dictionary and Optical Microscopy of Historic Pigments*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege

Referat Z V
Zentrallabor und Geo-Erkundung

Hofgraben 4
80539 München

Tel. 089/2114-322
E-Mail: simon.mindermann@blfd.bayern.de

30.01.2023

**Reg.-Bez. Oberbayern,
Freising Stadt,
Domberg 36**

D-1-78-124-43

Dom St. Maria und St. Korbinian

**Hier: Untersuchung von Malschichtproben eines Tafelgemäldes
(Abendmahl) aus der unteren Domsakristei**

Inhalt:

1	Anlass der Untersuchung.....	2
2	Gegenstand und Fragestellung	2
3	Untersuchungen	2
3.1	PF-1: Vergoldung	3
3.2	PF-2: Braune Malschicht.....	11
3.3	PF-3: Rosa Malschicht	21
4	Diskussion	27

1 Anlass der Untersuchung

Am 20.09.2022 wurden drei Malschichtproben durch Frau Julia Brandt (BLfD) zur Untersuchung am Zentrallabor eingereicht.

2 Gegenstand und Fragestellung

Es handelt sich um drei in Kunstharz eingebettete, geschliffene und polierte Malschichtproben des Tafelgemäldes aus der unteren Domsakristei des Freisinger Doms (Abendmahlsdarstellung, Hans Mair von Landshut, 1495). Die Proben stammen aus verschiedenen Farbbereichen: PF-1: Vergoldung, PF-2: Braune Malschicht, PF-3: Rosafarbene Malschicht. Im Zentrallabor sollen die vorhanden Pigmente analysiert werden. Die Proben wurden von Julia Brandt und Theresa Hilger (BLfD) entnommen.

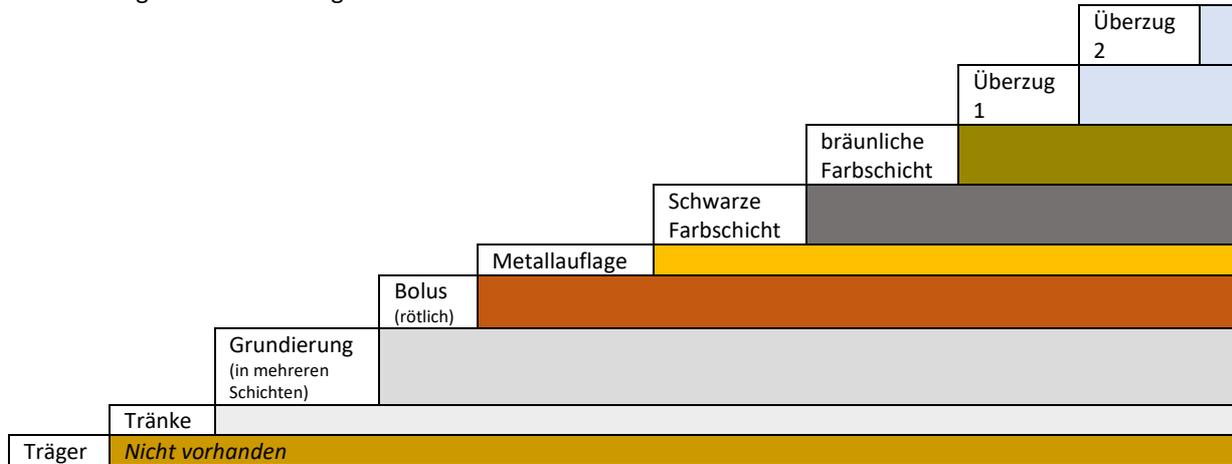
3 Untersuchungen

Die Untersuchung der Querschliffe erfolgte mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie am Rasterelektronenmikroskop (REM-EDX).

3.1 PF-1: Vergoldung

Probenbeschreibung (Theresa Hilger, BLfD):

Es handelt sich um 8 Schichten von denen anhand der mikroskopischen Untersuchung und bekannter historischer Techniken folgender Aufbau angenommen wird:



Es handelt sich höchstwahrscheinlich um eine mehrschichtige Grundierung auf einer vermutlich proteinischen Leimtränke des Trägers. Darauf liegt ein rötlicher Bolus auf dem eine goldene Blattmetallaufgabe angeschossen wurde. Darauf liegen zwei Farbschichten (schwarz und braun), die vermutlich als Patinierung der Vergoldung dienen sollten. Es liegen zwei Überzüge vor, ein dünnerer sowie ein recht dicker.¹

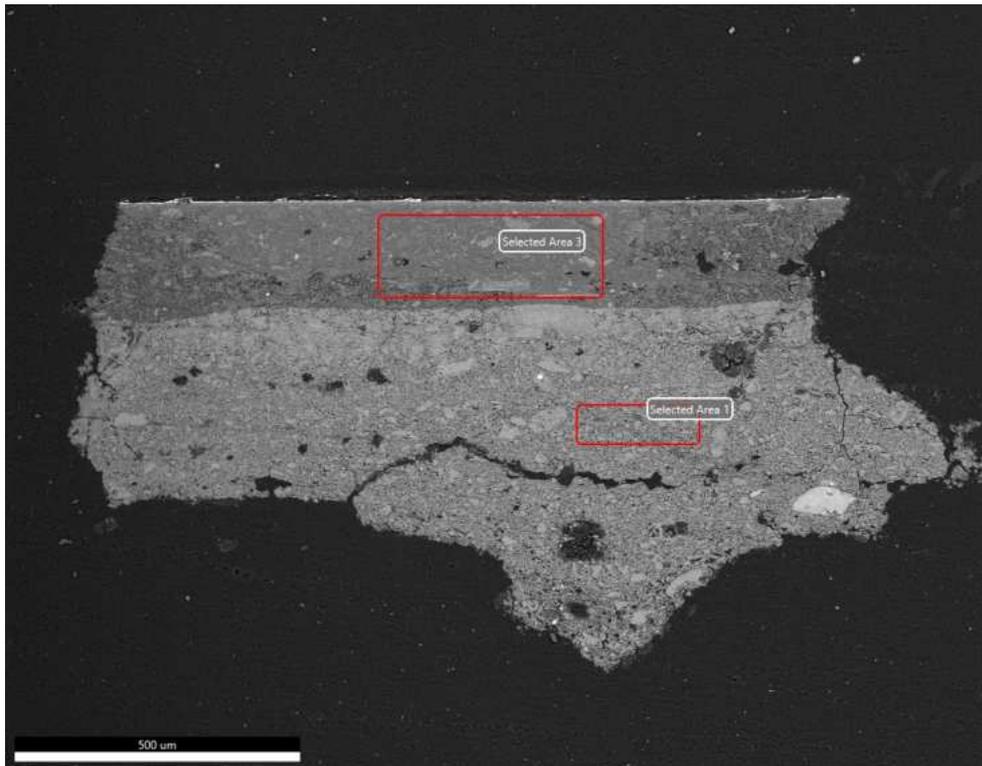


Abbildung 1: REM-BSE-Aufnahme von PF-1 mit Kartierung der Messbereiche an den Grundierungen (Abb. 3-4)

¹ Zitiert aus Probenprotokoll zu Probennummer PF 1 vom 04.08.2022 von Theresa Hilger (BLfD)

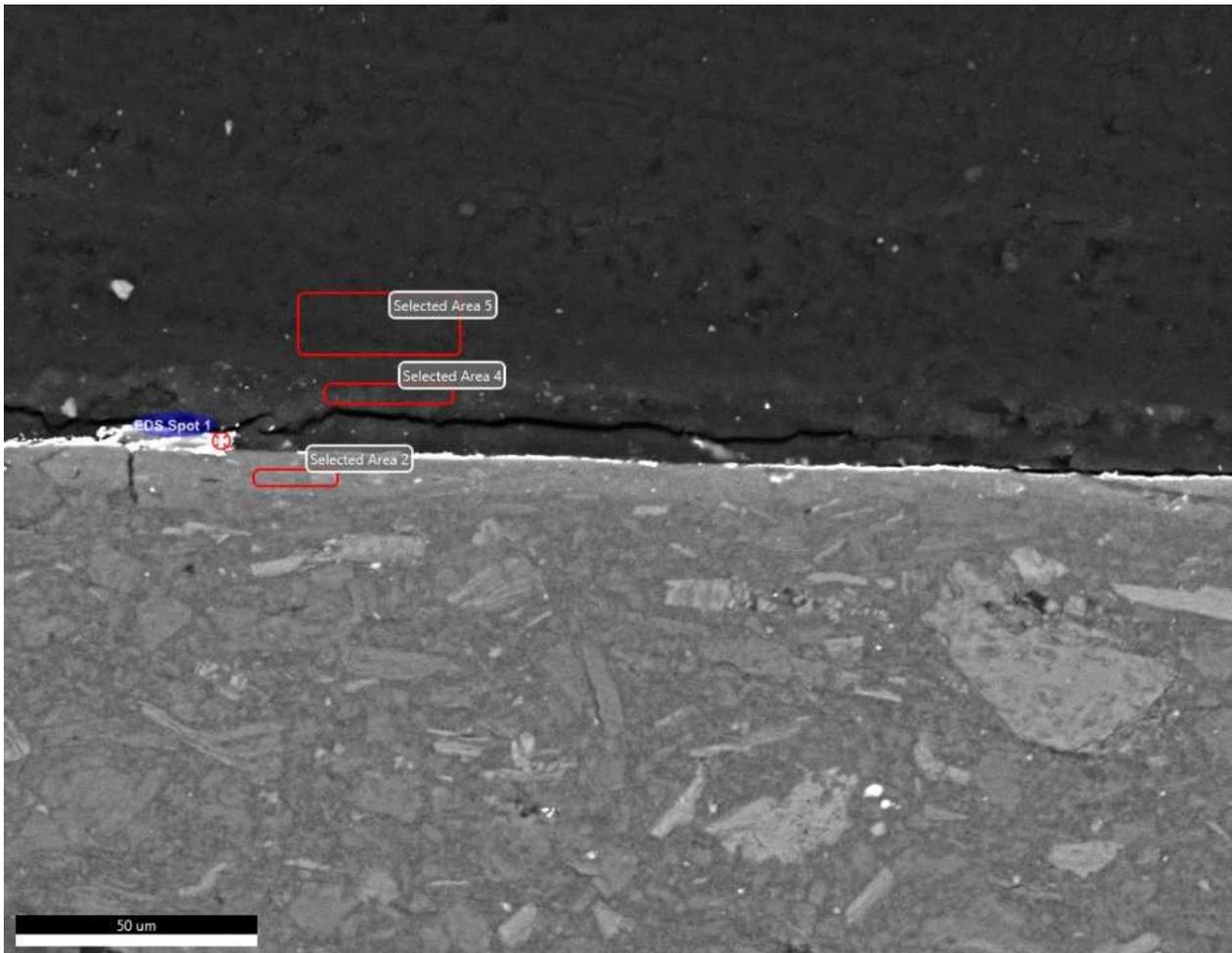


Abbildung 2: REM-BSE-Aufnahme von PF-1 mit Kartierung der Messungen im Bereich der Blattmetallaufgabe (Abb. 5-8)

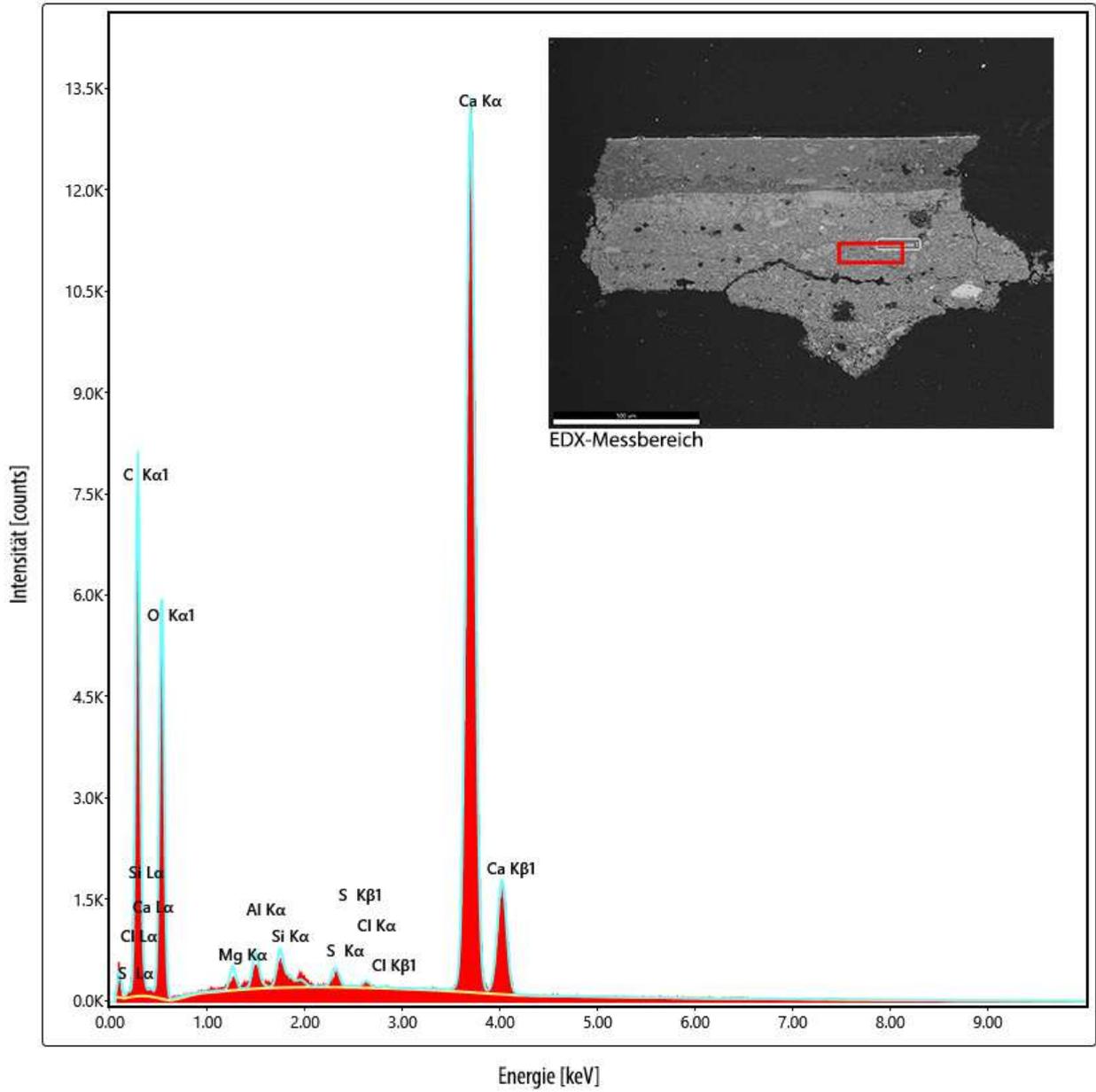


Abbildung 3: Probe PF-1: REM-EDX Spektrum Grundierung 1

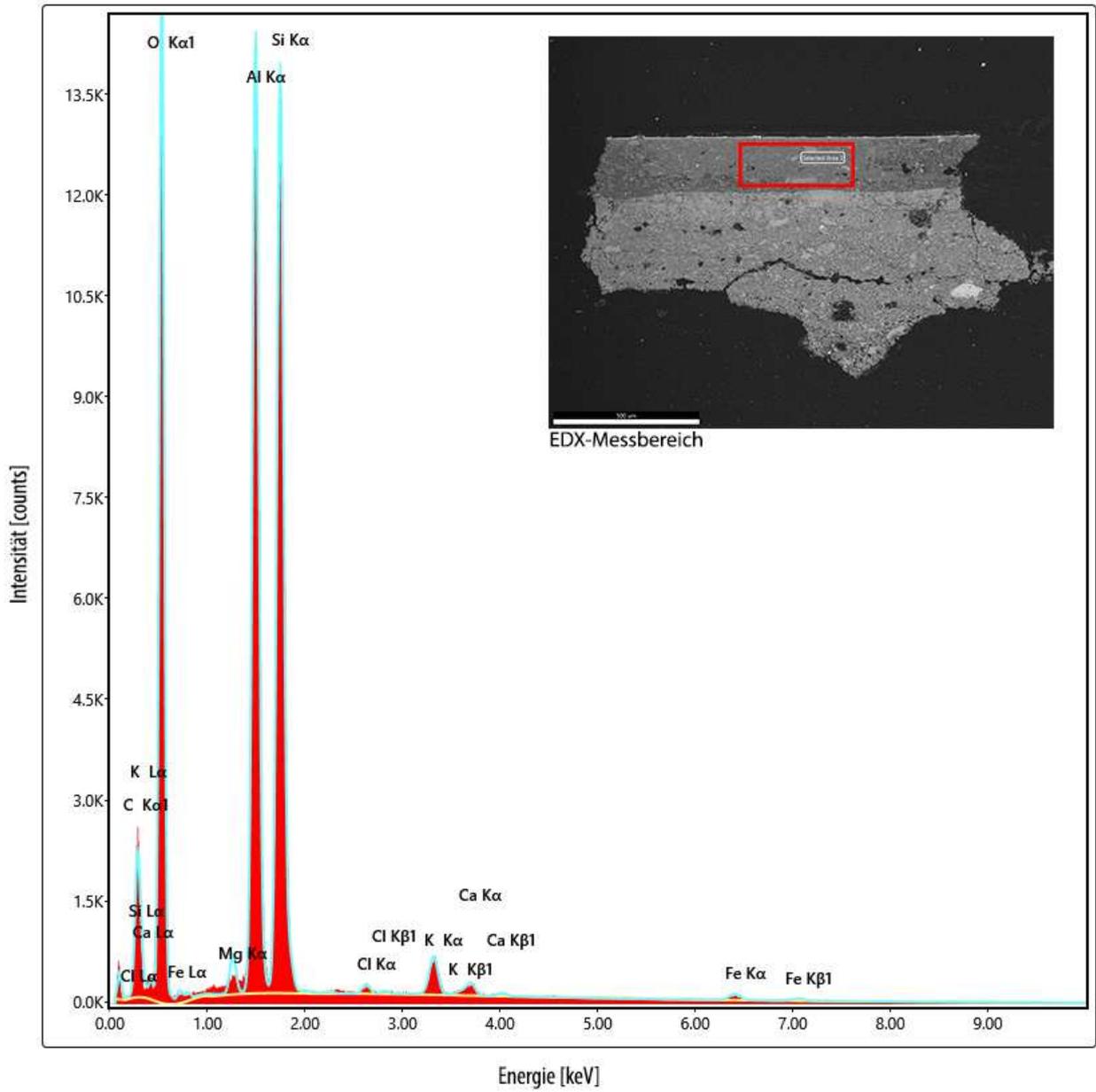


Abbildung 4: Probe PF-1: REM-EDX Spektrum Grundierung 2

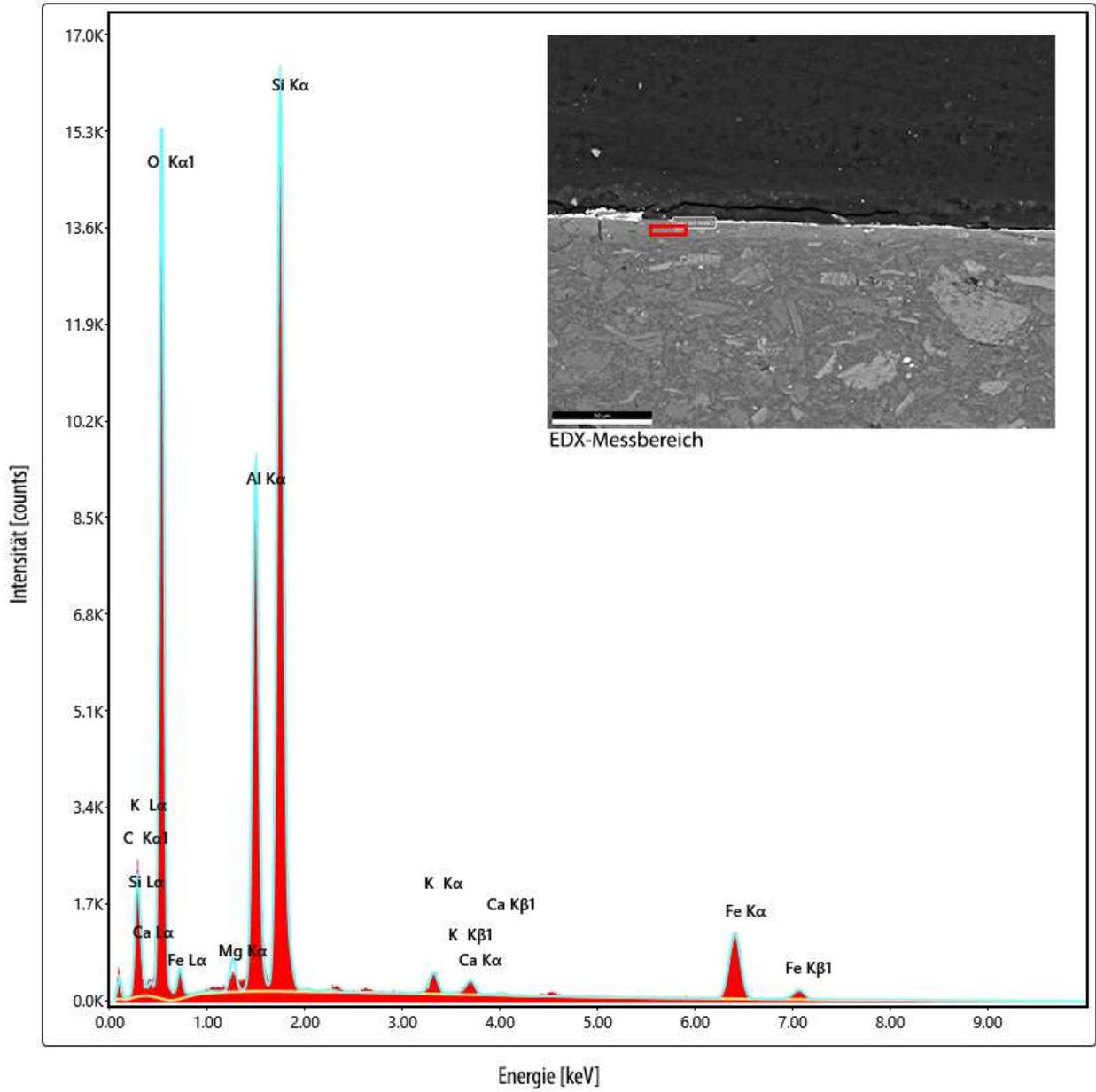


Abbildung 5: Probe PF-1: REM-EDX Spektrum des roten Poliments

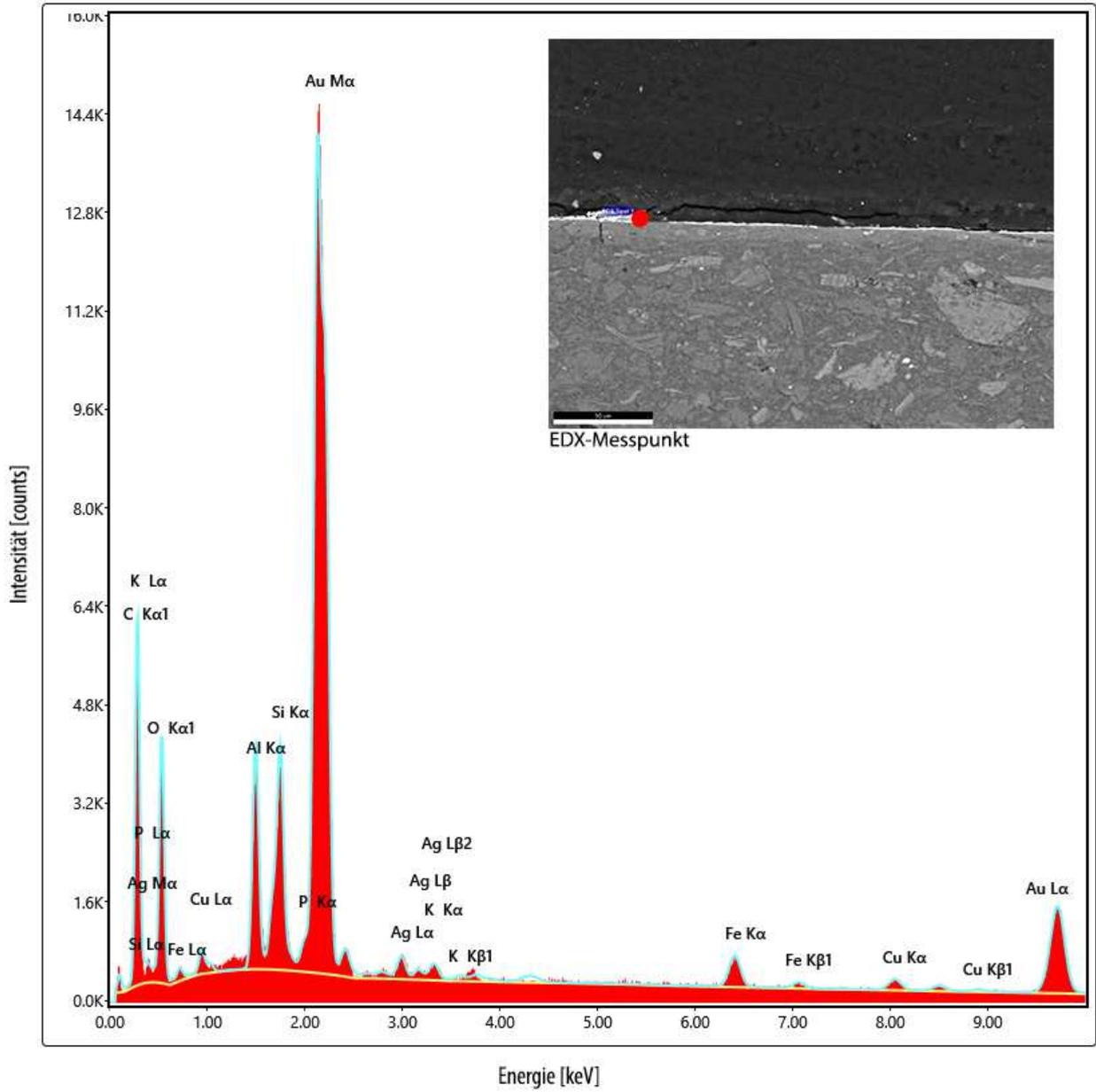


Abbildung 6: Probe PF-1: REM-EDX Spektrum der Blattmetallaufgabe

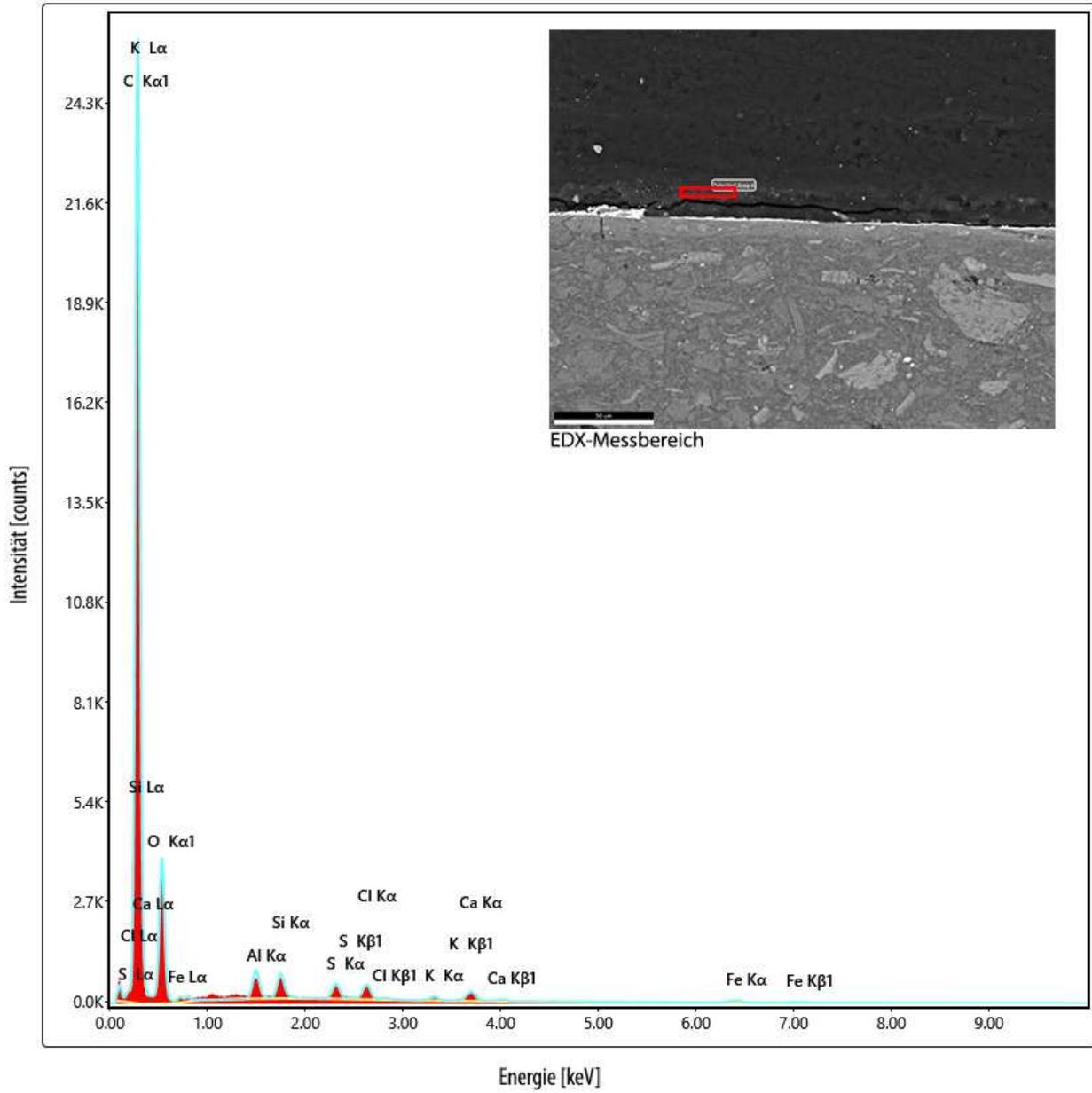


Abbildung 7: Probe PF-1: REM-EDX Spektrum Überzüge/Farbschichten 1

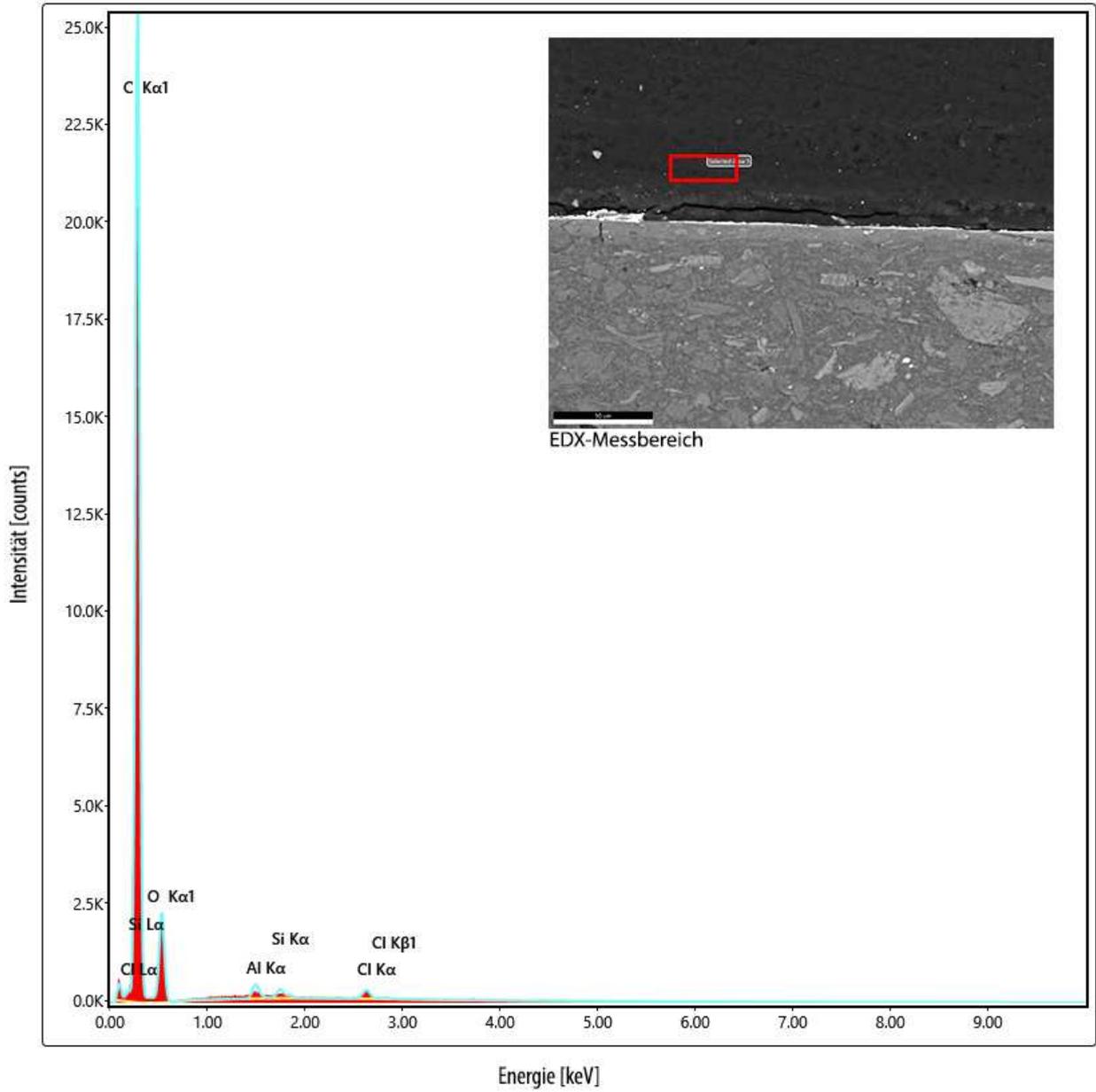
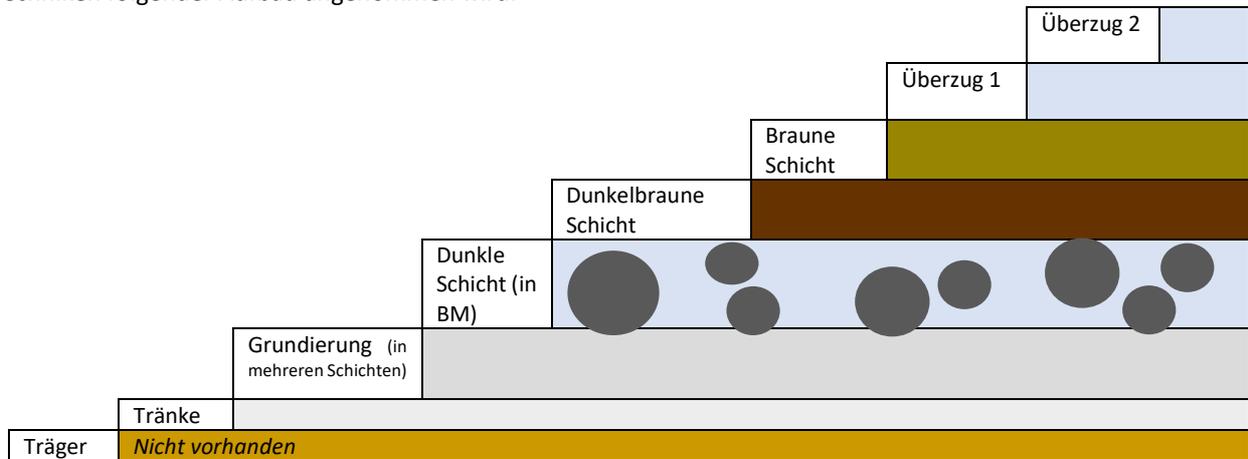


Abbildung 8: Probe PF-1: REM-EDX Spektrum Überzüge/Farbschichten 2

3.2 PF-2: Braune Malschicht

Probenbeschreibung (Theresa Hilger, BLfD):

Es handelt sich um 7 Schichten von denen anhand der mikroskopischen Untersuchung und bekannter historischer Techniken folgender Aufbau angenommen wird:



Es handelt sich höchstwahrscheinlich um eine mehrschichtige Grundierung auf einer vermutlich proteinischen Leimtränke des Trägers. Darauf liegen schwarze Partikelchen – eingebettet in ein fluoreszierendes Bindemittel (ggf. eine Vorzeichnung?). Darauf liegen zwei Farbschichten (homogen dunkelbraun und braun mit Partikeln). Es liegen zwei Überzüge vor, ein dünnerer sowie ein recht dicker. Beide scheinen eine aufliegende Schmutzschicht aufzuweisen.²

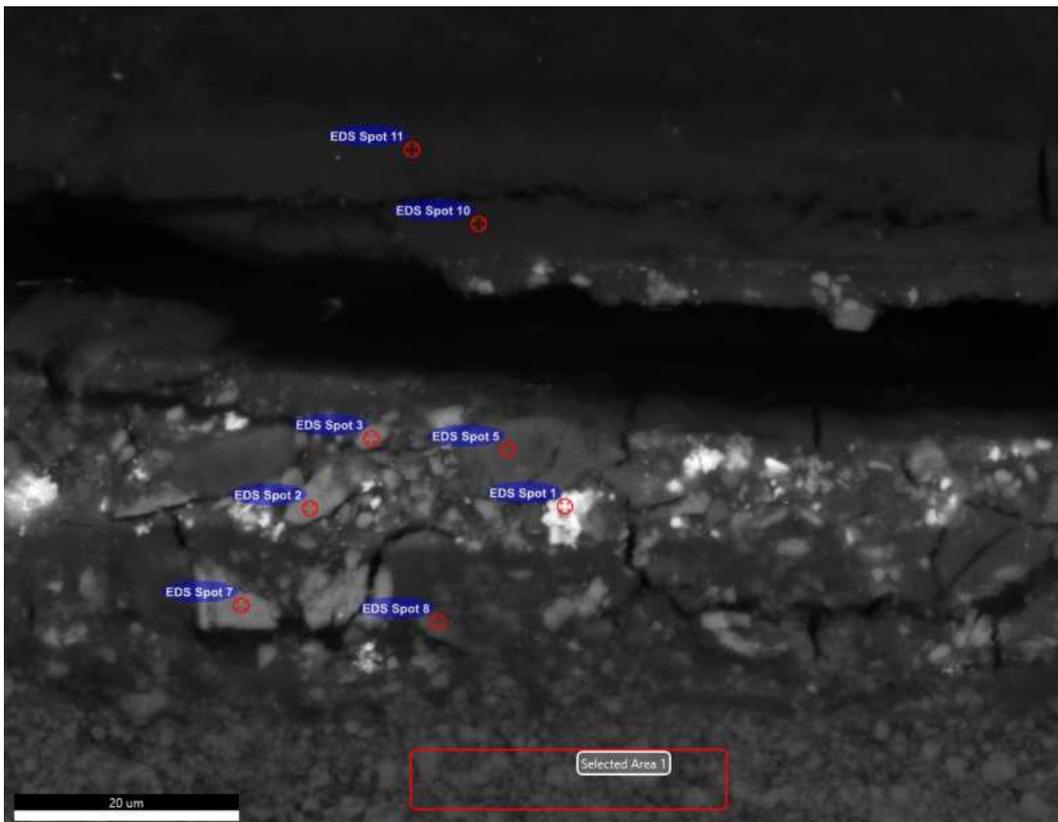


Abbildung 9: REM-BSE-Aufnahme von PF-2 mit Kartierung der Messbereiche.

² Zitiert aus Probenprotokoll zu Probennummer PF 2 vom 04.08.2022 von Theresa Hilger (BLfD)

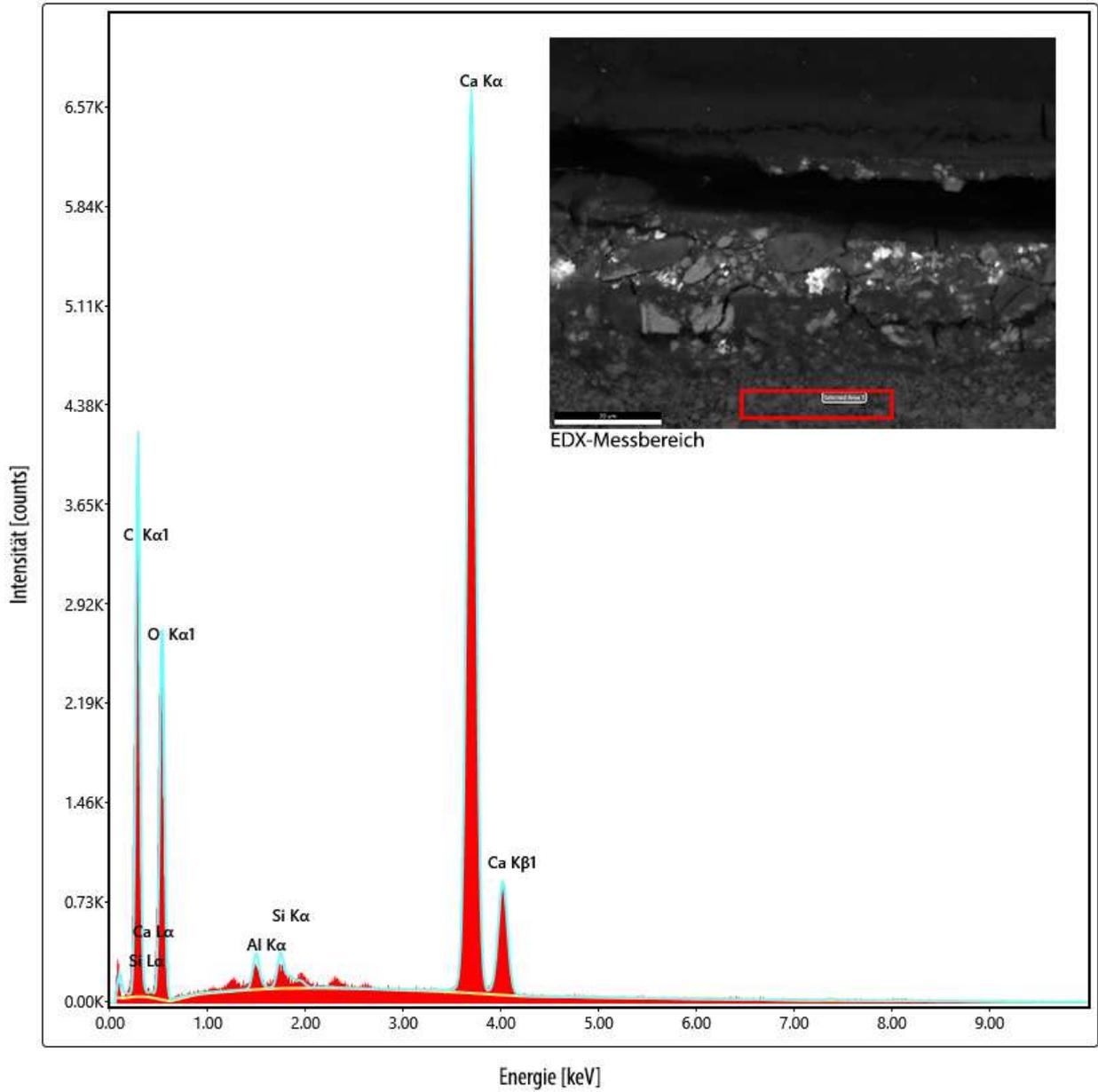


Abbildung 10: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum der Grundierung (Selected Area 1)

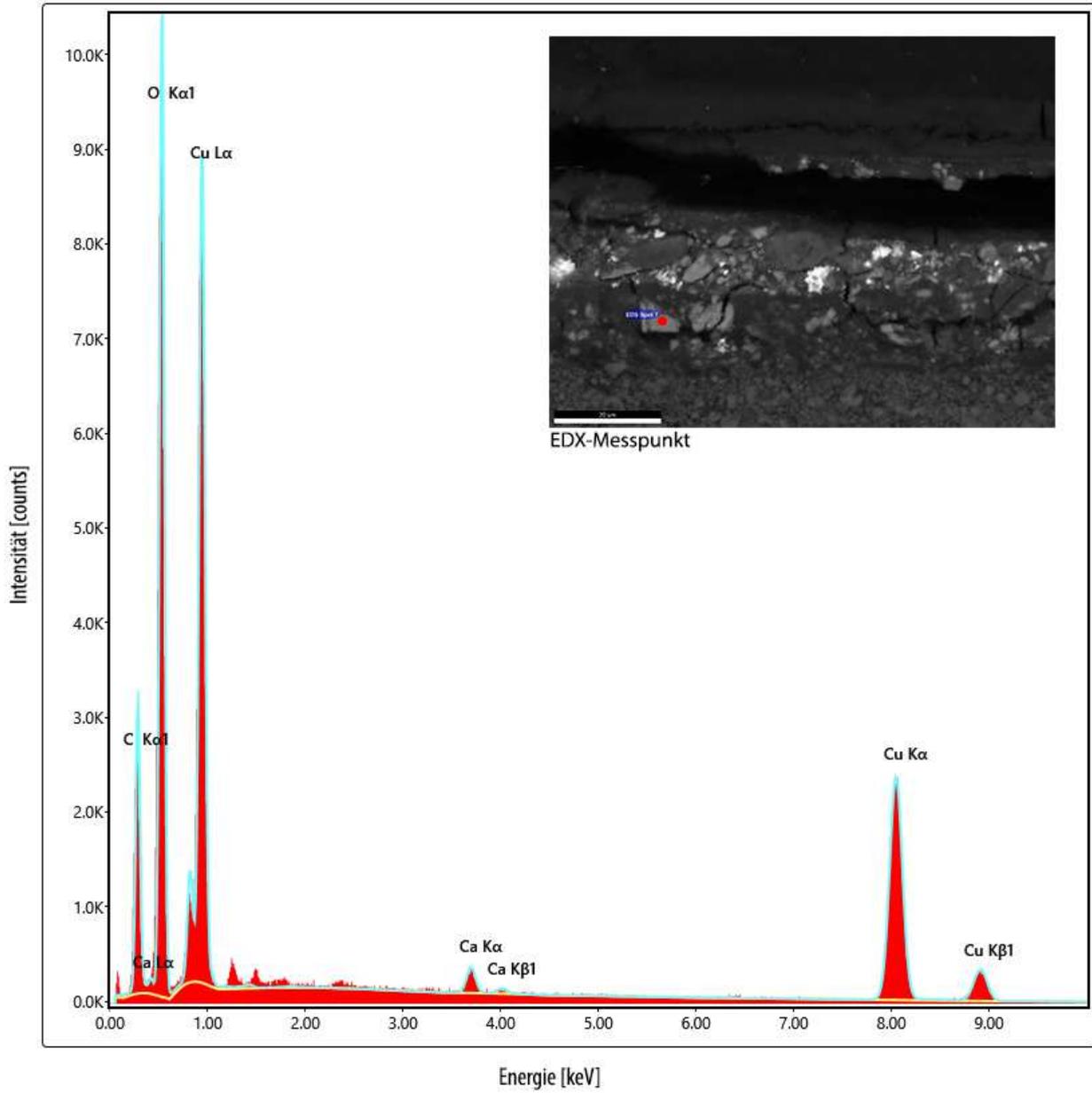


Abbildung 11: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum eines kupferhaltigen Kornes in der untersten Malschicht (Spot 7)

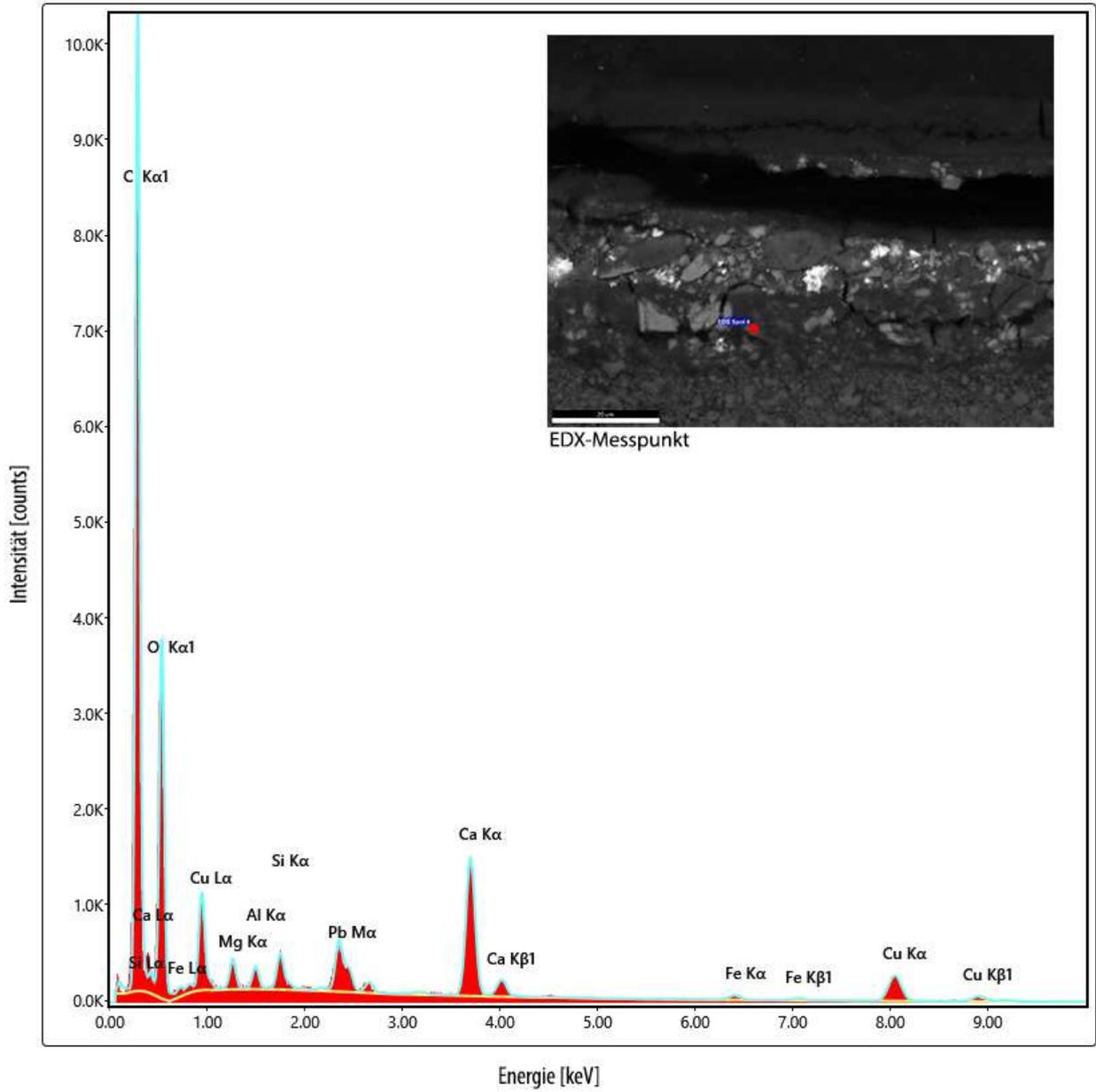


Abbildung 12: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum eines Kornes in der untersten Malschicht (Spot 8)

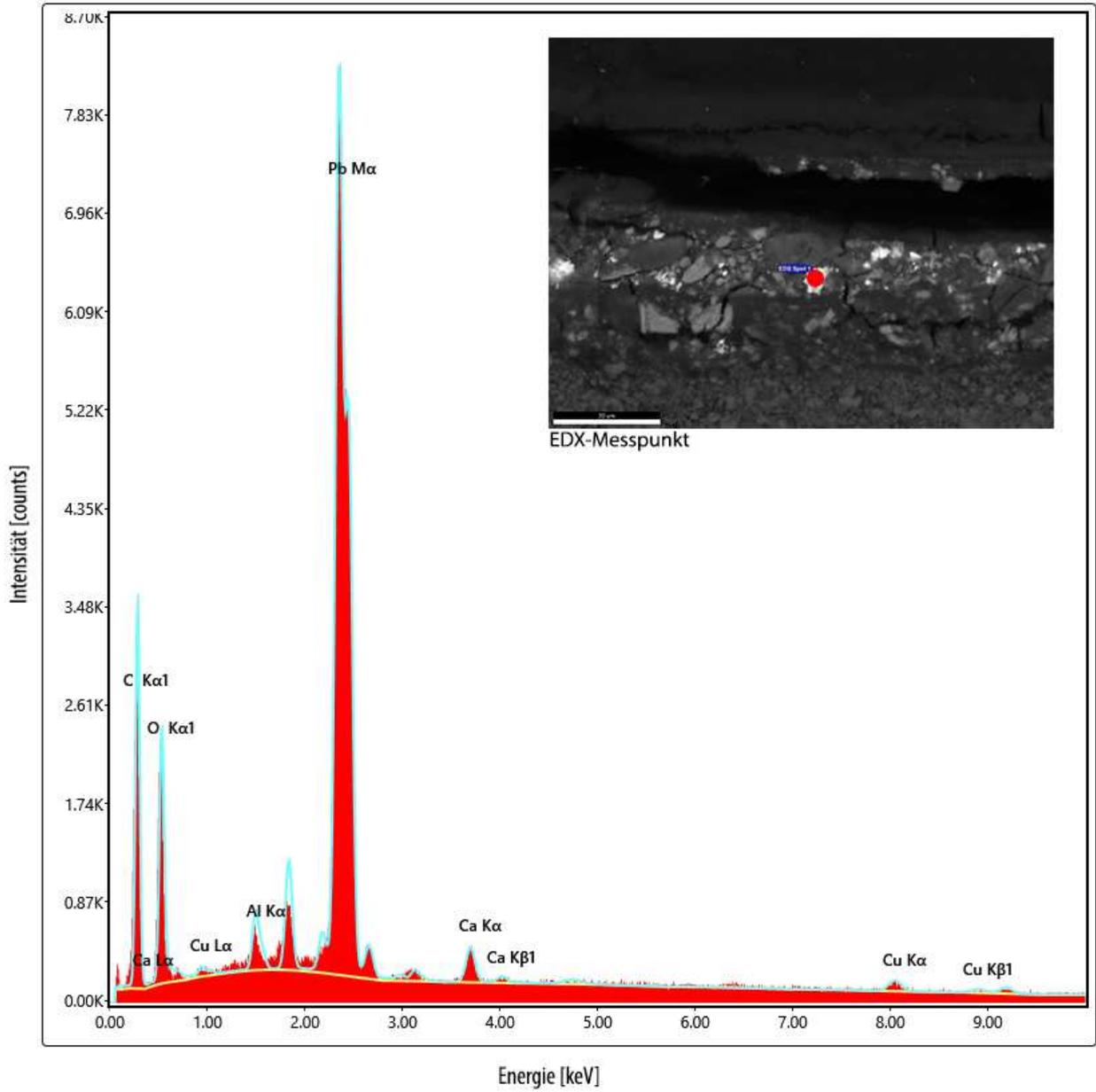


Abbildung 13: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum eines stark bleihaltigen Kornes in der zweiten Malschicht (Spot 1)

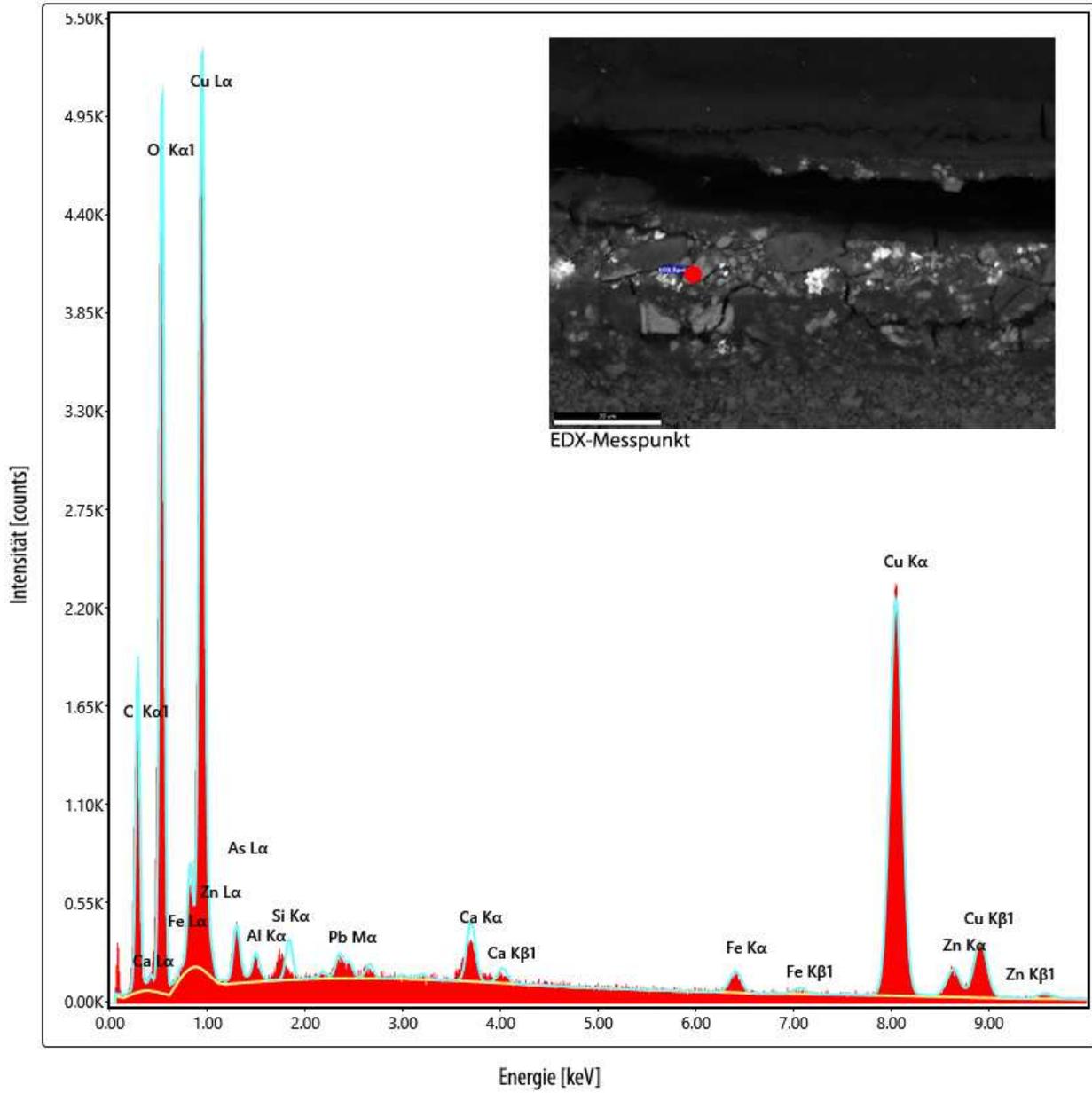


Abbildung 14: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum eines Kornes in der zweiten Malschicht (Spot 2)

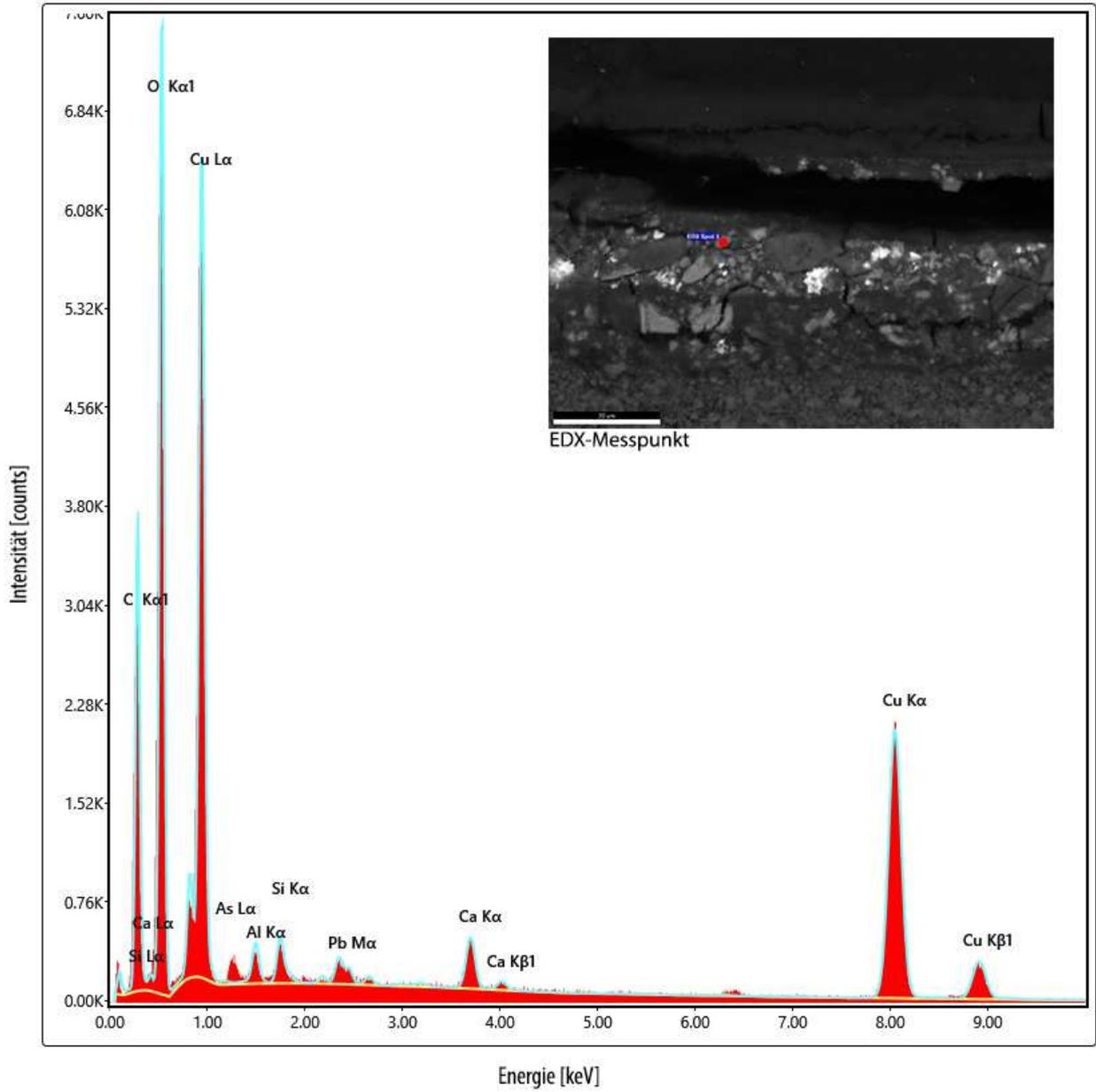


Abbildung 15: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum eines Kornes in der zweiten Malschicht (Spot 3)

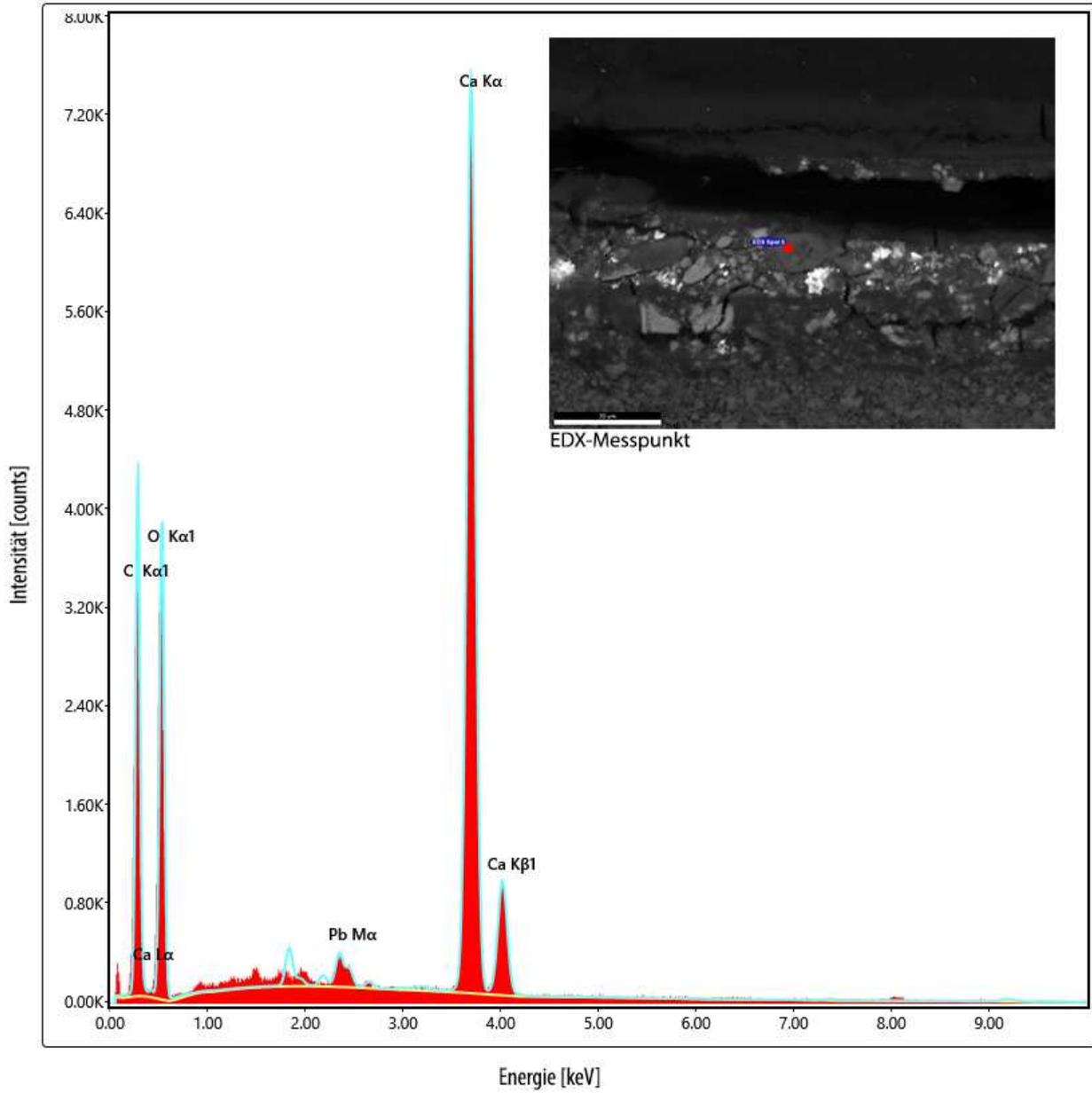


Abbildung 16: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum eines Kornes in der zweiten Malschicht (Spot 5)

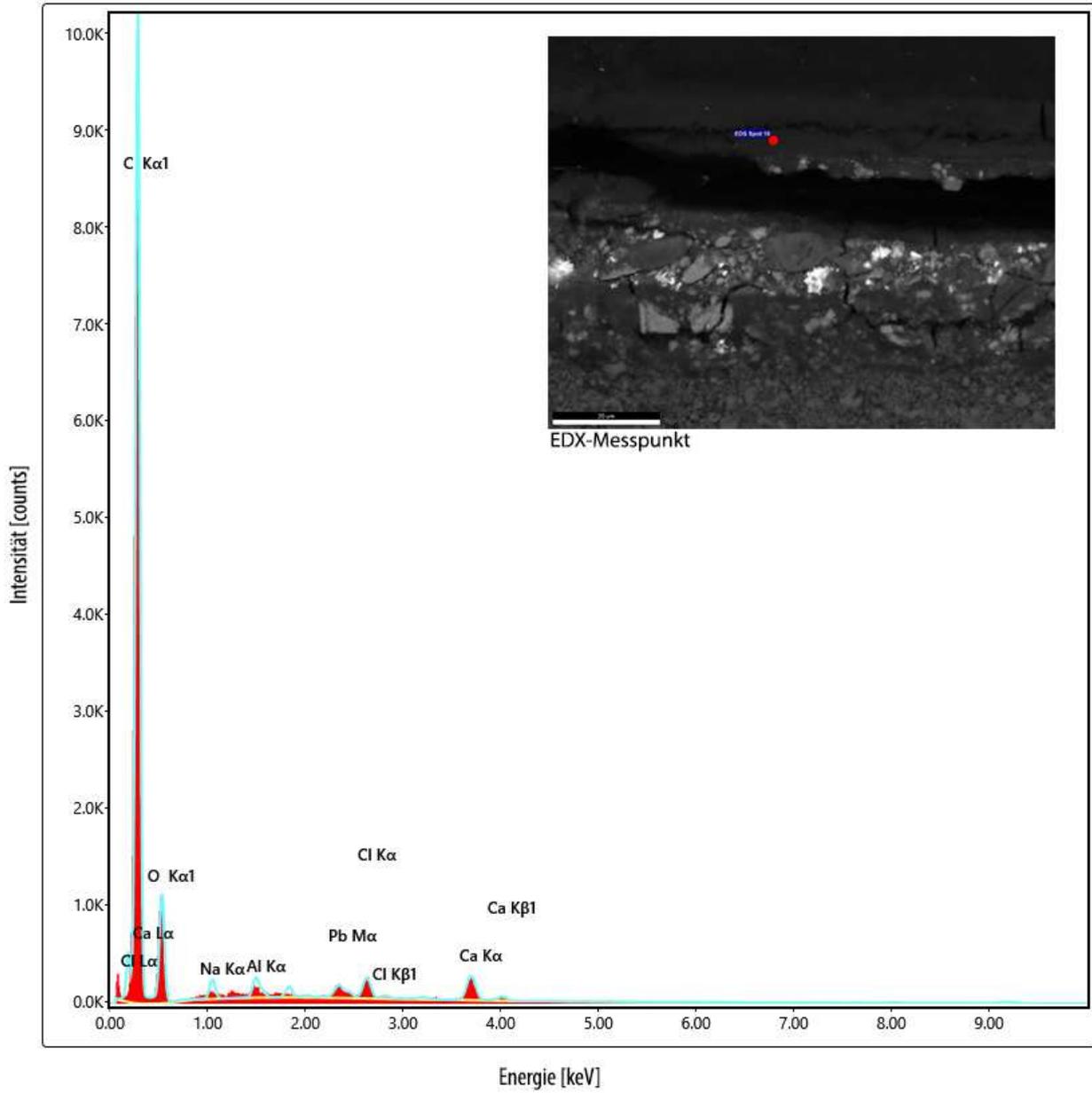


Abbildung 17: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum Überzug 1 (Spot 10)

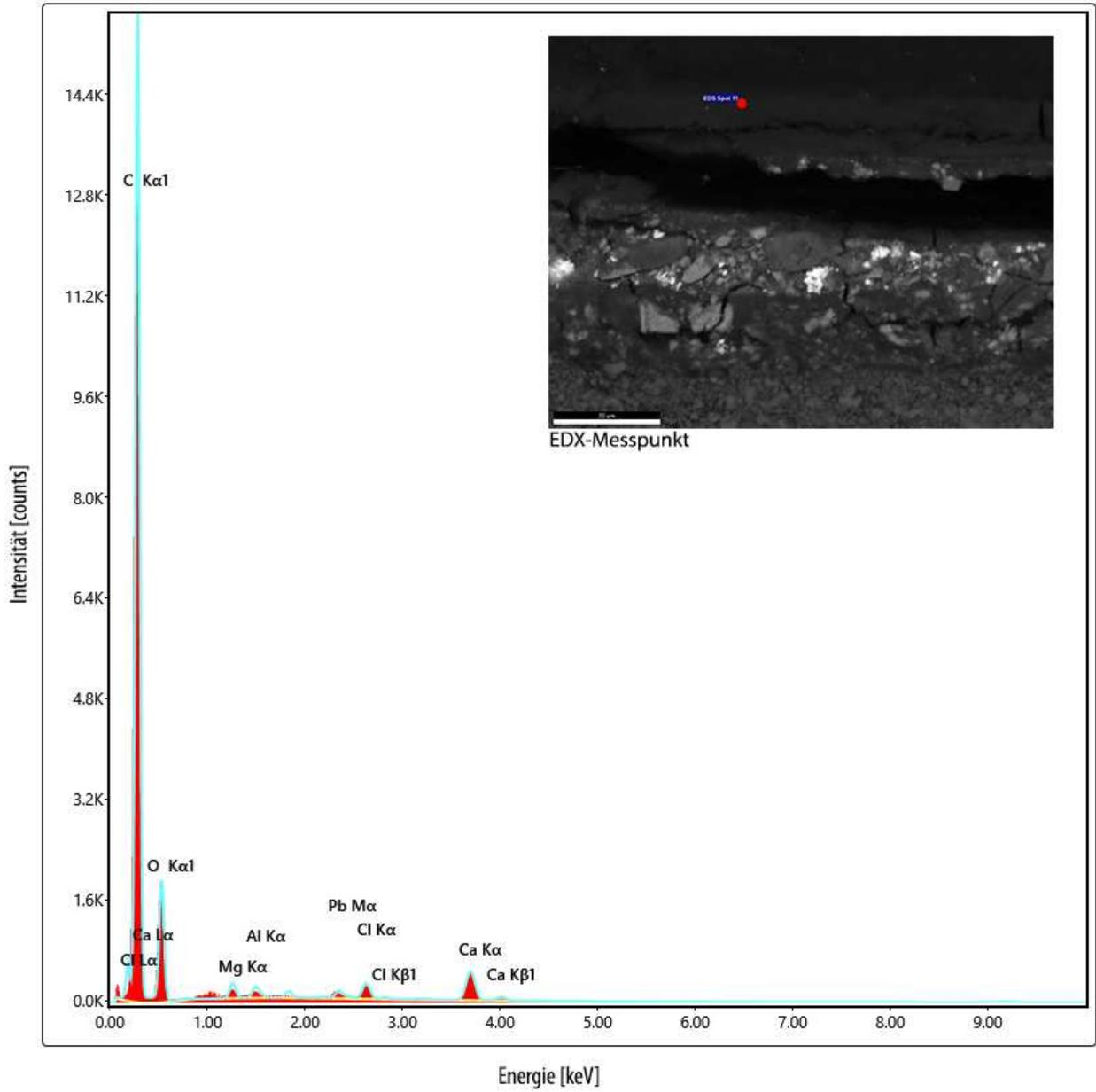


Abbildung 18: Probe PF-2: REM-EDX-Spektrum Überzug 2 (Spot 11)

3.3 PF-3: Rosa Malschicht

Probenbeschreibung (Theresa Hilger, BLfD):

Es handelt sich um 6 Schichten von denen anhand der mikroskopischen Untersuchung und bekannter historischer Techniken folgender Aufbau angenommen wird:³

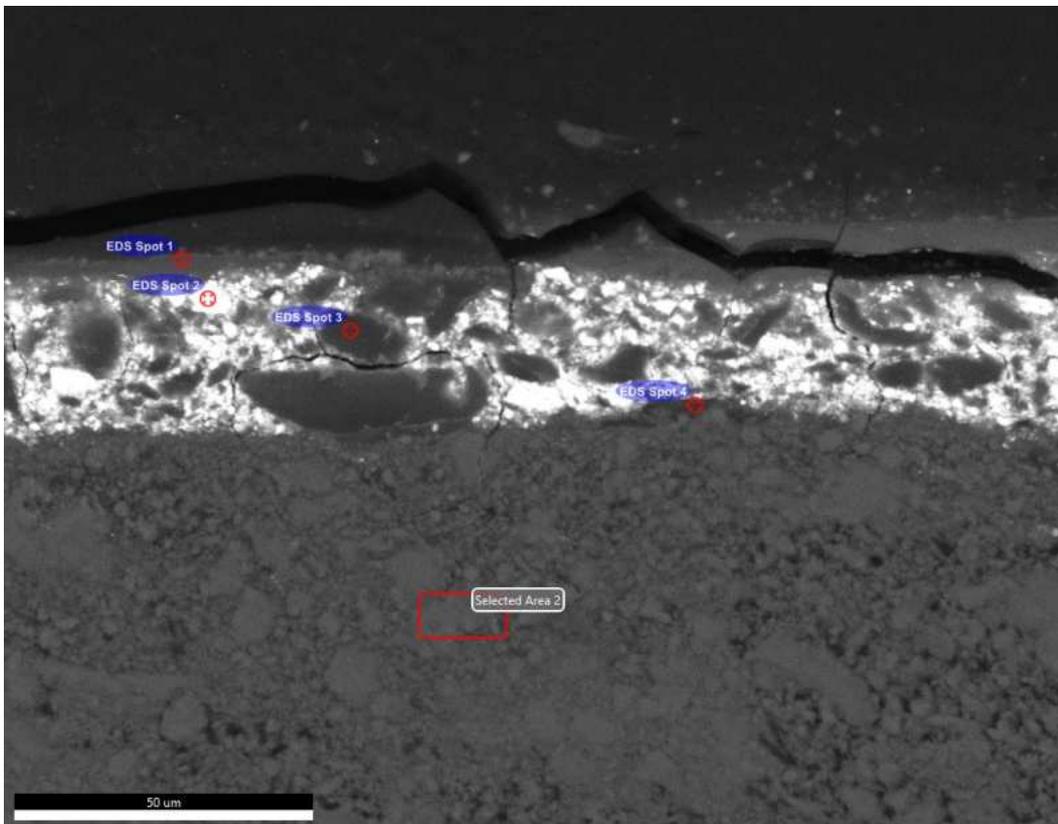
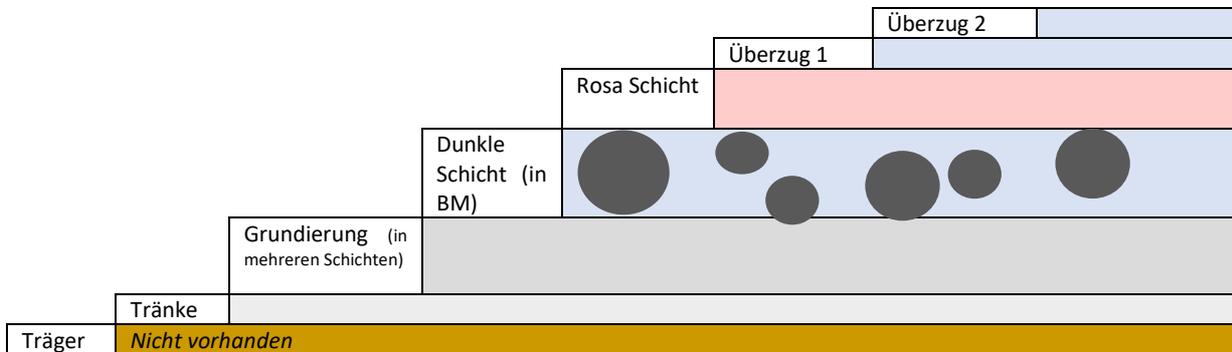


Abbildung 19: REM-BSE-Aufnahme von PF-3 mit Kartierung der Messbereiche

³ Zitiert aus Probenprotokoll zu Probennummer PF 3 vom 04.08.2022 von Theresa Hilger (BLfD)

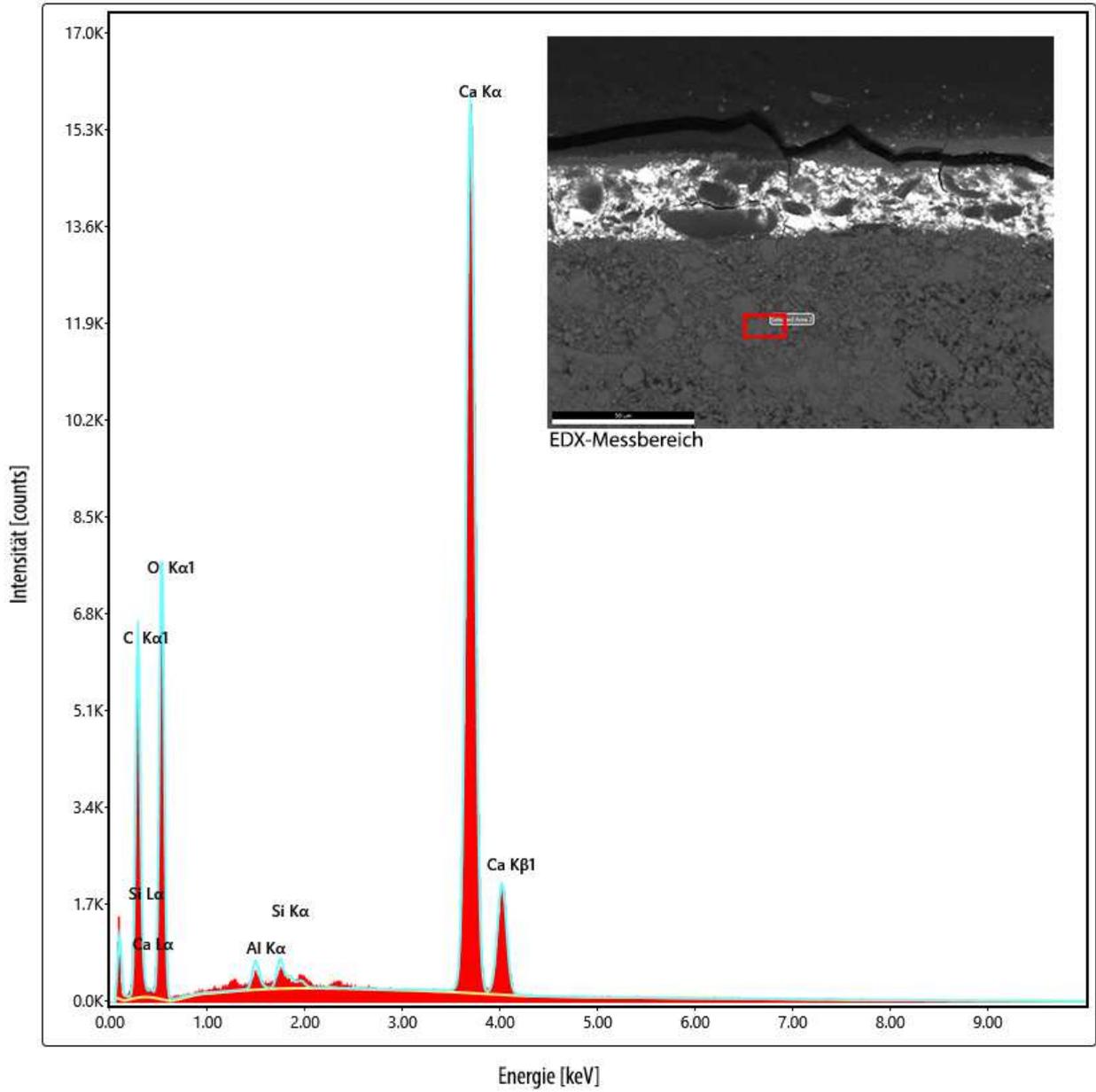


Abbildung 20: Probe PF-3: REM-EDX-Spektrum der Grundierung (Selected Area 2)

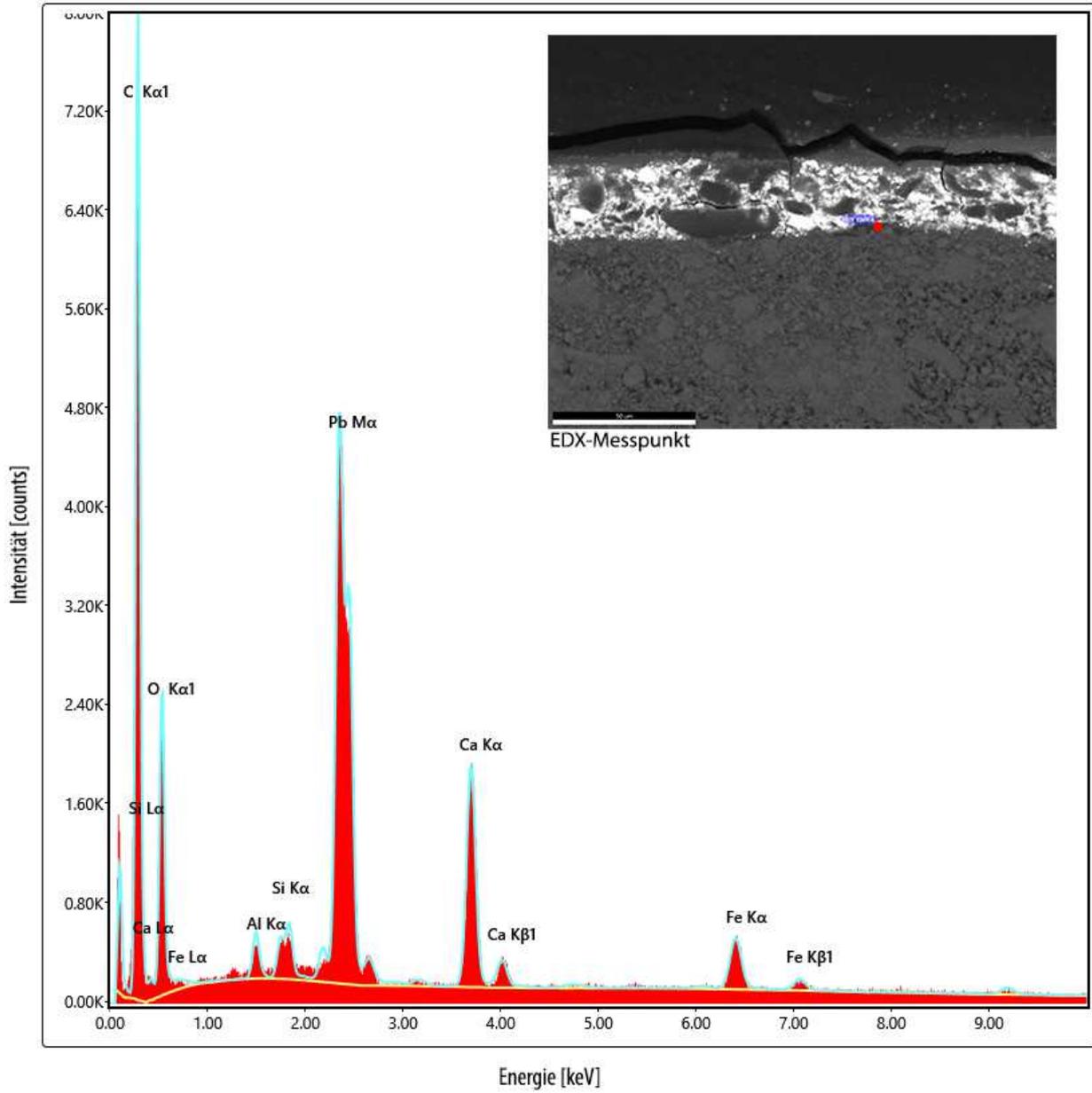


Abbildung 21: Probe PF-3: REM-EDX-Spektrum aus dem Bereich der mutmaßlichen Unterzeichnung (Spot 4)

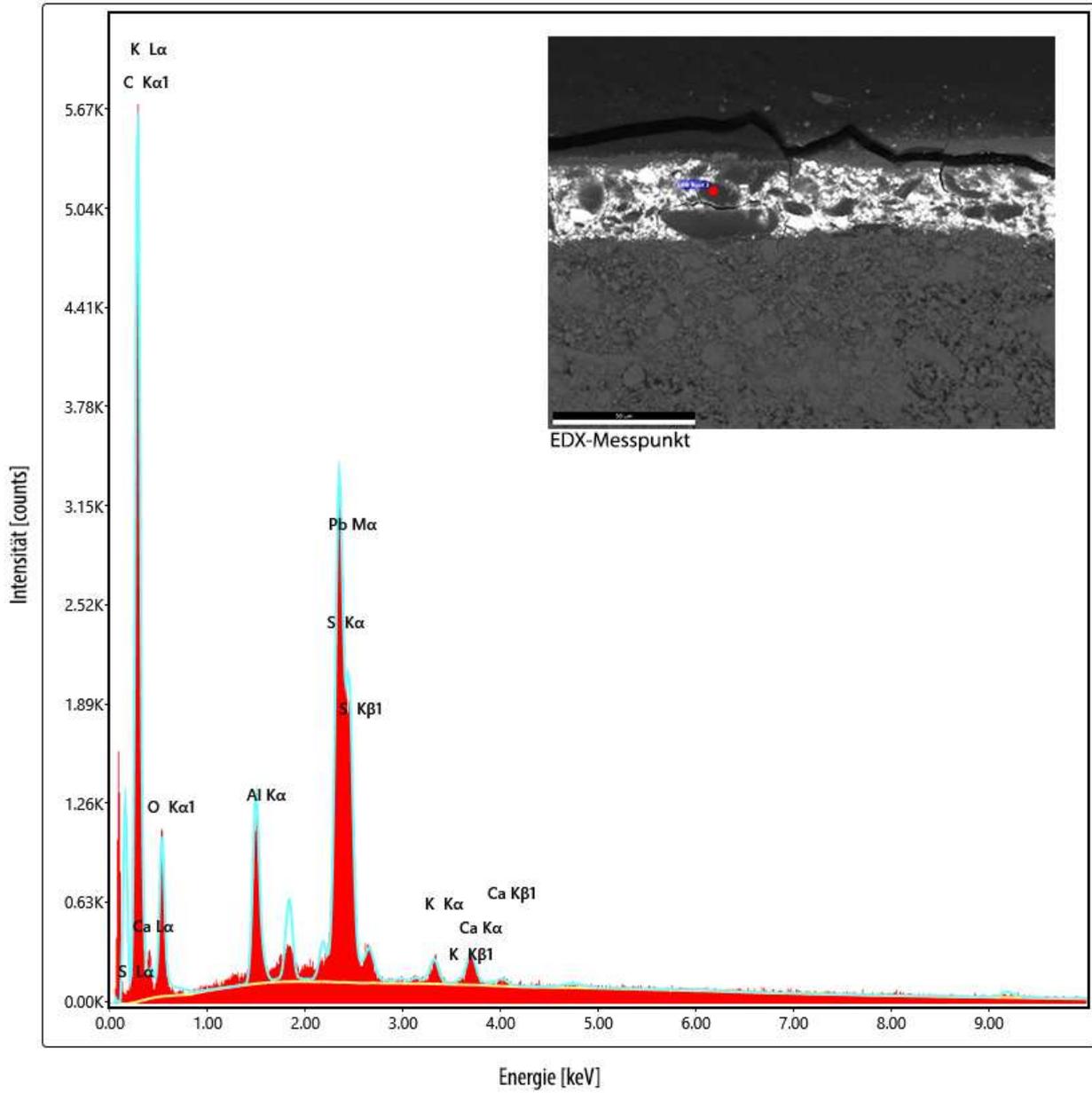


Abbildung 22: Probe PF-3: REM-EDX-Spektrum eines roten Pigmentkorns im Bereich der rosa Farbschicht (Spot 3)

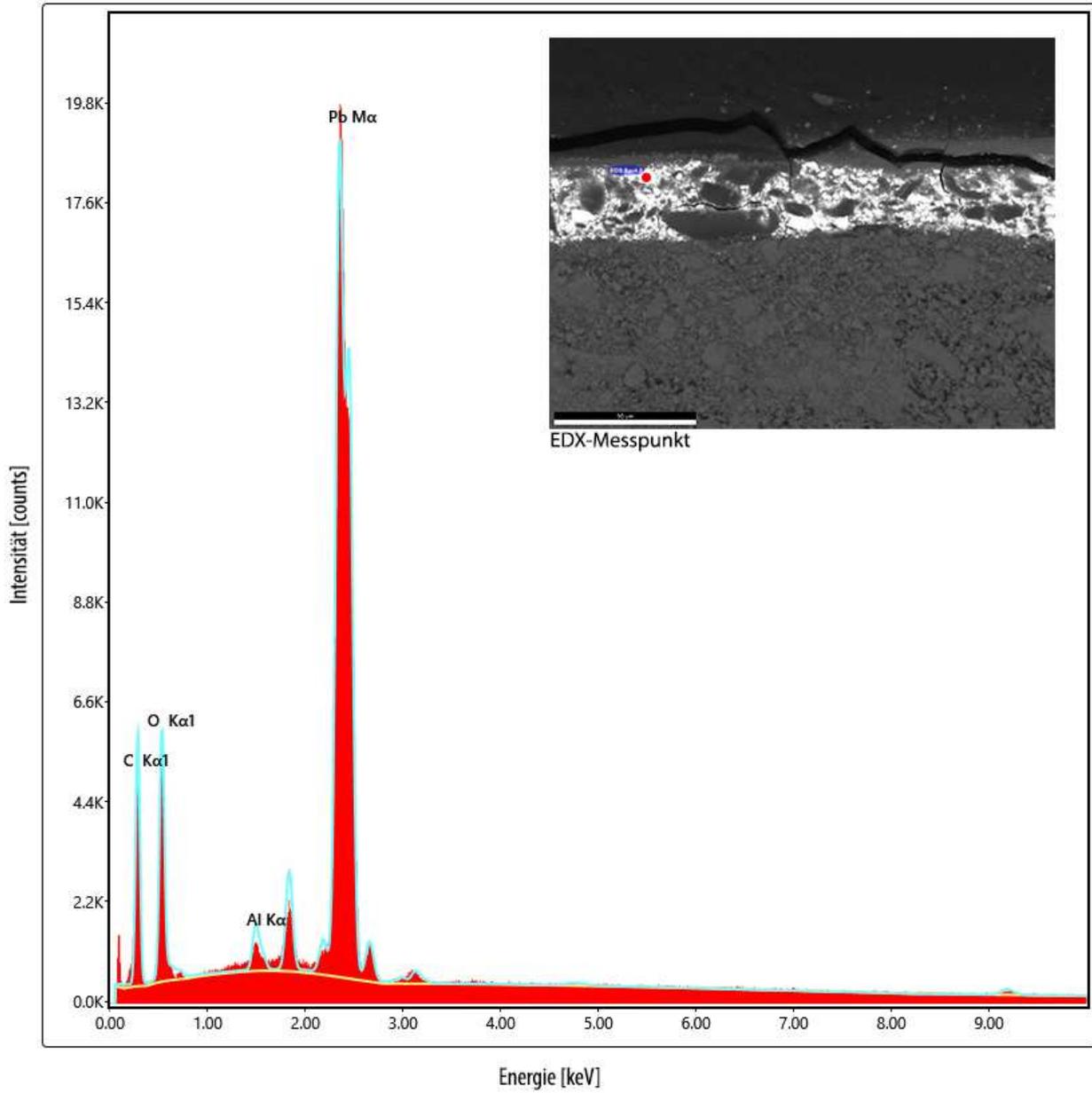


Abbildung 23: Probe PF-3: REM-EDX-Spektrum eines weißen Pigmentkorns im Bereich der rosa Farbschicht (Spot 2)

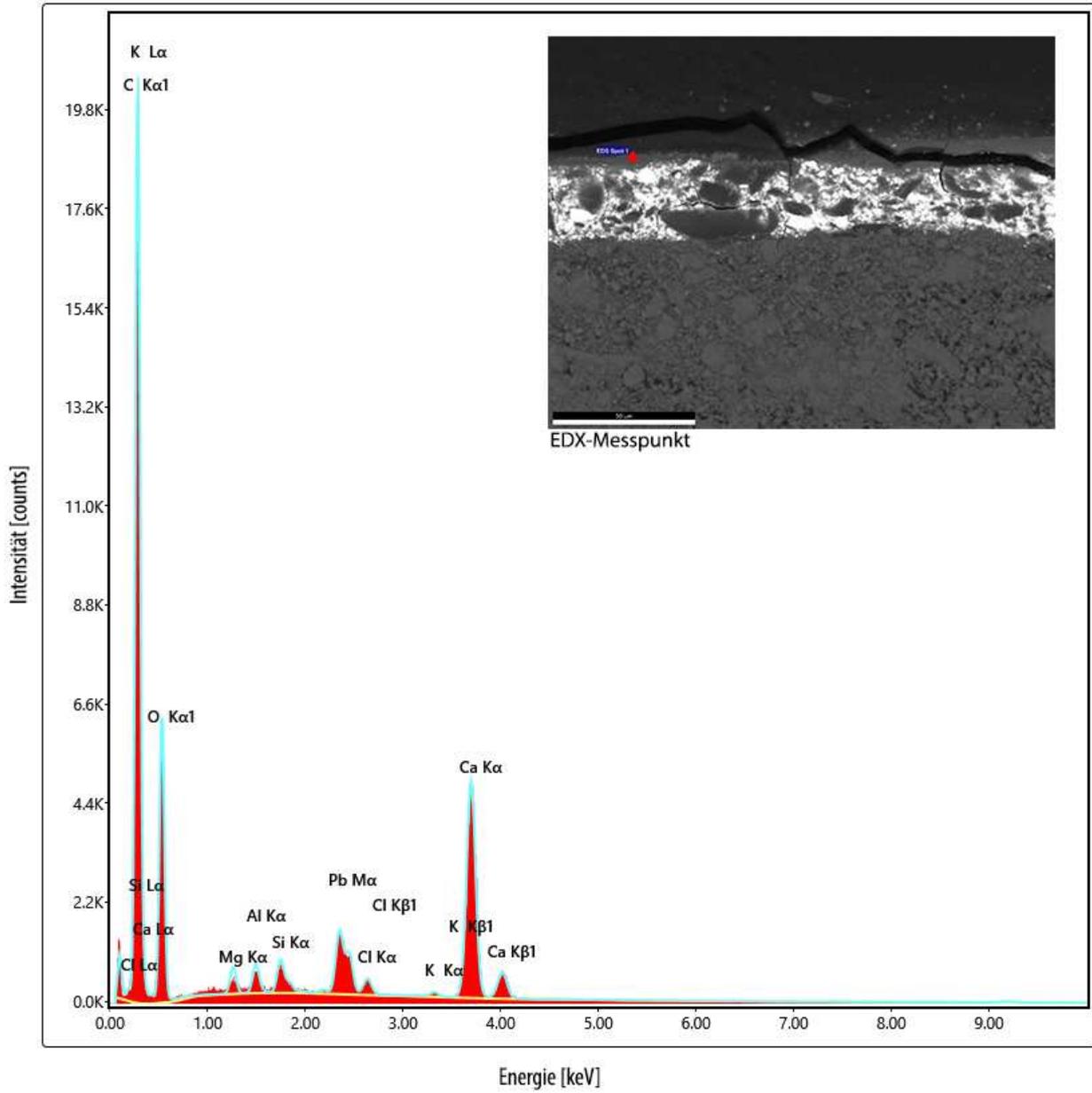


Abbildung 24: REM-EDX-Spektrum aus dem Bereich der mutmaßlichen Schmutzschicht (Spot 1)

4 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der REM-EDX Analyse und mögliche Interpretationen kurz zusammengefasst.

PF-1: Vergoldung:

REM-EDX Messung	Abb.	Hauptelemente	Nebenelemente	Interpretation
Überzüge/Farbschichten 2	8	C, O	Al, Si, Cl	Bindemittelreiche Schicht
Überzüge/Farbschichten 1	7	C, O	Al, Si, S, Cl, Ca, K, Fe	Bindemittelreiche Schicht
Metallaufgabe	6	Au	Al, Si, Ag, K, Fe, Cu	Blattgoldaufgabe
Poliment	5	Al, Si, O	Fe, Ca, K, Mg, C	natürlicher Ocker
Grundierung 2	4	Al, Si, O	K, Ca, Cl, Fe, Mg	Weißer Tonminerale (z.B. Kaolinit)
Grundierung 1	3	Ca, C, O	Si, Al, S, Mg, Cl	Calciumcarbonat

Die Grundierung ist zweischichtig aufgebaut: Über einer Kreidegrundierung liegt eine Schicht, die wahrscheinlich aus weißen Tonmineralen wie Kaolinit besteht (weißer Bolus). Es folgt eine rote Bolusschicht, die wahrscheinlich aus einem natürlichen roten Ocker (Eisenoxid und Tone) besteht. Bei der folgenden Blattmetallaufgabe handelt es sich um Blattgold mit geringem Silber und Kupferanteil. Die lichtmikroskopisch erkennbaren anschließenden Farbschichten und Überzüge, die mutmaßlich der Patinierung bzw. Tönung der Goldschicht dienen, weisen in der REM-EDX keine eindeutig zuzuordnenden Elemente auf und bleiben daher unidentifiziert.

PF-2: Braune Farbschicht

REM-EDX Messung	Abb.	Hauptelemente	Nebenelemente	Interpretation
Überzug 2 (Spot 11)	18	C, O	Ca, Cl, Mg, Al, Pb	Bindemittelreiche Schicht
Überzug 1 (Spot 10)	17	C, O	Ca, Cl, Pb, Al, Na	Bindemittelreiche Schicht
Malschicht 2 (Spot 5)	16	Ca, C, O	Pb	Calciumcarbonat
Malschicht 2 (Spot 3)	15	Cu, O, C	Si, Al, Ca, As, Pb	
Malschicht 2 (Spot 2)	14	Cu, O, C	As, Ca, Fe, Zn, Al, Si,	
Malschicht 2 (Spot 1)	13	Pb, C, O	Ca, Al, Cu	Bleiweiß
Malschicht 1 (Spot 7)	12	Cu, O, C	Ca	
Malschicht 1 (Spot 8)	11	C, O, Ca	Mg, Al, Si, Cu	
Grundierung	10	Ca, C, O	Al, Si	Calciumcarbonat

Aufgrund starker Rissbildung im Querschliff, ist eine direkte Überlagerung der REM-Aufnahmen mit den lichtmikroskopischen Abbildungen hier nicht möglich gewesen. Daher kann den in den REM-Aufnahmen sichtbaren Pigmentkörnern keine Farbigeit zugeordnet werden, was die Interpretation der Messergebnisse erschwert. An eine Calciumcarbonat-Grundierung anschließend sind zwei Farbschichten sicher erkennbar. Die untere besteht aus kupferhaltigen Körnern, ausgemischt mit Calciumcarbonat. Die zweite zeigt darüber hinaus noch kupferhaltige Körner, die kleinere Anteile an Arsen und Zink aufweisen, sowie stark bleihaltige Körner. Bei Letzteren handelt es sich vermutlich um Bleiweiß. Die EDX-Spektren der Überzüge zeigen neben sehr hohen Kohlenstoff und Sauerstoffanteilen leicht unterschiedliche Anteile an Nebenelementen, die jedoch keine Interpretation zulassen.

PF-3: Rosa Farbschicht

REM-EDX Messung	Abb.	Hauptelemente	Nebenelemente	Interpretation
Schmutzschicht (Spot 1)	24	C, O, Ca	Si, Mg, Al, Cl, Pb, K	Schmutzschicht
Rosa Farbschicht, weißes Korn (Spot 2)	23	Pb, C, O	Al	Bleiweiß
Rosa Farbschicht, rotes Korn (Spot 3)	22	C, S, O, Al	K, Ca, Pb	Verlackter Farbstoff
Unterzeichnung (Spot 4)	21	C, Pb, Ca, O	Fe, Al, Si	
Grundierung	20	Ca, C, O	Al, Si	Calciumcarbonat

Bei der Probe des rosa Farbbereichs ist erneut eine Calciumcarbonatgrundierung vorhanden. Lichtmikroskopisch wurde eine Vorzeichnungsschicht zwischen Grundierung und rosa Farbschicht vermutet. Die EDX-Messung aus diesem Bereich lässt jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse auf das verwendete Farbmittel zu. Die rosa Farbschicht scheint aus roten Farbstoffpartikeln, ausgemischt mit Bleiweiß zusammengesetzt zu sein. Die roten Partikel bestehen vorwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff, was auf ein organisches Pigment (Farbstoff) hindeutet. Die Aluminium- und Schwefelanteile könnten auf Alaun als Verlackungsmittel hinweisen.

Mit freundlichen Grüßen



Simon Mindermann M.A.

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat AV – Restaurierung
z.Hd. Manuela Hörmann
Hofgraben 4
80539 München

Frank Mucha
Freiberuflicher Chemiker
Naturwissenschaftliches Labor
Fachrichtung Konservierung und
Restaurierung
Fachhochschule Erfurt
Altonaer Str. 25
99085 Erfurt
Tel. 0361/6700 9855

Erfurt, den 09.02.2023

Untersuchungsergebnisse

Objekt: Tafelbild Freising (1495), Untere Domsakristei, Freising

Sehr geehrte Damen und Herren,
gemäß Ihrem Auftrag vom 22.12.2022 wurden von mir naturwissenschaftliche
Untersuchungen durchgeführt.

Anbei sende ich Ihnen die Untersuchungsergebnisse.

Mit freundlichen Grüßen

Frank Mucha

Anlage: Untersuchungsergebnisse

Zusammenfassung der Ergebnisse

Probe PB1-a, Überzug

Bindemittel

Es liegt ein Überzug aus Leinöl vor.

Während der Probenpräparation konnte man den Eindruck gewinnen, dass er in mehreren Arbeitsgängen aufgetragen wurde.

Probe PF2, Schicht 2, Grundierung

Bindemittel

Es wurde Glutinleim als Bindemittel verwendet.

Probe PF2, Schicht 3, Malschicht

Bindemittel

Es wurde Leinöl als Bindemittel verwendet.

Probe PF2, Schicht 4, Malschicht

Bindemittel

Es wurde Leinöl als Bindemittel verwendet.

Probe PF2, Schicht 5, Malschicht

Bindemittel

Es wurde Leinöl als Bindemittel verwendet.

Probe PF2, Schicht 6 und Schicht 7, Bindemittelüberzüge

Die beiden Überzüge konnten nicht separat präpariert und untersucht werden. Dazu hätte ich den Querschliff der Probe hier im Labor benötigt um mit eigenen Fluoreszenzaufnahmen die Schichtdickenverteilung genau festzustellen. Spröde transparente Schichten lassen sich sonst nicht erfolgreich separat präparieren.

Bindemittel

Das Material des Paketes aus den beiden Überzügen enthält Dammarharz und Schellack sowie einen sehr geringen Anteil an trocknendem Öl, welcher auch aus anhaftenden Schichtspuren der Schicht 5 stammen kann.

Eine Zuordnung der Verteilung der Komponenten auf die beiden Schichten ist leider nicht möglich.

Protokoll

Organische Bindemitteluntersuchungen

Probe PB1-a, Überzug

THM- (Thermally assisted hydrolysis and methylation) Pyrolyse-
Gaschromatographie/Massenspektrometrie (THM-Py-GC/MS)

Ergebnis:

Es liegt ein Überzug aus Leinöl vor.

Während der Probenpräparation konnte man den Eindruck gewinnen, dass er in mehreren Arbeitsgängen aufgetragen wurde.

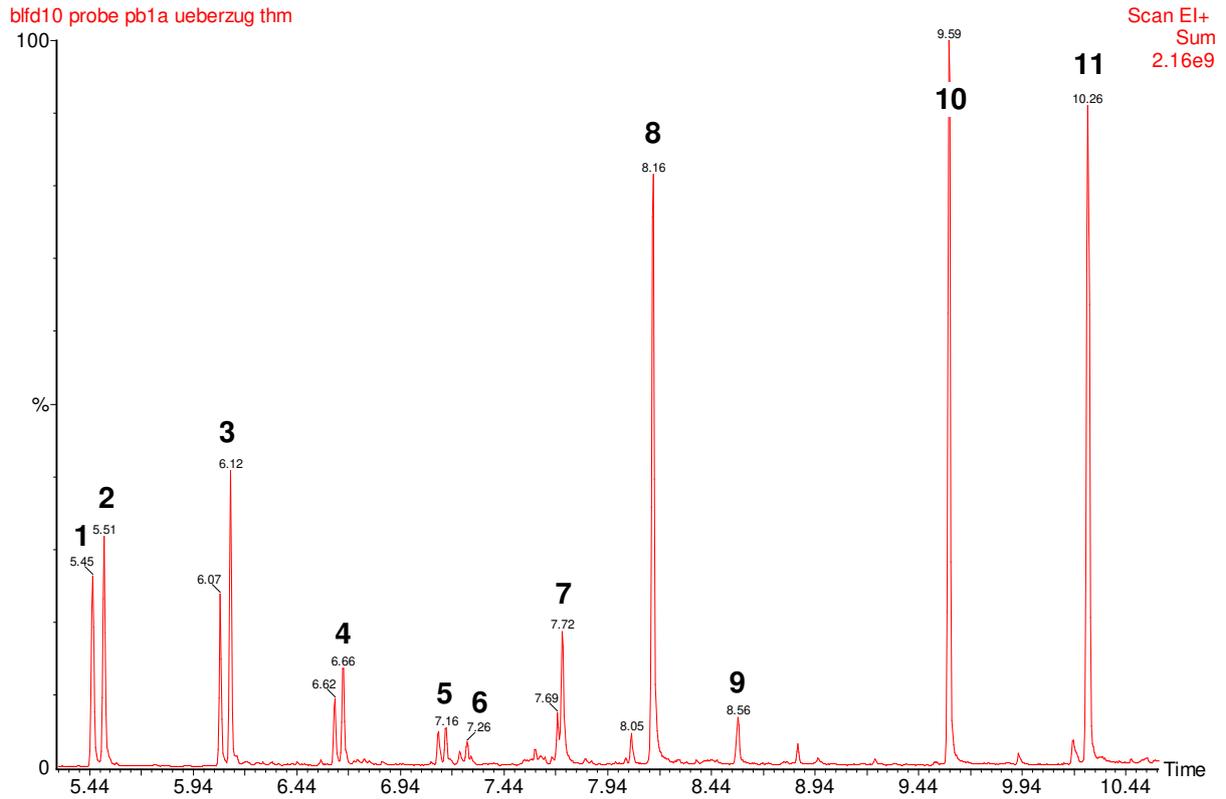
Die Peakintegration ergab ein Flächenverhältnis von Palmitinsäuremethylester/
Stearinsäuremethylester von 1,08, was in Übereinstimmung mit aktuellen Publikationen das
Öl innerhalb der Gruppe trocknender Öle auf Leinöl festlegt (Leinöl < 2, Walnussöl ~ 3,5,
Mohnöl ~ 5,1).

Die diagnostischen Marker sind in der Tabelle detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm
indiziert.

Tabelle der indizierten Markerverbindungen

Peak- Indiz	Name der Markerverbindung Pyrogramm	Name nichtmethylierten Verbindung	Herkunft
1	6-Heptensäuremethylester	6-Heptensäure	Öle
2	Heptensäuremethylester	Heptensäure	Öle
3	Octensäuremethylester	Octensäure	Öle
4	Nonensäuremethylester	Nonensäure	Öle
5	Decensäuremethylester	Decensäure	Öle
6	Heptandisäuredimethylester	Heptandisäure	Trocknende Öle
7	Suberinsäuredimethylester	Suberinsäure	Trocknende Öle
8	Azelainsäuredimethylester	Azelainsäure	Trocknende Öle
9	Decandisäuredimethylester	Decandisäure	Trocknende Öle
10	Palmitinsäuremethylester	Palmitinsäure	Öle
11	Stearinsäuremethylester	Stearinsäure	Öle

Pyrogramm mit den indizierten diagnostischen Markern



Probe PF2, Schicht 2, Grundierung

Konventionelle Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie (Py-GC/MS)

Ergebnis:

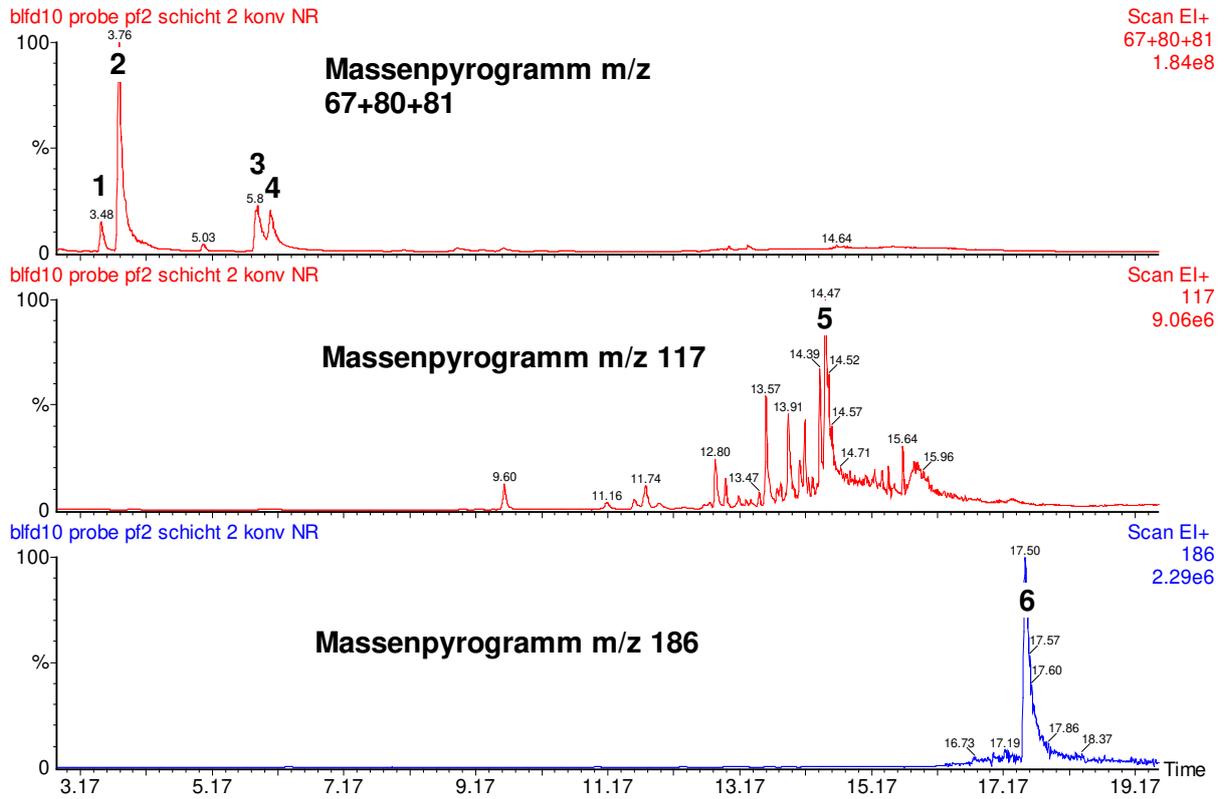
Es wurde Glutinleim als Bindemittel verwendet.

Die diagnostischen Marker sind in der Tabelle detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm indiziert.

Tabelle der indizierten Markerverbindungen

Peak-Indiz	Name der Markerverbindung Pyrogramm	Herkunft
1	N-Methylpyrrol	Hydroxyprolin
2	Pyrrol	Hydroxyprolin, Proteine; bes. in Kollagen, Glutinleim
3	2-Methylpyrrol	Hydroxyprolin, Proteine
4	3-Methylpyrrol	Hydroxyprolin, Proteine
5	Benzylnitril	Proteine; bes. in Kollagen, Glutinleim
6	Diketodipyrrol	Dipeptid Hydroxyprolin-Hydroxyprolin, Proteine; bes. in Kollagen, Glutinleim

Pyrogramm mit den indizierten diagnostischen Markern



Probe PF2, Schicht 3, Malschicht

THM- (Thermally assisted hydrolysis and methylation) Pyrolyse-
Gaschromatographie/Massenspektrometrie (THM-Py-GC/MS)

Ergebnis:

Es wurde Leinöl als Bindemittel verwendet.

Die Peakintegration ergab ein Flächenverhältnis von Palmitinsäuremethylester/
Stearinsäuremethylester von 1,77, was in Übereinstimmung mit aktuellen Publikationen das
Öl innerhalb der Gruppe trocknender Öle auf Leinöl festlegt (Leinöl < 2, Walnussöl ~ 3,5,
Mohnöl ~ 5,1).

Die diagnostischen Marker sind in der Tabelle detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm
indiziert.

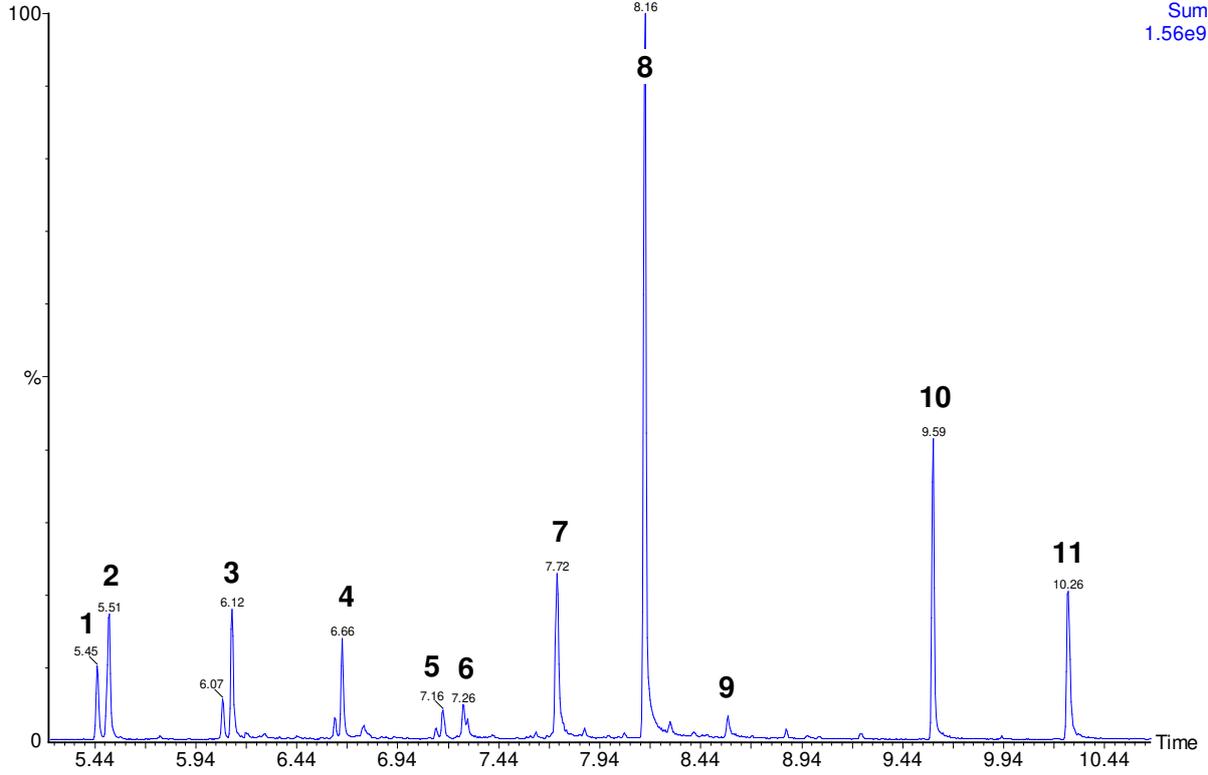
Tabelle der indizierten Markerverbindungen

Peak- Indiz	Name der Markerverbindung Pyrogramm	Name nichtmethylierten Verbindung	Herkunft
1	6-Heptensäuremethylester	6-Heptensäure	Öle
2	Heptensäuremethylester	Heptensäure	Öle
3	Octensäuremethylester	Octensäure	Öle
4	Nonensäuremethylester	Nonensäure	Öle
5	Decensäuremethylester	Decensäure	Öle
6	Heptandisäuredimethylester	Heptandisäure	Trocknende Öle
7	Suberinsäuredimethylester	Suberinsäure	Trocknende Öle
8	Azelainsäuredimethylester	Azelainsäure	Trocknende Öle
9	Decandisäuredimethylester	Decandisäure	Trocknende Öle
10	Palmitinsäuremethylester	Palmitinsäure	Öle
11	Stearinsäuremethylester	Stearinsäure	Öle

Pyrogramm mit den indizierten diagnostischen Markern

bfd10 probe pf2 schicht 3 thm

Scan EI+
Sum
1.56e9



Probe PF2, Schicht 4, Malschicht

THM- (Thermally assisted hydrolysis and methylation) Pyrolyse-
Gaschromatographie/Massenspektrometrie (THM-Py-GC/MS)

Ergebnis:

Es wurde Leinöl als Bindemittel verwendet.

Die Peakintegration ergab ein Flächenverhältnis von Palmitinsäuremethylester/
Stearinsäuremethylester von 1,84, was in Übereinstimmung mit aktuellen Publikationen das
Öl innerhalb der Gruppe trocknender Öle auf Leinöl festlegt (Leinöl < 2, Walnussöl ~ 3,5,
Mohnöl ~ 5,1).

Die diagnostischen Marker sind in der Tabelle detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm
indiziert.

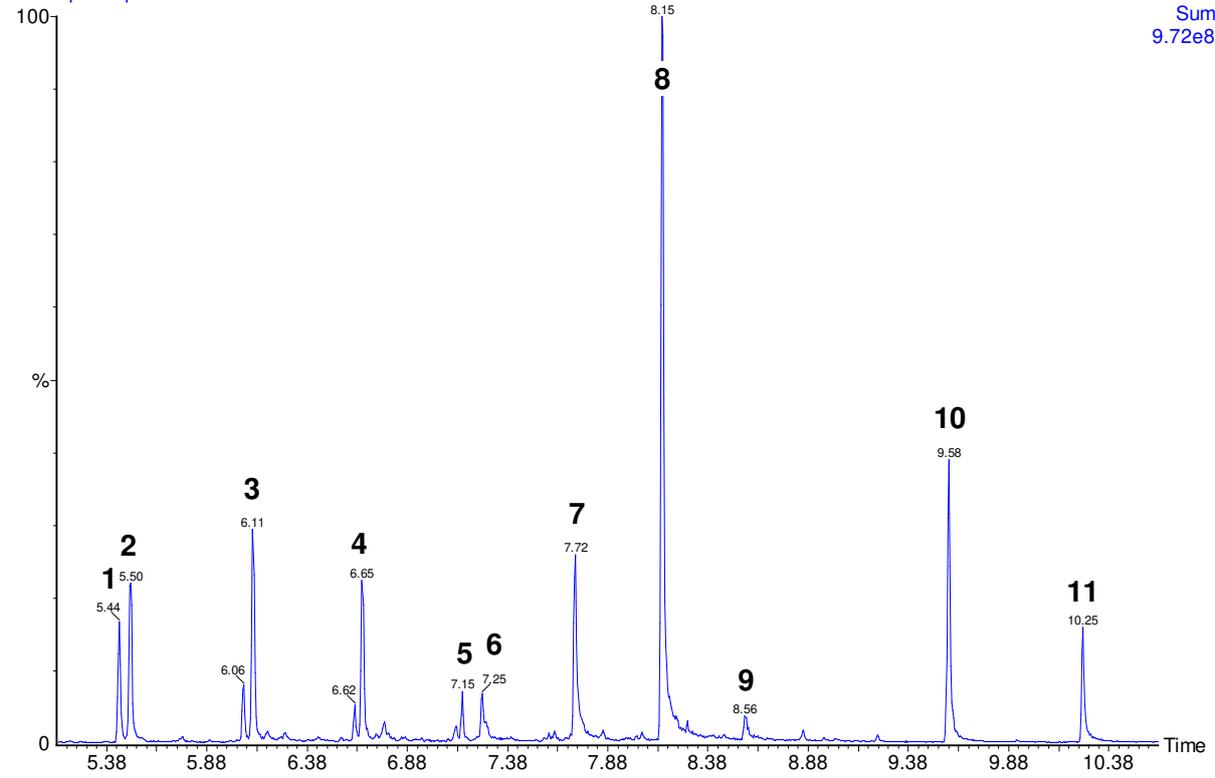
Tabelle der indizierten Markerverbindungen

Peak- Indiz	Name der Markerverbindung Pyrogramm	Name nichtmethylierten Verbindung	Herkunft
1	6-Heptensäuremethylester	6-Heptensäure	Öle
2	Heptensäuremethylester	Heptensäure	Öle
3	Octensäuremethylester	Octensäure	Öle
4	Nonensäuremethylester	Nonensäure	Öle
5	Decensäuremethylester	Decensäure	Öle
6	Heptandisäuredimethylester	Heptandisäure	Trocknende Öle
7	Suberinsäuredimethylester	Suberinsäure	Trocknende Öle
8	Azelainsäuredimethylester	Azelainsäure	Trocknende Öle
9	Decandisäuredimethylester	Decandisäure	Trocknende Öle
10	Palmitinsäuremethylester	Palmitinsäure	Öle
11	Stearinsäuremethylester	Stearinsäure	Öle

Pyrogramm mit den indizierten diagnostischen Markern

bfd10 probe pf2 schicht 4 thm

Scan EI+
Sum
9.72e8



Probe PF2, Schicht 5, Malschicht

THM- (Thermally assisted hydrolysis and methylation) Pyrolyse-
Gaschromatographie/Massenspektrometrie (THM-Py-GC/MS)

Ergebnis:

Es wurde Leinöl als Bindemittel verwendet.

Die Peakintegration ergab ein Flächenverhältnis von Palmitinsäuremethylester/
Stearinsäuremethylester von 1,97, was in Übereinstimmung mit aktuellen Publikationen das
Öl innerhalb der Gruppe trocknender Öle auf Leinöl festlegt (Leinöl < 2, Walnussöl ~ 3,5,
Mohnöl ~ 5,1).

Die diagnostischen Marker sind in der Tabelle detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm
indiziert.

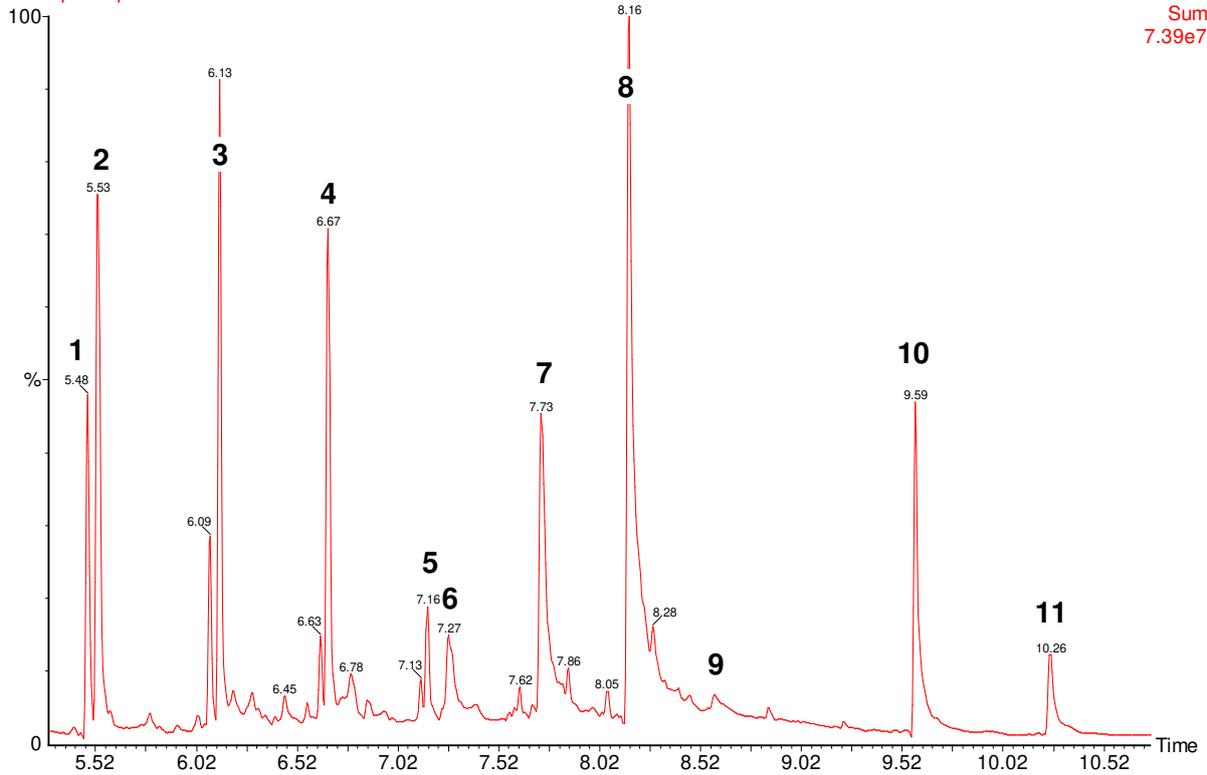
Tabelle der indizierten Markerverbindungen

Peak- Indiz	Name der Markerverbindung Pyrogramm	Name nichtmethylierten Verbindung	Herkunft
1	6-Heptensäuremethylester	6-Heptensäure	Öle
2	Heptensäuremethylester	Heptensäure	Öle
3	Octensäuremethylester	Octensäure	Öle
4	Nonensäuremethylester	Nonensäure	Öle
5	Decensäuremethylester	Decensäure	Öle
6	Heptandisäuredimethylester	Heptandisäure	Trocknende Öle
7	Suberinsäuredimethylester	Suberinsäure	Trocknende Öle
8	Azelainsäuredimethylester	Azelainsäure	Trocknende Öle
9	Decandisäuredimethylester	Decandisäure	Trocknende Öle
10	Palmitinsäuremethylester	Palmitinsäure	Öle
11	Stearinsäuremethylester	Stearinsäure	Öle

Pyrogramm mit den indizierten diagnostischen Markern

bfd10 probe pf2 schicht 5 thm NR

Scan EI+
Sum
7.39e7



Probe PF2, Schicht 6 und Schicht 7, Bindemittelüberzüge

THM- (Thermally assisted hydrolysis and methylation) Pyrolyse-
Gaschromatographie/Massenspektrometrie (THM-Py-GC/MS)

Ergebnis:

Das Material des Paketes aus den beiden Überzügen enthält Dammarharz und Schellack sowie einen sehr geringen Anteil an trocknendem Öl, welcher auch aus anhaftenden Schichtspuren der Schicht 5 stammen kann.

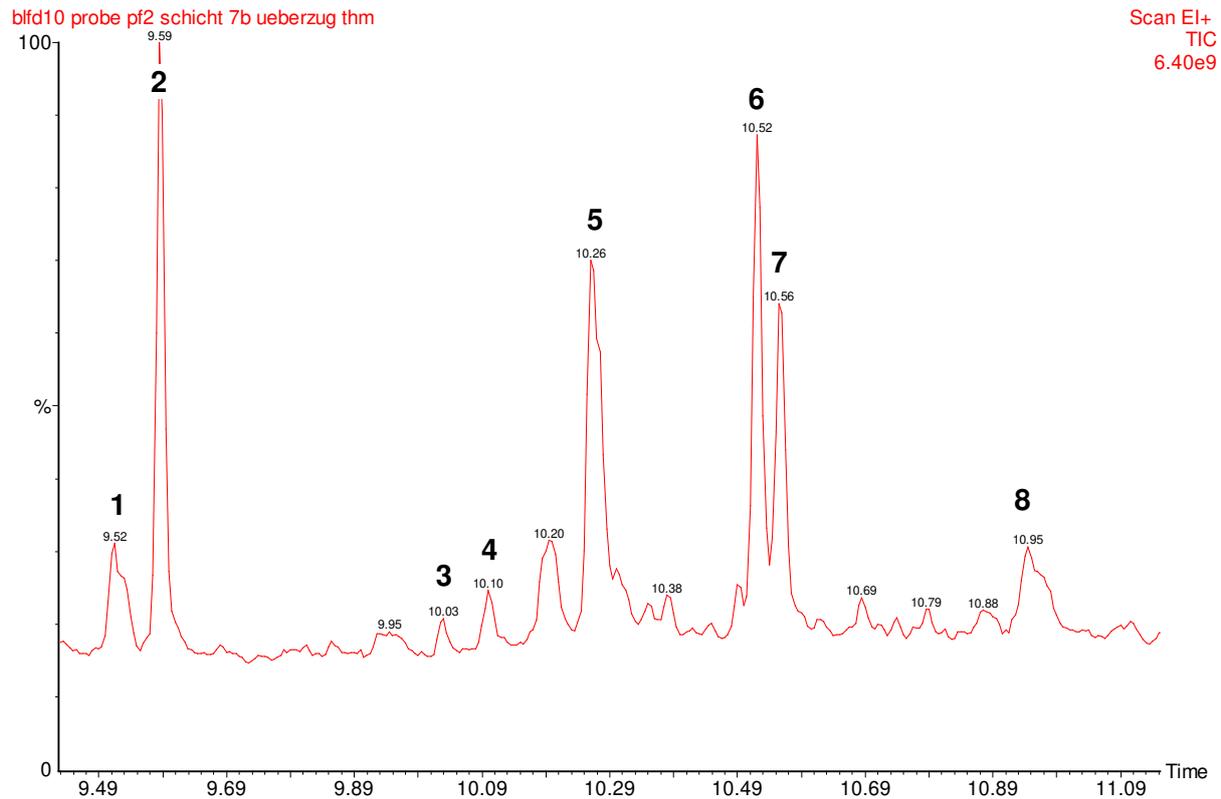
Eine Zuordnung der Verteilung der Komponenten auf die beiden Schichten ist leider nicht möglich.

Die diagnostischen Marker sind in der Tabelle detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm indiziert.

Tabelle der indizierten Markerverbindungen

Peak-Indiz	Name der Markerverbindung Pyrogramm	Name nichtmethylierten Verbindung	Herkunft:
1	Palmitoleinsäuremethylester	Palmitoleinsäure	Schellack
2	Palmitinsäuremethylester	Palmitinsäure	Schellack, Öl
3	Laccishellic acid, Trimethylderivat, Isomer 1	Laccishellic acid	Schellack
4	Laccishellic acid, Trimethylderivat, Isomer 2	Laccishellic acid	Schellack
5	Stearinsäuremethylester	Stearinsäure	Schellack, Öl
6	Laccijalaric acid, Trimethylderivat, Isomer 1	Laccijalaric acid	Schellack
7	Laccijalaric acid, Trimethylderivat, Isomer 2	Laccijalaric acid	Schellack
8	Jalarinsäure, Trimethylderivat	Jalarinsäure	Schellack

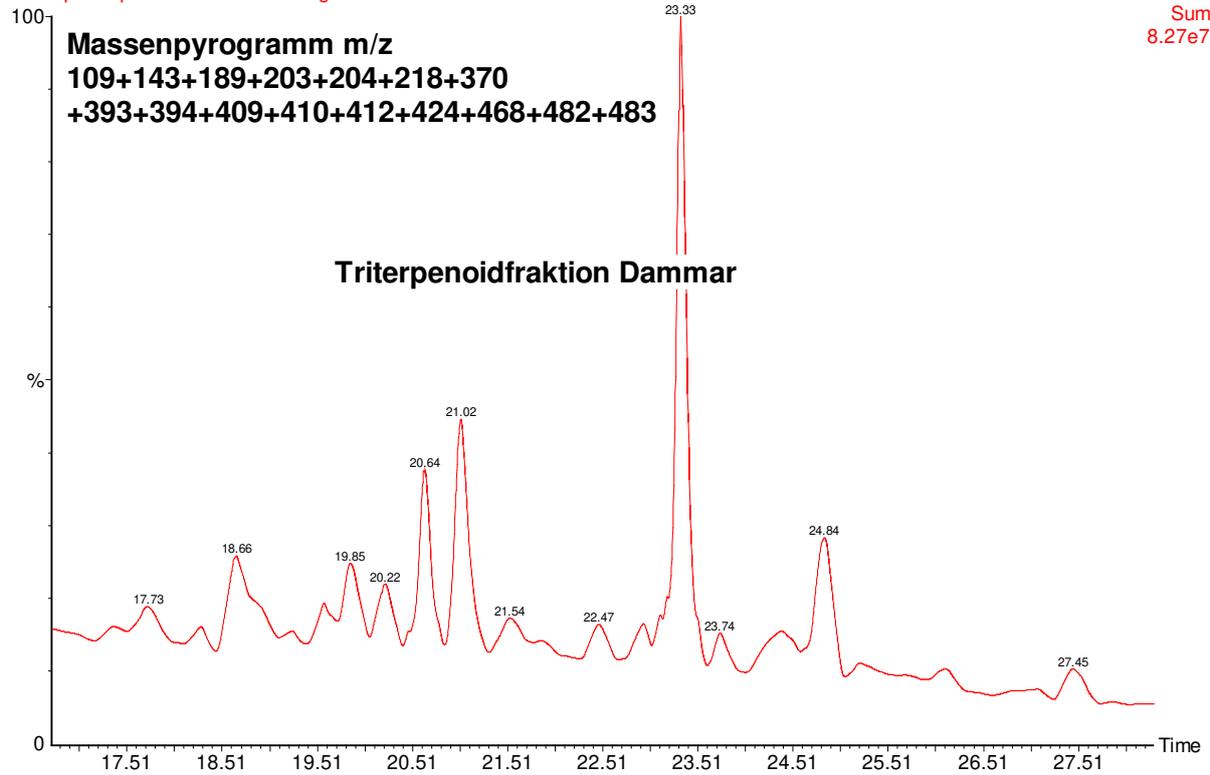
Pyrogramm mit den indizierten diagnostischen Markern



Massenpyrogramm der Triterpenoidfraktion mit den indizierten diagnostischen Markern

bfd10 probe pf2 schicht 7b ueberzug thm NR

Scan EI+
Sum
8.27e7



Methoden / Messbedingungen:

THM- (Thermally assisted hydrolysis and methylation) Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie (THM-Py-GC/MS)

Es erfolgte zur Erzeugung flüchtigerer, weniger reaktiver und damit besser indizierbarer Methyl-Derivate des Pyrolysats, eine Hydrolyse/Methylierung in situ während der Pyrolyse durch Zugabe von 1µl TMAH (25% Tetramethylammoniumhydroxid in Wasser)

Pyrolyse: 20s bei 700°C im Quarzröhrchen mit CDS Pyroprobe 5000;
GC/MS-System: PerkinElmer Clarus SQ 8 GC / MS System;
Säule: PerkinElmer Elite-5MS, 30m x 0,25mm ID DF=0,25);
MS: Ionization Mode: EI

Die Identifizierung der diagnostischen Marker erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten und der Massenspektren mit eigenen Referenzmessergebnissen, der NIST02 Spektrendatenbank und Ergebnissen aus wissenschaftlichen Publikationen. Die diagnostischen Marker sind in den Tabellen detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm indiziert.

Es wurde mikroskopisch geeignetes Zielmaterial aus der Gesamtprobe separiert und gemessen.

Konventionelle Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie (Py-GC/MS)

Pyrolyse: 20s bei 700°C im Quarzröhrchen mit CDS Pyroprobe 5000;
GC/MS-System: PerkinElmer Clarus SQ 8 GC / MS System;
Säule: PerkinElmer Elite-5MS, 30m x 0,25mm ID DF=0,25);
MS: Ionization Mode: EI

Die Identifizierung der diagnostischen Marker erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten und der Massenspektren mit eigenen Referenzmessergebnissen, der NIST02 Spektrendatenbank und Ergebnissen aus wissenschaftlichen Publikationen. Die diagnostischen Marker sind in den Tabellen detailliert aufgeschlüsselt und im Pyrogramm indiziert.

Es wurde mikroskopisch geeignetes Zielmaterial aus der Gesamtprobe separiert und gemessen.

Verwendete Literatur

Van den Berg et al.; Chemical changes in curing and ageing oil paints, Triennial meeting (12th), Lyon 1999, 248-253

Dominique Scalarone et al.; Thermally assisted hydrolysis and methylation-pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry of light-aged linseed oil; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 58 59 (2001) 503-512

Francesca Cappitelli et al.; An initial assessment of thermally assisted hydrolysis and methylation-gas chromatography/mass spectrometry for the identification of oils from dried paint films; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 63 (2002) 339-348

Challinor: A rapid simple pyrolysis derivatisation gas chromatography – mass spectrometry method for profiling of fatty acids in trace quantities of lipids

Wang et al.; Characterization of Natural Resin Shellac by Reactive Pyrolysis – Gas Chromatography in the Presence of Organic Alkali; Analytical Chemistry, Vol. 71, No. 7, April 1, 1999

Colombini et al.: Molecular pattern recognition of fresh and aged shellac, Chromatographia 2003, 58, No 5/6

Sioban Watts and E. Rene de la Rie: GCMS analysis of triterpenoid resins: in situ derivatization procedures using quarternary ammonium hydroxides, Studies in Conservation 47 (2002) 257-272

Gisela A. van der Doelen, Klaas van den Berg and Jaap J. Boon: Comparative chromatographic and mass-spectrometry studies of triterpenoid varnishes: fresh materials and aged samples from paintings; Studies in conservation 43 (1998) 249-264

B.G.K. van Aarssen et al.: A comparative study of three different pyrolysis methods used to characterise a biopolymer isolated from fossil and estant dammar resins; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 20 (1991) 125-139

Leistungs- und Preisverzeichnis für naturwissenschaftliche Untersuchungen

Substanzklasse / Methode	Kosten je Probe in EURO
Bindemittelklassen- und Pigmentanalyse mittels FT-IR-Spektroskopie (ATR oder Mikroskop) Eingrenzung der Bindemittelklasse: Öl, Harz, Wachs, tierischer Leim, pflanzlicher Leim	40,00
Pigmentanalyse durch kombinierte Röntgenfluoreszenz- und Infrarotspektroskopie	80,00
Pigmentbestimmung mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) optional Elementaranalyse von Legierungen, Auflagerungen, Baustoffen etc. Aufnahme eines RFA-Spektrums und Auswertung	meist in Kombination mit der FT-IR-Spektroskopie 40,00
Detaillierte Bindemittelanalyse mittels Pyrolysegaschromatographie-Massenspektrometrie Tierische Leime: Kasein, Hühnerlei, Glutingleime (Hautleim, Knochenleim etc.) Trocknende Öle: Leinöl, Mohnöl, Walnussöl Wachse: Bienenwachs, Carnaubawachs, Candellilawachs, Montanwachs, Paraffin Harze: Dammar, Kopale, Mastix, Kolophonium, Schellack, Terpentine, Elemi etc. Pflanzliche Leime: Stärken, Cellulosederivate, Gummen Kunstharze: Alkydharze, Acrylharze, Polyurethane, Copolymere, Polyvinylacetate, Vinyl-Acryl-Copolymere, Epoxidharze, Siliconharze, Additive, Weichmacher Komplett:	120,00
Bestimmung der Anionen bauschädlicher Salze (Chlorid, Nitrat, Sulfat), quantitativ, ionenchromatographisch	55,00
Bestimmung der Zusammensetzung von Baustoffen (Zuschläge, Bindemittel, Korngrößenverteilung, Sieblinie)	235,00
Querschleif (Anfertigung) + Mikroskopische Aufnahmen	70,00
Untersuchung /Analyse der Schichtfolge	30,00
Holz Untersuchung auf Holzschutzmittel	120,00
Weitere Untersuchungen sowie Erstellung von Gutachten	Nach Vereinbarung

Es gelten die allgemeinen Vertragsbedingungen der FH Erfurt sowie Haftungsausschluss.

Anhang B: Voruntersuchungen

00-Testreihe Notsicherungen

[Auszug Textteil Judith Regensburger aus dem 1. DBU Zwischenbericht]

Anlass und Fragestellung

Die Notwendigkeit zur Durchführung von Notsicherungen der gefährdeten Malschichtbereiche beruht auf deren seit Jahresbeginn 2022 nochmals verschlechtertem Zustand sowie als Schutzmaßnahme gegenüber möglichen Erschütterungen oder ähnlichem beim Bau der Einhausung.

Methode

Die Recherche zu geeigneten Materialien (Klebstoffe und Vliese) für die Anforderungen im Projekt (hohe/höhere relative Luftfeuchte, ausreichende Klebefähigkeit und Beständigkeit gegenüber mikrobiellem Befall) ergab als geeignete Klebstoffe Tylose® MH 300, Klucel® E und Methocel™ A15 sowie Methocel™ A15C sowie als Vliese Japanpapier und Hollytex®. Mit diesen Materialien wurde am Gemälde im rechten unteren Randbereich eine kleine Testreihe zur Klebefähigkeit und Klebekraft der Materialien sowie zu deren Reversibilität auf dem vorhandenen Firnis durchgeführt; dabei wurden Tylose in jeweils 1%iger und 2%iger Konzentration (gelöst in demineralisiertem Wasser) und Methocel™ A15C in 2%iger sowie Methocel™ A15C in 1%iger Konzentration (gelöst in demineralisiertem Wasser) mit den Vliesen Japanpapier und Hollytex® getestet. Der Auftrag erfolgte mit dem Pinsel.

Beim Auftrag ergaben sich folgende Beobachtungen:

- Japanpapier lässt sich deutlich besser als Hollytex® mit den gewählten Klebstoffen benetzen
- Methocel™ A15C ist im Auftrag etwas dick
- Alle weiteren Materialien erweisen sich als fast identisch im Auftrag und in der Benetzung des Japanpapiers

Bei der, einige Tage später erfolgenden Kontrolle zur Klebefestigkeit auf dem Firnis¹, ergaben sich folgende Beobachtungen; zur Prüfung wurde mit leichtem Zug versucht, die Ränder der Klebeflächen abzulösen:

- Hollytex® weist eine geringere Adhäsion gegenüber Japanpapier auf
- Die Kombination Hollytex® – Methocel™ löst sich sehr leicht; Methocel™ A15 löst sich dabei noch leichter als Methocel™ A15C
- Die Kombination Hollytex® – Tylose® MH 300 2%ig weist für das Vlies Hollytex die beste Adhäsion auf
- Die Kombination Japanpapier – Tylose® MH 300 2%ig weist eine stärkere Klebekraft besser als die Kombination Hollytex® – Tylose 2%ig auf
- Klucel® E und Tylose® MH 300 in 1%iger Konzentration weisen eine zu geringe Klebekraft auf

Damit lässt sich festhalten, dass im vorliegenden Fall 2%ige Tylose® MH 300 mit Japanpapier das beste Ergebnis hinsichtlich Auftragsverhalten und Klebefestigkeit aufweist.

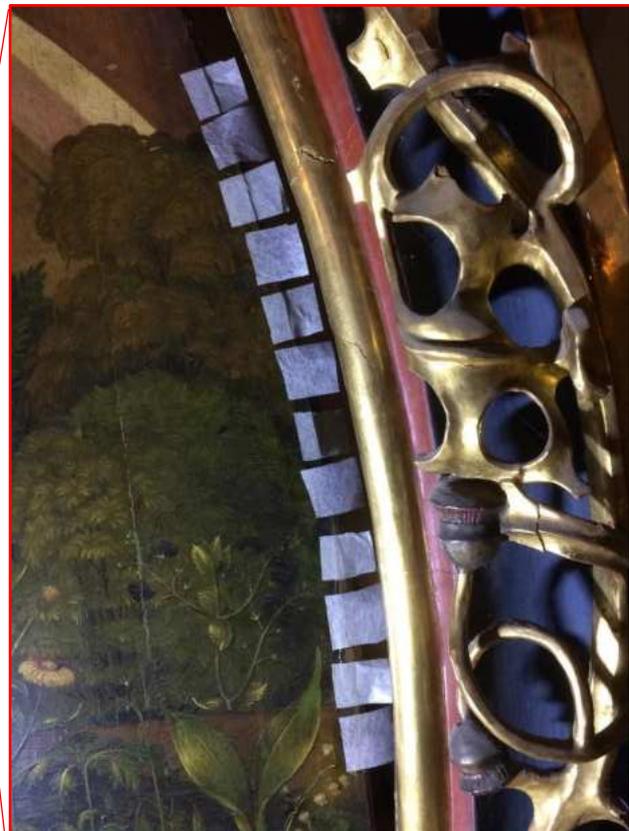
¹ Ergänzung Theresa Hilger [24.07.2024]: eine Veränderung oder gar Verschlechterung der Langzeit-Löslichkeit gängiger Notsicherungsmaßnahmen in der Denkmalpflege ist bekannt. Ziel ist es daher häufig, Notsicherungen nur so lange wie nötig auf der Oberfläche zu belassen und den Zustand regelmäßig zu kontrollieren. Es erfolgte eine regelmäßige Überprüfung der Notsicherungen über die Projektlaufzeit; zum Projektende war noch eine gute Löslichkeit gegeben (s. a. DBU-Abschlussbericht, Bewertung der Notsicherungsmethoden).

Auf Basis von Recherche und Testreihe wurden daran anschließend die Notsicherungen ausgeführt. Dabei wurden verschiedene Techniken angewendet. Zum einen wurden die gelockerten und dachförmig aufstehenden Malschichtschollen nicht direkt mit dem Vlies verklebt, sondern zu ihrer Sicherung ein Netz aus dem Vlies über sie gespannt und dieses an direkt danebenliegende, intakte Bereiche angeklebt. Zum anderen wurden aus dem Vlies schmale Streifen geschnitten, um mit diesen Streifen einzelne Schollen gezielt auf intakte Bereiche der Malschicht rückzusichern; diese Streifen wirken somit sozusagen als Brücken. Die grundsätzliche Überlegung hinter diesen Techniken liegt darin, die Schollen bestmöglich zu schützen und ihnen zum anderen im Hinblick auf die spätere Konditionierung und daraus folgende Ausdehnung der Holztafel Bewegungsfreiheit zu ermöglichen und sie nicht durch evtl. vorhandene Zugspannung beim Niederlegen zu behindern.²



Abb. Oben: Verortung der Musterfläche.
Foto: BLfD, Giorgia Petta (2022)

Abb. Rechts: Testreihe Notsicherung.
Foto: BLfD, Judith Regensburger (2022)



Verwendete Materialien

Siehe Anhang I, Materialien- und Geräteliste

² Ergänzung Theresa Hilger [24.07.2024]: Im weiteren Projektverlauf wurde die Technik der Anbringung von Notsicherungspapieren geändert. S. DBU-Abschlussbericht, Notsicherungen).

Anhang B: Voruntersuchungen

01-Anforderungen für den Bau einer Einhausung

Anlass und Fragestellung

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte eine temporäre in situ Einhausung als Klimabox geplant und gebaut werden. Ziel war die Abkoppelung des Klimas für das Fallbeispiel (= großformatiges Holztafelgemälde), um das Tafelbild nach einer Risikoabschätzung kontrolliert an seine geometrischen Ursprungsmaße anzunähern.

Dazu sollte der Holzträger über eine systematische Klimatisierung konditioniert und befeuchtet werden und sich dann langsam auszudehnen. Die dabei entstehenden Bewegungen und Veränderungen an der Malschicht sollten währenddessen genauestens mit einem Mess- und Monitoring-System sowie konservatorisch beobachtet und dokumentiert werden. Um das Tafelbild vom restlichen Raumklima mit Temperatur- und Feuchteschwankungen abzukoppeln sollte es mit einer Einhausung umbaut werden. So sollten neben einer ersten Stabilisierung des Klimas später auch Be- oder Entfeuchtungsmethoden gezielt angewendet werden und dies durch ein kleineres Raumvolumen kontrollierbarer und energiesparender sein.

Neben der Art und dem Zustand der Ausstattung mussten v. a. die Zeitplanung und Kosten berücksichtigt werden. Erstere war vor Projektbeginn schon relativ knapp (eine Umsetzung sollte möglichst zügig erfolgen, was den Zeitraum für die Planung stark verkürzte). Letztere waren nicht Teil des Projektes und wurden über den Eigentümer, bzw. später über ein Sponsoring der ausführenden Firma Adldinger, geleistet.

Art der Ausstattung:

Das großformatige Holztafelbild (382 x275 cm) besteht aus zwei Hälften, mit mittiger, senkrechter Stoßfuge, die aus stehenden und verleimten Nadelholzbrettern (ca. 2 cm stark) hergestellt sind. Ursprünglich waren sie mit zwei rückseitig eingesetzten, hölzernen Schwalbenschwanz-Einlagen verbunden; jetzt befinden sich Verbindungsschlösser aus Buche an dieser Stelle. Die Tafel besitzt vier rückseitige Gratleisten und ist umlaufend am Rand abgefast und in einen dreiteiligen Zierrahmen eingenetet. Es wurde, mitsamt seinem z. T. profilierten und ornamentierten Rahmen passgenau in das Gewölbe der Westwand der Domsakristei eingearbeitet. 2016 wurde die Tafel im Zuge einer Befunduntersuchung von der Wand abgenommen und stehend auf einer Arbeitstribüne (siehe Abb. 1) aus Grobspanplatten (OSB) fixiert. Diese Tribüne war ursprünglich für eine Befunduntersuchung und nicht als dauerhafter Standort für einen derart langen Zeitraum (mittlerweile bis 2024) gedacht.

Zustand der Ausstattung:

Das aufgrund von äußeren Klimabedingungen stark geschädigte Freisinger Tafelbild hat einen verformten Träger aus Holzbohlen. Letztere haben sich aufgrund einer über Jahrzehnte abgelaufenen Austrocknung stark zusammengezogen – der Träger ist geschrumpft. Folglich sind große, dachförmige Malschichtabhebungen und unwiederbringliche Verluste entstanden. Weitere großflächig gelockerte Bereiche führen bei fortlaufendem Schadensbild ebenfalls zu einer dachförmig aufgeschobenen bzw. auch komplett abgelösten Malschicht. Weiterhin lässt sich beobachten, dass die Tafel aus dem umgebenden Rahmen gerutscht ist und sich in Längs- und Querrichtung verformt hat. Für eine Konservierung (ohne Beschneidung oder

Verluste der Fachschollenränder) müsste der Holzträger befeuchtet und ausgedehnt werden, um genug Platz für die Malschicht zu schaffen. Die Tafel ist aufgrund der enormen Malschichtschädigung und Abhebungen bereits seit Projektbeginn immobil. Eine Festigung (ohne Verluste) ist erst nach einer Konditionierung des Holzbildträgers möglich. Zu Projektbeginn konnte daher auch keine Veränderung der Position oder Auslagerung durchgeführt werden. Vor dem Bau einer Einhausung und für die Dauer des Projektes müssen Notsicherungsmaßnahmen der Malschicht durchgeführt werden. Nach einer ersten Stabilisierung in der Einhausung könnten dann weitere Schritte zur Lageveränderungen diskutiert werden.

Dauer und Zeitpunkt der Einhausung:

Die Einhausung sollte sobald wie möglich gebaut werden, für die Projektdauer (temporär) genutzt und dann – je nach Möglichkeit und Projektstand - systematisch rückgebaut werden. Dies ist mit den später angedachten Schritten zur Konservierung und Restaurierung abzustimmen. Die Einhausung sollte keine finale Klimavitrine sein, aber Platz für die essentielle Messtechnik zum Monitoring (Klima und Bewegung) gewährleisten.

Einige Anforderungen für das Fallbeispiel in Freising

ANFORDERUNG	BEMERKUNG	OFFENE FRAGEN
Mindestens Außenmaße der Tribüne Antependium ausgenommen	Platz für Platz für Messtechnik (Klima, Geometrieänderung, Verformungsmessung, Holzfeuchte, Hygrothermik,...) und fotografisches Monitoring + 3D Scan (KDWT)	<i>Welches Volumen und welche Materialien benötigt das Tafelbild, um vom Raumklima abgekoppelt zu werden?</i>
Begehbarkeit Schleuse / Tür (rechts)	Kontrollen am Objekt und ggf. Not-Maßnahmen an der Malschicht	<i>Wie ist der Abschluss zum Gewölbe hin? → rechteckig - gerundet - polygonal?</i>
Fernwartung?		<i>Möglichkeit einer Kamera (GoPro) für die Fernwartung? Beleuchtung?</i>
Vorerst weiterhin stehenden Positionierung des Tafelbildes in der Einhausung	Alternativen: schwebend / hängend, stehend, liegend	<i>Welchen Einfluss hat die Positionierung / Aufstellung des Tafelbildes für die Klimatisierung? Zug- & Drucklast, Spannungen?</i>
Luftbewegung, Dampfdurchlässigkeit vs. Dichtheit (vom Raumklima abgeschottetes System)	Wenn zu dicht: mikrobieller Befall! Einhausung aus hygroskopischem Material, z. B. Holz oder MDF könnte Mikroklima stark beeinflussen	<i>Wie, wann und in welchem Maße erfolgt die Luftbewegung? An welchen Stellen der Einhausung wird belüftet? Gleichmäßige Verteilung der Luft (auch bei polygonaler Form?), kein punktuell „anblasen“</i>
Luftbefeuchtung	Aktiv: Ein- und Ausleitung gereinigter und befeuchteter Luft/Stickstoff, Emissionsfreiheit im Inneren Passiv: konstante Feuchtigkeit halten durch absorbierende Materialien, wie z. B. Silicagel	<i>Steuerung und Geschwindigkeit der Luftbefeuchtung? Ist eine aktive oder passive Klimatisierung notwendig?</i>
Emissions-, Säure- und Weichmacherfrei	Kontroll-Messungen mit VOC Sensoren	
Optik: Front = Transparent Seiten-, Rückwände und Dach nicht zwingend	Beobachtung der Malschicht von außen weiterhin möglich, angenehmeres Erscheinungsbild für die Dauer der Maßnahme, da Sichtbarkeit gewährleistet	<i>Kosten? Kamera-Haus für fotografisches Monitoring einplanen? Natürlicher Lichteinfall / Teilbeleuchtung?</i>
Schwingschutz u. Statik	Belastungen durch die Dombaustelle und Nutzung der Sakristei könnten ursächlich für geringe Verluste der Malschicht sein	<i>Messungen notwendig? Gibt es Grenzwerte?</i>

Fazit: allgemeine Anforderungen

Ausgehend von den Anforderungen am Fallbeispiel in Freising werden für künftige Projekte u. a. die Diskussion der folgenden, allgemeinen Anforderungen vor dem Bau einer Einhausung, empfohlen:

- ⇒ Vorherige konservatorische Maßnahmen
z. B. Notsicherung, Staubschutz, temporärer Ab-/Umbau, o. ä.
- ⇒ Denkmal- sowie Objektverträglichkeit und ggf. Reversibilität
Sowohl für einzuhausende Objekte(e) als auch die restliche ggf. wandfeste Ausstattung und Anschlussbereiche; je nach angestrebtem Klimabereich ggf. zu schützende Ausstattung temporär anderswo zu lagern
- ⇒ Größe, Abmessungen, Volumen
 - Für ausreichend Luftbewegung, Zugänglichkeit und Fläche, u. a. auch für Einrichtung, Messtechnik, Lager- und Arbeitsflächen
- ⇒ Abstimmung auf angedachte Messtechnik und ggf. durchzuführende Arbeiten / Maßnahmen:
 - Beachtung zu klimatisierenden Raumvolumens für einzelnes Be-/Entfeuchtungsgerät
 - Berücksichtigung der Positionierung des Objektes / der Objekte
 - Berücksichtig der Statik und Schwingungen bei schweren Messgeräten oder Begehung durch Personengruppen
- ⇒ Materialwahl
u. a. für Boden, Wände, Decke, ggf. auch temporäre, diffusionsdichte Abschlüsse zur Wand
 - Schutz originaler Substanz (Raumschale, Böden, Decke, Standsicherheit)
 - Schutz der Kunstwerke vor Emissionen und Schadstoffen, die aus den verwendeten Material ausdünsten könnten
 - Je nach angestrebtem Klimakorridor ggf. Materialien für die Verwendung in Feuchtbereichen bzw. gut zu reinigen wählen (Schimmelgefahr)
- ⇒ Zusatzfunktionen, z. B.:
 - (abschließbare) Tür
 - Sichtfenster
 - Lichtquellen für Begehung
 - Verdunklung als Lichtschutzmaßnahme oder für bestimmte Monitoring Methoden von Bedeutung
 - Einrichtung: falls z. B. Gerüste, Arbeitstribünen, Regale oder andere Lagerungsmöglichkeiten, Abdeckungen oder Aufbewahrungsboxen nötig sind
 - Optional: Fernwartung, Schwingschutz, u. ä.
- ⇒ Beachtung von Sicherheitsvorschriften und Unfallverhütungsvorschriften:
u. a. Verkehrssicherheit, Brandschutz, DIN- und Technikvorschriften (z. B. TÜV, VDE,...)
- ⇒ Ästhetische Ansprüche
- ⇒ Abstimmung mit Eigentümer / Nutzenden
- ⇒ Nach dem Aufbau:
 - **Reinigung, Pflege und Wartung; Monitoring des Klimas sowie regelmäßige Überprüfung auf mikrobiellen Befall / Veränderungen = Grundvoraussetzung**
 - Begehungs- / Wartungsprotokolle oder Checklisten
insbes. im Falle mehrerer Beteiligter sinnvoll (u. a. Korrelation Klimaphänomene z. B. bei Gruppenbegehungen oder Arbeiten vor Ort; Sicherung regelmäßiger Wartungsabstände; etc.)
- ⇒ Ergänzende Untersuchungen:
 - u. U. Messung des Stromverbrauchs
 - u. U. Untersuchung der Dichtigkeit, Zugluftverhalten, Kälte-/Wärmebereiche oder Stratigrafie (z. B. über Luftströmungsmessung über Nebelversuche, Luftwechselrate über die Referenzgasmethode mithilfe von CO₂, Thermografie; siehe Löther, 2024 in dieser Publikation)

Checklisten / Protokolle für Begehungen und Wartung

1. Beispieltabelle Begehungen / Anwesenheit in der Einhausung

Datum	Person/en	Grund/Tätigkeit	Uhrzeit/Zeitspanne

Verwendete Materialien

Siehe Anhang I, Materialien- und Geräteliste

Exemplarische Checkliste: Wartung und Pflege, in:

[Ort]

Datum	Uhrzeit	KontrollleurIn [Name, Institution]																																				
Zusammenfassung – Inhalte & Ergebnis der Kontrolle:																																						
Klima																																						
Temperatur _____ °C	Relative Luftfeuchte _____ %																																					
Stromzählerstand																																						
Energieverbrauch _____ kWh	Aktuelle Leistung _____ W																																					
Reinigung der Einhausung [Trockenreinigung, Staubsaugen mit HEPA-Filter und PSA]																																						
Letzte Reinigung [Datum] _____	Nächste Reinigung [Datum] _____																																					
Reinigung Luftbefeuchter [hier: alle 3 Monate; Grundreinigung; Austausch Filtermatte; Antikalk u. Wasserfrisch]																																						
Letzte Reinigung [Datum] _____	Nächste Reinigung [Datum] _____																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TÄTIGKEIT</th> <th>ERLEDIGT</th> <th>NICHT ERLEDIGT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grundreinigung [Entleeren, Auswischen, Trocknen]</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Austausch Filtermatte</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Auffüllen</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Zugabe Antikalk</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Zugabe Wasserfrisch</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Weiteres:</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>			TÄTIGKEIT	ERLEDIGT	NICHT ERLEDIGT	Grundreinigung [Entleeren, Auswischen, Trocknen]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Austausch Filtermatte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Auffüllen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zugabe Antikalk	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zugabe Wasserfrisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Weiteres:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>															
TÄTIGKEIT	ERLEDIGT	NICHT ERLEDIGT																																				
Grundreinigung [Entleeren, Auswischen, Trocknen]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Austausch Filtermatte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Auffüllen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Zugabe Antikalk	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Zugabe Wasserfrisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Weiteres:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
NACHBESTELLUNG																																						
Filter <input type="checkbox"/>	Antikalk <input type="checkbox"/>	Wasserfrisch <input type="checkbox"/>																																				
		Auffüllen Luftbefeuchter [mit Wasser]																																				
		Menge _____ L																																				
Entleeren Luftentfeuchter																																						
Entleerung [Datum] _____	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
	Leer	Mittel-Voll																																				
		<input type="checkbox"/>																																				
		Voll																																				
Wartung und Prüfung der Technik [je nach vorhandener Technik oder Bedarf]																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TÄTIGKEIT</th> <th>ERLEDIGT</th> <th>NICHT ERLEDIGT</th> <th>ANMERKUNG</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Befeuchter</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Entfeuchter</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Befestigungen z. B. Messsensoren</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mess-PCs</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Netzteile</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Systemneustart z. B. nach Stromausfall</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			TÄTIGKEIT	ERLEDIGT	NICHT ERLEDIGT	ANMERKUNG	Befeuchter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Entfeuchter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Befestigungen z. B. Messsensoren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Mess-PCs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Netzteile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Systemneustart z. B. nach Stromausfall	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
TÄTIGKEIT	ERLEDIGT	NICHT ERLEDIGT	ANMERKUNG																																			
Befeuchter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Entfeuchter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Befestigungen z. B. Messsensoren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Mess-PCs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Netzteile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
Systemneustart z. B. nach Stromausfall	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>AUSLESEN / SPEICHERUNG</th> <th>ERLEDIGT</th> <th>NICHT ERLEDIGT</th> <th>ANMERKUNG</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>z. B. Gigamodul</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>z. B. Waage</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			AUSLESEN / SPEICHERUNG	ERLEDIGT	NICHT ERLEDIGT	ANMERKUNG	z. B. Gigamodul	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		z. B. Waage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																					
AUSLESEN / SPEICHERUNG	ERLEDIGT	NICHT ERLEDIGT	ANMERKUNG																																			
z. B. Gigamodul	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
z. B. Waage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																				

Konservatorisches Monitoring

Rückseite / Holzträger

VERÄNDERUNGEN	Keine	Leichte	Mittlere	Schwere	ANMERKUNG
z. B. neue / andere Verformungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Gratleisten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Fugen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Rahmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Hinweise auf Schädlingsbefall	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Bindemittel, Mal- und Firnissschichten

VERÄNDERUNGEN	Keine	Leichte	Mittlere	Schwere	ANMERKUNG
z. B. neue / andere Ablösungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. an den Fugen / Fehlstellen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Haltbarkeit Notsicherungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Fassung am Rahmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. Transparenz (Krepierung o. ä.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Schimmel

VERÄNDERUNGEN/(NEUES) WACHSTUM	Keine	Leichte	Mittlere	Schwere	ANMERKUNG
z. B. Tribüne / Regale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. an anderer Ausstattung (A.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. am Tafelbild, Holzträger (HT.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
z. B. am Tafelbild, Malschicht (MS.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Schimmelabnahme [je nach Bedarf und Materialverträglichkeit; häufig Trockenreinigung]

	z. B. Trockenreinigung	z. B. Feuchtreinigung	ANMERKUNG
z. B. Tribüne / Regal	Staubsauger mit HEPA-Filter <input type="checkbox"/> / Schwämmchen <input type="checkbox"/> / Pinsel <input type="checkbox"/> / PSA <input type="checkbox"/>	Ggf. Lösemittel: _____ Schwämmchen: <input type="checkbox"/> / Wattestäbchen: <input type="checkbox"/>	
z. B. andere A.	Staubsauger mit HEPA-Filter <input type="checkbox"/> / Schwämmchen <input type="checkbox"/> / Pinsel <input type="checkbox"/> / PSA <input type="checkbox"/>	Ggf. Lösemittel: _____ Schwämmchen: <input type="checkbox"/> / Wattestäbchen: <input type="checkbox"/>	
z. B. Tafelbild, HT.	Staubsauger mit HEPA-Filter <input type="checkbox"/> / Schwämmchen <input type="checkbox"/> / Pinsel <input type="checkbox"/> / PSA <input type="checkbox"/>	Ggf. Lösemittel: _____ Schwämmchen: <input type="checkbox"/> / Wattestäbchen: <input type="checkbox"/>	
z. B. Tafelbild, MS.	Staubsauger mit HEPA-Filter <input type="checkbox"/> / Schwämmchen <input type="checkbox"/> / Pinsel <input type="checkbox"/> / PSA <input type="checkbox"/>	Ggf. Lösemittel: _____ Schwämmchen: <input type="checkbox"/> / Wattestäbchen: <input type="checkbox"/>	
	Staubsauger mit HEPA-Filter <input type="checkbox"/> / Schwämmchen <input type="checkbox"/> / Pinsel <input type="checkbox"/> / PSA <input type="checkbox"/>	Ggf. Lösemittel: _____ Schwämmchen: <input type="checkbox"/> / Wattestäbchen: <input type="checkbox"/>	
	Staubsauger mit HEPA-Filter <input type="checkbox"/> / Schwämmchen <input type="checkbox"/> / Pinsel <input type="checkbox"/> / PSA <input type="checkbox"/>	Ggf. Lösemittel: _____ Schwämmchen: <input type="checkbox"/> / Wattestäbchen: <input type="checkbox"/>	

Weitere Anmerkungen / Auffälligkeiten

Datum:

____.____.____

Unterschrift des Verfassenden:

**Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Frau Judith Regensburger
Hofgraben 4
80539 München**

Vorab:

judith.regensburger@bfd.bayern.de

05.07.2022
ag/WM

Untersuchungsbericht

ARGUK-ID: 7913/2022
Projekt: Rahmenstaub von Gemälde

Sehr geehrte Frau Regensburger,

vielen Dank für Ihren Auftrag. Anbei erhalten Sie die Ergebnisse zur Untersuchung Ihrer Probe mit unserem Prüfbericht 2022-7913-1 und -2.

Mit freundlichen Grüßen

Dr. Wigbert Maraun
Dipl.-Chem.

Sofern mit dem Auftraggeber nicht anders vereinbart, werden bei der Analyse nicht verwendete Anteile von Proben für drei Monate nach Ausgang des Untersuchungsberichtes zurückgestellt. Nach Ablauf der Rückstellfrist werden Probenreste entweder von uns ordnungsgemäß entsorgt oder bei als Sonderabfall zu behandelnden Proben an den Auftraggeber auf dessen Kosten zurückgesandt. Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen der ARGUK-Umweltlabor GmbH, einzusehen unter unserer Website www.arguk.de.

Bewertung:

1. Biozide Stoffe im Staub

In der Altstaubprobe „Rahmenstaub von Gemälde“ (vgl. Prüfbericht 2022-7913-1) werden von den untersuchten bioziden Stoffen 2,3,4,6-Tetrachlorphenol (TeCP) mit 0,19 mg/kg, Pentachlorphenol (PCP) mit 1,2 mg/kg, Lindan mit 0,13 mg/kg und Permethrin mit 0,65 mg/kg nachgewiesen.

Eine numerisch auffällige Überschreitung der statistisch abgeleiteten Orientierungswerte der AGÖF (siehe Bewertungsgrundlagen) ist dabei für keinen der Wirkstoffe festzustellen.

Die statistisch abgeleiteten Orientierungswerte der AGÖF beziehen sich auf Bodenstaub, der ca. 7 Tage ausgelegen hat und ausschließlich von der frei begehbaren Bodenfläche entnommen worden ist. Für die Bewertung von Altstaubproben sind die Orientierungswerte in Analogie zur PCP-Verordnung mit dem Faktor 5 zu multiplizieren.

Der angetroffene Gehalt an **PCP** in der Altstaubprobe liegt bei 1,2 mg/kg. Der Richtwert der PCP-Richtlinie von 1 mg/kg für Frischstaub ist dabei leicht überschritten, der Auffälligkeitswert für Altstaub von 5 mg/kg wird jedoch weit unterschritten.

Die Gehalte an TeCP, Lindan und Permethrin sind als Hintergrundbelastung einzustufen.

2) Schwermetalle im Staub

In der untersuchte Hausstaubprobe „Rahmenstaub von Gemälde“ (s. Prüfbericht 2022-7913-2) liegen alle untersuchten Schwermetalle in z.T. sehr hohen Konzentrationen vor.

Die entsprechenden Schwermetalle wie z.B. Blei, Quecksilber oder Cadmium wurden früher als Farbpigmente wie Bleiweiß, Zinnober oder Cadmiumfarben eingesetzt. Der Befund deutet darauf hin, dass sich abgelöste Farbpigmente des Gemäldes in dem umliegenden Rahmenstaub wiederfinden.

Eine erhöhte Belastung der Raumluft durch mobilisierte Feinstäube ist nicht auszuschließen.

Es kann nicht abschließend beurteilt werden, ob die nachgewiesenen Schwermetalle in der Staubprobe ausschließlich von dem entsprechenden Gemälde herrühren. Gerade hinsichtlich Quecksilbers und Blei sind auch noch andere Quellen möglich. Daher wäre zu empfehlen weitere Staubproben innerhalb der Räumlichkeiten bezüglich der Schwermetalle zu untersuchen.

Für eine Beurteilung der angetroffenen Schwermetallgehalte können als statistisch abgeleitete Referenzwerte die „ARGUK-Orientierungswerte Museum“ und die aus den „AGÖF-Orientierungswerte Frischstaub“ abgeleiteten „Altstaub-Werte“ herangezogen werden:

	Rahmenstaub von Gemälde			ARGUK- Schwellen- wert Bodenstaub (mg/kg)	ARGUK- Orientierungswerte für Bodenstaub „Museum“ vorläufige AW	abgeleitete AGÖF- Orientierungswerte für Hausstaub „Altstaub“ AW
Schwermetall						
Antimon	30			13	13	5
Arsen	53			20	20	5
Blei	13000			750	3000	750
Cadmium	26			25	40	25
Chrom	41			500	200	1000
Kobalt	11			20	15	25
Kupfer	1800			2500	2000	2500
Nickel	35			150	180	150
Quecksilber	1300			5	50	5
Zinn	290			200	200	250

Konzentrationen in mg/kg / µg/g

AW: Auffälligkeitwert (90. Perzentil)

Die von uns aufgeführten Schwellenwerte sind auf Grundlage der jeweils statistisch abgeleiteten Orientierungswerte für Altstaub und für Museumsstaub festgelegt worden. Sie bedeuten zuerst einmal keine toxikologische Aussage.

Die nachgewiesenen Schwermetall-Konzentrationen an Blei und Quecksilber überschreiten die jeweiligen Auffälligkeitwerte um ein Vielfaches.

Bei den untersuchten Elementen kommt es in Bezug auf deren toxikologische Bedeutung wesentlich auf die Bindungsform und den Ladungszustand an. Durch die Probenaufarbeitung im Säureaufschluss und der nachfolgenden Analytik werden lediglich die Element-Konzentrationen ermittelt.

Zur Beurteilung des **Blei**-Vorkommens im Bodenstaub kann auf die TRGS 505 in der Fassung vom 04.05.2022 verwiesen werden. Nach der TRGS 505 ergibt sich als Anwendungsbereich:

... für pulverförmige bleihaltige Gemische mit einem Partikeldurchmesser < 1 mm mit Bleigehalt > 0,03 % Masseanteil. Für den Bodenstaub kann ein Staub-Anteil mit einem Partikeldurchmesser von < 1 mm angesetzt werden. Ein Prozentwert von 0,03 % entspricht einem Massengehalt von 300 mg/kg.

Nach dieser Maßgabe ist die Bodenstaub-Probe mit einem Blei-Gehalt von 13000 mg/kg als kritisch im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung zu betrachten.

Für **Quecksilber** können sowohl durch metallisches Quecksilber, durch Sublimat-Quecksilber wie auch durch Organo-Quecksilber-Verbindungen dampfdruckbedingt Eintragungen in die Raumluft aus dem Bodenstaub oder aus Quellen über die Raumluft in den Bodenstaub stattfinden. Nach unserer Erfahrung ist bei dem ermittelten Gehalt an Quecksilber in der Staubprobe im Gleichgewichtszustand eine erhöhte Luftbelastung möglich.



Bericht 7913/2022

05.07.2022

Seite 3

Zur Beurteilung möglicher gesundheitlicher Beschwerden wenden Sie sich bitte an einen umweltmedizinisch erfahrenen Arzt. Eine gesundheitliche Gefährdung kann unmittelbar aus den Untersuchungsbefunden nicht abgeleitet werden, hierzu bedarf es der Kenntnis über die betroffenen Personen, den Expositionspfad, die aufgenommenen Schadstoffmengen u. a. Faktoren.

Mit freundlichen Grüßen

Dr. Wigbert Maraun
Dipl.-Chem.

PRÜFBERICHT 2022-7913-1

Seite 1 von 2

Auftraggeber	Probenahme	Laboreingang	Prüfgut	Prüfauftrag
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege Hofgraben 4 80539 München	durch Auftraggeber am: 23.05.2022	14.06.2022	Hausstaub	Biozide [AN 52212]

Projekt*	Probe/Raum*	Staubalter*	Staubfraktion
Rahmenstaub von Gemälde	-1: Rahmenstaub von Gemälde	Altstaub	< 2mm

*Angaben des Probenehmers / Auftraggebers, [AN]: Artikel-Nr. lt. Leistungsverzeichnis

Prüfverfahren
ARGUK 20106: Untersuchung von Hausstaub auf Biozide Absieben der < 2mm-Fraktion, soweit ausreichend Prüfmaterial vorhanden. Zufügen interner Standards (alpha-HCH, 2,4,6-Tribromphenol, PCB 209) zur Kontrolle des Prüfverfahrens. Extraktion mit n-Hexan und Carbonatlösung. Ggf. Acetylierung der Phenole. Stoffgruppenspezifische Fraktionierung des Extraktes an Silikagel. Aufkonzentration. Analyse mittels Kapillargaschromatographie und Flammenionisations- / Elektroneneinfang-Detektor (GC/FID/ECD) bzw. Massenspektrometrie (GC/MS). Kalibration und Gehaltsbestimmung über externe Standards.

Prüfverfahren		Prüfgegenstand		Prüfverfahren	
Probenart	Probe	Hausstaub		Orientierungswerte*	BG*
	Labor-Nr.	Rahmenstaub von Gemälde		AGÖF AW	
	Einwaage [g]	791322-1		2007	
		1,051			
Biozide					
Organo-Chlor-Pestizide					
	CAS-Nr.				
2,3,4,6-Tetrachlorphenol	58-90-2	0,19			0,1
Pentachlorphenol [PCP]	87-86-5	1,2		1,5	0,1
beta-HCH	319-85-7	nn		< 0,2	0,1
gamma-HCH [Lindan]	58-89-9	0,13		0,3	0,1
delta-HCH	319-86-8	nn			0,1
Hexachlorbenzol [HCB]	118-74-1	nn		< 0,2	0,1
Quintozen	82-68-8	nn			0,1
Chlorthalonil	1897-45-6	nn		< 0,3	0,1
Heptachlor	76-44-8	nn		< 0,2	0,1
Heptachlorepoxyd	1024-57-3	nn		< 0,3	0,1
Dichlofluanid	1085-98-9	nn		< 0,3	0,2
Tolyfluanid	731-27-1	nn		< 0,3	0,1
Endosulfan 1+2	115-29-7	nn		< 0,4	0,1
Endosulfansulfat	1031-07-8	nn			0,1
Aldrin	309-00-2	nn		< 0,2	0,1
Dieldrin	60-57-1	nn		< 0,2	0,1
Endrin	72-20-8	nn		< 0,3	0,1
Endrinaldehyd	7421-93-4	nn			0,1
2,4'-DDE	3547-04-4	nn			0,1
4,4'-DDE	72-55-9	nn		< 0,2	0,1
2,4'-DDD	53-19-0	nn			0,1
4,4'-DDD	72-54-8	nn		< 0,2	0,1
2,4'-DDT	789-02-6	nn		< 0,1	0,1
4,4'-DDT	50-29-3	nn		0,7	0,1
Summe DDT und Abkömmlinge	-		ne		
Chlordan	12789-03-6	nn		< 0,2	0,1
Toxaphen	8001-35-2	nn			2,0
Methoxychlor	72-43-5	nn		0,85	0,1
EULAN WA neu [Wirkstoffe: PCSD/PCAD]	-	nn		3,6	5,0
Furmecycloxyd	60568-05-0	nn			2,0
Propiconazol	60207-90-1	nn		< 0,3	1,0**
Tebuconazol	60-57-1	nn			2,0

Konzentrationen in mg/kg nn: nicht nachweisbar, weniger als Bestimmungsgrenze BG, ne: nicht ermittelbar

*Orientierungswerte siehe Bewertungsgrundlagen

**: matrixbedingt erhöhte Bestimmungsgrenze



PRÜFBERICHT 2022-7913-1

Seite 2 von 2

Prüfergebnis					
	Probenart Probe	Hausstaub Rahmenstaub von Gemälde		Orientierungswerte* AGÖF AW 2007	BG*
	Labor-Nr.	791322-1			
Biozide					
Organo-Phosphor-Biozide		CAS-Nr.			
Phoxim	14816-18-3	nn		< 0,2	0,5
Heptenophos	23560-59-0	nn			0,5
Propetamphos	31218-83-4	nn			0,5
Diazinon	95-48-7	nn		< 0,5	0,5
Chlorpyrifos-Methyl	5598-13-0	nn			0,5
Fenchlorphos	200-84-3	nn			0,5
Fenitrothion	122-14-5	nn			0,5
Malathion	121-75-5	nn		< 0,5	0,5
Chlorpyrifos	2921-88-2	nn		0,4	0,5
Parathion-Ethyl	56-38-2	nn		< 0,2	0,5
Bromophos-Methyl	2104-96-3	nn			0,5
Phenthoat	2597-03-7	nn			0,5
Methidathion	950-37-8	nn			0,5
Tetrachlorvinphos	22248-79-9	nn		< 0,2	0,5
Phosalon	2310-17-0	nn			0,5
Pyrethroide, Pyrethrum, Piperonylbutoxid					
Transfluthrin	118712-89-3	nn			0,5
Allethrin	584-79-2	nn		< 0,5	0,5
Resmethrin	10453-86-8	nn			0,5
Tetramethrin	7696-12-0	nn		< 0,5	0,5
Phenothrin	26002-80-2	nn		< 0,3	0,5
Cyphenothrin	39515-40-7	nn			0,5
Cyhalothrin	68085-85-6	nn		< 0,5	0,5
alpha-Cypermethrin	67375-30-8	nn			0,5
Permethrin	52645-53-1	0,65		6	0,5
Cyfluthrin	68359-37-5	nn		< 0,5	0,5
Cypermethrin	52315-07-8	nn		< 0,6	0,5
Fenvalerat	51630-58-1	nn		< 0,5	0,5
Deltamethrin	52918-63-5	nn		< 0,5	0,5
Piperonylbutoxid	51-03-6	nn		0,8	2,0
Pyrethrum	8003-34-7	nn			2,0

Konzentrationen in mg/kg nn: nicht nachweisbar, weniger als Bestimmungsgrenze BG

*Orientierungswerte siehe Bewertungsgrundlagen

Oberursel, 05.07.2022
ARGUK-Umweltlabor GmbH

Dr. Wigbert Maraun
Dipl.-Chem.

Ende des Prüfberichts.



PRÜFBERICHT 2022-7913-2

Auftraggeber	Probenahme	Laboreingang	Prüfgut	Prüfauftrag
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege Hofgraben 4 80539 München	durch Auftraggeber am: 23.05.2022	14.06.2022	Hausstaub	Schwermetalle

Projekt*	Probe/Raum*	Staubalter*	Staubfraktion
Rahmenstaub von Gemälde	-1: Rahmenstaub von Gemälde	Altstaub	< 2mm

*Angaben des Probennehmers / Auftraggebers

Prüfverfahren

ARGUK UA201: Untersuchung von Hausstaub auf Schwermetalle

Absieben der < 2 mm-Fraktion, soweit ausreichend Prüfmaterial vorhanden. Extraktion mit Königswasser; Analyse mittels ICP/Massenspektrometrie (ICP-MS). Kalibration und Gehaltsbestimmung über externe Standards.

Prüfergebnis

<i>Probenart Probe Labor-Nr.</i>	Hausstaub Rahmenstaub von Gemälde 791322-1			BG
Schwermetalle				
Antimon	30			1
Arsen	53			0,8
Blei	13000			2
Cadmium	26			0,2
Chrom	41			1
Kobalt	11			1
Kupfer	1800			1
Nickel	35			1
Quecksilber	1300			0,07
Zinn	290			3

Konzentrationen in mg/kg nn: nicht nachweisbar, weniger als Bestimmungsgrenze (BG)

Kein Messwerteintrag: laut Auftrag nicht analysiert

Oberursel, 05.07.2022

ARGUK-Umweltlabor GmbH

Dr. Wigbert Maraun
Dipl.-Chem.

Ende des Prüfberichts.



Bewertungsgrundlagen:

Zur Beurteilung einer Belastung des **Hausstaubes** mit schwer flüchtigen organischen Verbindungen existieren bis auf wenige Ausnahmen keine Grenz- oder Richtwerte. Deshalb wird auf statistisch abgeleitete Orientierungswerte (*AGÖF-Orientierungswerte*) zurückgegriffen, die nicht toxikologisch hergeleitet, sondern unter dem Aspekt der Gesundheitsvorsorge zu verstehen sind. Sie bedeuten **keine Grenz- oder Richtwerte**. Sie beziehen sich beim Hausstaub auf die Konzentrationen in einem eine Woche lang ausgelegenen Bodenstaub, bei Raumluftproben i.d.R. in einem mehrstündig ungelüfteten Raum.

Das Auftreten gesundheitlicher Beschwerden kann mit einer Überschreitung eines Orientierungswertes nicht ohne weiteres in Zusammenhang gebracht werden.

Während für Kleinkinder der Hausstaub einen signifikanten Aufnahmepfad darstellt, steht bei anderen Personengruppen die Raumluft als Aufnahmepfad im Vordergrund. Diese sollte gegebenenfalls zur Expositionsbeurteilung geprüft werden.

AGÖF-Orientierungswerte:

Die „AGÖF-Orientierungswerte“ basieren auf statistischer Ableitung und umfassen „Hintergrund-, Normal- und Auffälligkeitswerte.“ Als Hintergrundwert wird dabei das 10-Perzentil der Messwerteverteilung verwendet, als Normalwert das 50-Perzentil und als Auffälligkeitswert das 90-Perzentil.

Der „**Hintergrundwert HW**“ beschreibt einen Zustand, der durch konsequente Vermeidung von Emissionsquellen erreichbar und deswegen grundsätzlich anzustreben ist. Diese Hintergrundwerte liegen vielfach kleiner gleich der Nachweisgrenze der angewandten Methoden.

Der „**Normalwert NW**“ stellt die durchschnittliche Belastungssituation des betrachteten Kollektivs dar, die im Allgemeinen auf Quellen im Innenraum zurückgeht. Bei diesen Werten können zwar Innenraumquellen angenommen werden, ein Handlungsbedarf lässt sich daraus üblicherweise jedoch nicht ableiten.

Der „**Auffälligkeitswert AW**“ beschreibt eine Überschreitung von in Innenräumen üblichen Konzentrationen und legt das Vorhandensein einer Schadstoffquelle nahe. Je nach Konzentration und Eigenschaften der auffälligen Substanz sind weitere Untersuchungen zur Identifizierung der Quelle angezeigt. Unter Umständen ist eine Sanierung zu empfehlen.

Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring 00-Verortung Sensoren

[Auszug 1. DBU Zwischenbericht und Protokoll Projekttreffen 16.09.2022]

Anlass und Fragestellung

Die Auswahl der Messstellen erfolgte 2022 im Kernteam.

Es gibt drei Kategorien des Kunstwerkkontaktes:

A) Sensoren und Messtechnik OHNE Kunstwerkkontakt

u. a. Be- und Entfeuchter; Ventilator; AtemX Luftfiltergerät; Mess-PC, Router, Steuergeräte; Datenlogger; Messgeräte / Sensoren des Klimas; Luftschadstoffe; Zeitrafferkamera; Waage

B) Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → reversible Anbringung

u. a. Oberflächentemperatur; Extensometer; Laser-Wegaufnehmer; Millimeterpapier

C) Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → irreversible Anbringung

u. a. Schraubelektroden Elektrischer Widerstand

Auswahl und Anzahl der Messstellen

Die Auswahl der Messpunkte erfolgte möglichst so, dass auf der Vorderseite keine kleinteiligen Darstellungsbereiche oder stark geschädigten Partien vorliegen. Auch sollten die Stellen mit Inhomogenitäten im Bildträger (z. B. Astlöcher, Ritzungen, dicker Rückseitenanstrich) vermieden werden.

A) Sensoren und Messtechnik OHNE Kunstwerkkontakt

Alle Geräte wurden nach ihrer Größe, Kabellänge und ggf. notwendigen Zugänglichkeit zur Wartung, Reinigung, Nutzung oder Verwendungszweck in der Einhausung und in der Sakristei verteilt.

- ⇒ Be- und Entfeuchter: Aufgrund des Gewichts und der Notwendigkeit der Befüllung, Entleerung und Reinigung unterhalb der Arbeitstribüne. Durch das Raumvolumen (ca. 120m²) bedingt waren 1 Be- und 1 Entfeuchter ausreichend.
- ⇒ Ventilator: Aufgrund der gewünschten Luftbewegung unterhalb der Tribüne und in einer kondensations- und schimmelgefährdeten Ecke zur Außenwand unterhalb der Arbeitstribüne. Durch das Raumvolumen (ca. 120m²) bedingt war 1 Ventilator ausreichend.
- ⇒ AtemX Luftfiltergerät: Aufgrund der gewünschten Luftreinigung in der kondensations- und schimmelgefährdeten Ecke zur Außenwand unterhalb der Arbeitstribüne. Durch das Raumvolumen (ca. 120m²) bedingt war 1 Luftfiltergerät ausreichend.
- ⇒ Mess-PC, Router, Steuergeräte: Aufgrund der Steckdosen- und Fensternähe bzw. zur guten Bedienbarkeit auf dem Sakristeischrank neben der Arbeitstribüne. Steuerungs- und speicherbedingt war jeweils 1 Gerät ausreichend.
- ⇒ Datenlogger (ALMEMO und Thermofox Gigamodul): Anhängig von der Kabellänge nah an den jeweiligen Sensoren hinter dem Tafelbild; aufgrund

der ggf. notwendigen Wartung oder Kontrolle eignet sich eine gut zugängliche Positionierung. Durch die Anzahl der Sensoren war 1 ALMEMO-Logger mit 20 Steckplätzen sowie 1 Thermofox-Logger mit 8 Steckplätzen notwendig.

- ⇒ Luftschadstoffe: Sensoren der Korrosivität und Luftqualität «iair»: Es gibt 2 «iair» Sensoren für das Klima in der Einhausung und 1 in der Sakristei.
- ⇒ Zeitrafferkamera: Aufgrund beobachteter Bewegungen zum Projektbeginn zuerst frontal auf rechte untere Tafelbildecke gerichtet; im weiteren Verlauf rechts vom Tafelbild positioniert und später frontal mittig auf das Tafelbild gerichtet. Aufgrund des Anwendungszweckes und finanzieller Mittel wurde 1 Kamera gewählt.
- ⇒ Waage: Abhängig von Kabellänge und Steckdosennähe, möglichst. Erschütterungsarme Aufstellung; Berücksichtigung elektrischer Störfelder für andere Messtechnik → zuerst auf der Arbeitstribüne im Projektverlauf unter der Tribüne und später sogar außerhalb der Einhausung. Aufgrund des Anwendungszweckes und mangelnder finanzieller Mittel wurde 1 Waage vom KDWT ausgeliehen.
- ⇒ Messgeräte / Sensoren des Klimas:
Zur Erfassung des Klimas gibt es 4 Klima-Kombisensoren
 1. Tafel-Vorderseite (linke Befestigungsleiste des Tafelbildes, über BLfD-Logger)
 2. Tafel-Rückseite (Herabhängen vom Spanngurt, mittig des Tafelbildes, unter BLfD-Logger)
 3. Tribünen-Geländer (mit Kabelbinder an Holzleiste befestigt, ca. auf 3m Höhe)
 4. Außerhalb der Einhausung (Stützstrebe der Trockenbauwand)
 Ziel war es das Mikroklima an der Tafel (Vorder- und Rückseite) und das Raumklima der Einhausung sowie Sakristei festzuhalten. Weiterhin gibt es noch 3 USB-Datenlogger für den Fall eines Messtechnik Ausfalls; diese befinden sich auf höherer Höhe der Nahfeldsensoren, also mittig vor und hinter dem Tafelbild; ein weiterer liegt unter der Tribüne (kondensfeuchte- und schimmelgefährdeter Bereich aufgrund Außenwand). Die Sensoren sind allesamt nicht Sonnen- oder Witterungsexponiert. Für das Außenklima am Domberg werden die Daten des DWD herangezogen. Weiterhin befinden sich auch im «iair» Sensoren für das Klima (2x in der Einhausung und 1x in der Sakristei). Es befinden sich somit zu Hochzeiten 9 Klimasensoren in der Einhausung und 2 in der Sakristei. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Klimastratigrafie (Raumhöhe, Volumen, Luftverteilung) sowie Nahfeldklima und Raumklima (auch Vorder- und Rückseiten) können auch weniger Sensoren ausreichend sein; siehe auch Abschlussbericht: 4.1 Ergebnisse des Mess- und Monitoringkonzeptes sowie 7 Fazit und Ausblick, 7.1.1. Weiterführung des Monitorings

B) Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → reversible Anbringung

- ⇒ Oberflächentemperatursensoren: Die Oberflächentemperatursensoren (OF-T) befinden sich vorwiegend auf der Holztafelrückseite, um die fragile Malschicht der Vorderseite nicht zu schädigen und die OF-Temperaturen möglichst nah zu den Messpunkten des elektrischen Widerstandes (Holzfeuchte) ermitteln zu können. Außerdem wurden Sensoren an der Außenwand oberhalb der Tribüne, an der schimmelgefährdeten Außenwand unterhalb der Tribüne und an der Wand hinter dem Tafelgemälde angebracht. Ein Sensor wurde auf der Vorderseite des Gemäldes

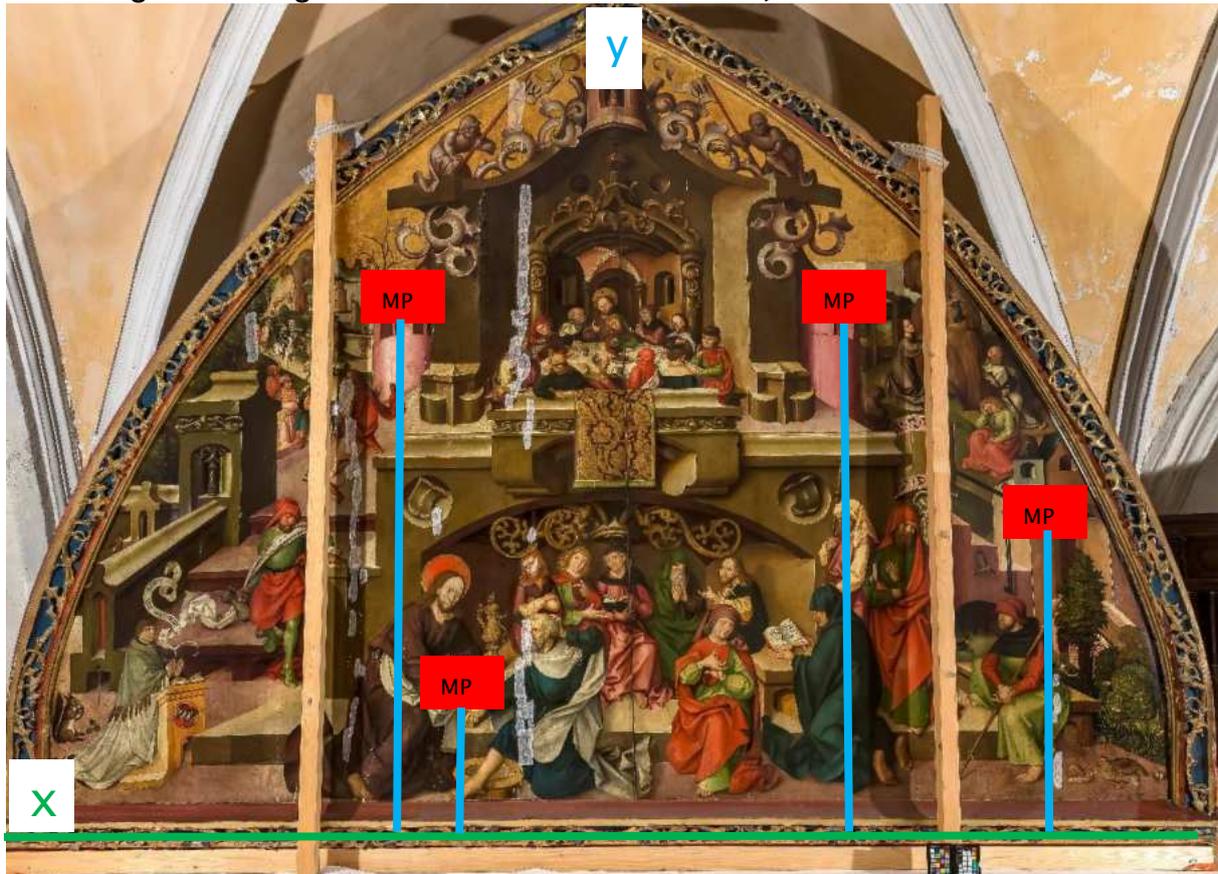
mit der im Anhang 01-Sensoranbringung, Versuche an Probekörpern beschriebenen Methode für empfindliche Oberflächen montiert. Mit derselben Methode wurde ein Referenzsensor auf der Rückseite direkt neben einen Sensor mit der bereits erprobten Methode befestigt. Für ein möglichst breites Messspektrum aller gefährdeten und fraglichen Bereiche wurden 10 OF-T-Sensoren gewählt. Siehe auch siehe auch Abschlussbericht: 4.1 Ergebnisse des Mess- und Monitoringkonzeptes sowie 7 Fazit und Ausblick, 7.1.1. Weiterführung des Monitorings

- ⇒ Extensometer: Um die Verformung der Holztafel in mehreren Ebenen zu überwachen und gleichzeitig einen Vergleich mehrerer Messmethoden zu ermöglichen, wurden in zwei Ebenen jeweils zwei Extensometer angeordnet (Winkeltoleranz $\pm 2,5^\circ$). Die 4 Extensometer sollten so ein breites Messspektrum der gefährdeten und fraglichen Bereiche der Rückseite des Holzträgers (linke / rechte Tafelhälfte, oberer und unterer Bereich) abdecken. Siehe auch siehe auch Abschlussbericht: 4.1 Ergebnisse des Mess- und Monitoringkonzeptes sowie 7 Fazit und Ausblick, 7.1.1. Weiterführung des Monitorings
- ⇒ Laser-Wegaufnehmer: Von den drei Triangulationslasern messen zwei die 2D-Dehnung der Tafelrückseite in Tafelebene; ein dritter nimmt die Verformung aus der Tafelebene heraus auf. Aus Kostengründen konnten nur 3 Laser angeschafft werden, wovon 2 möglichst nahe der Extensometer für einen Vergleich von low-cost und high-cost Methoden eingesetzt wurden. Der 3. Wurde zur Erfassung der Verwölbung aus der Tafelebene heraus verwendet. Siehe auch siehe auch Abschlussbericht: 4.1 Ergebnisse des Mess- und Monitoringkonzeptes sowie 7 Fazit und Ausblick, 7.1.1. Weiterführung des Monitorings
- ⇒ Millimeterpapier: Diese wurden zur Messung einer potenziellen Bewegung der Gratleisten, jeweils über einen Abschnitt von ca. 2 cm, auf die Rückseite der Tafel (möglichst nah an den Gratleisten) und auf den Oberkanten der Gratleisten (möglichst nah zum 1. Millimeterpapier) befestigt. Der Anfangspunkt Null sollte sich so gut wie möglich treffen. Für die 4 Gratleisten wurden somit 8 Abschnitte mit jeweils ca. 2 cm verwendet.

C) Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → irreversible Anbringung

- ⇒ Schraubelektroden Elektrischer Widerstand: Wie im Abschlussbericht beschrieben, kam zur Ermittlung des el. Widerstandes nur die Messung mittels Einschraubelektroden infrage, was einen Eingriff in die Originalsubstanz des Gemäldes erforderte. Nach gründlicher Abwägung restaurierungsethischer Bedenken, wurde beschlossen, die Messung durchzuführen, um einen möglichst hohen Erkenntnisgewinn aus dem Projekt zu erhalten, sodass dies in anderen Projekten nicht zwingend notwendig sein wird. Insgesamt wurden vier Messpunkte als notwendig erachtet, um einerseits mögliche Feuchteunterschiede zwischen rechter und linker Tafelhälfte sowie zwischen oberem und unterem Gemäldeteil zu erfassen. Die Auswahl erfolgte mit einer parallelen Abmessung der Vorder- und Rückseite, um beschädigte Malerei- oder Fassungsstellen sowie rückseitig Werg, Astlöcher und Fugen zu vermeiden. Die MP sollten in unterschiedlichen Höhen auftauchen und die linke sowie rechts Tafelseite berücksichtigen. Die MP wurden rückseitig mit Kreppband für die Bohrung (ca. 1cm tief; 4mm breit) markiert. Für die Einbringung waren somit vier Löcher für die Schraubelektroden (vorgebohrt mit dem Handbohrer $\varnothing 6,5$ mm; 3 mm Tiefe und Einschrauben per Hand auf ca. 14 mm Tiefe).

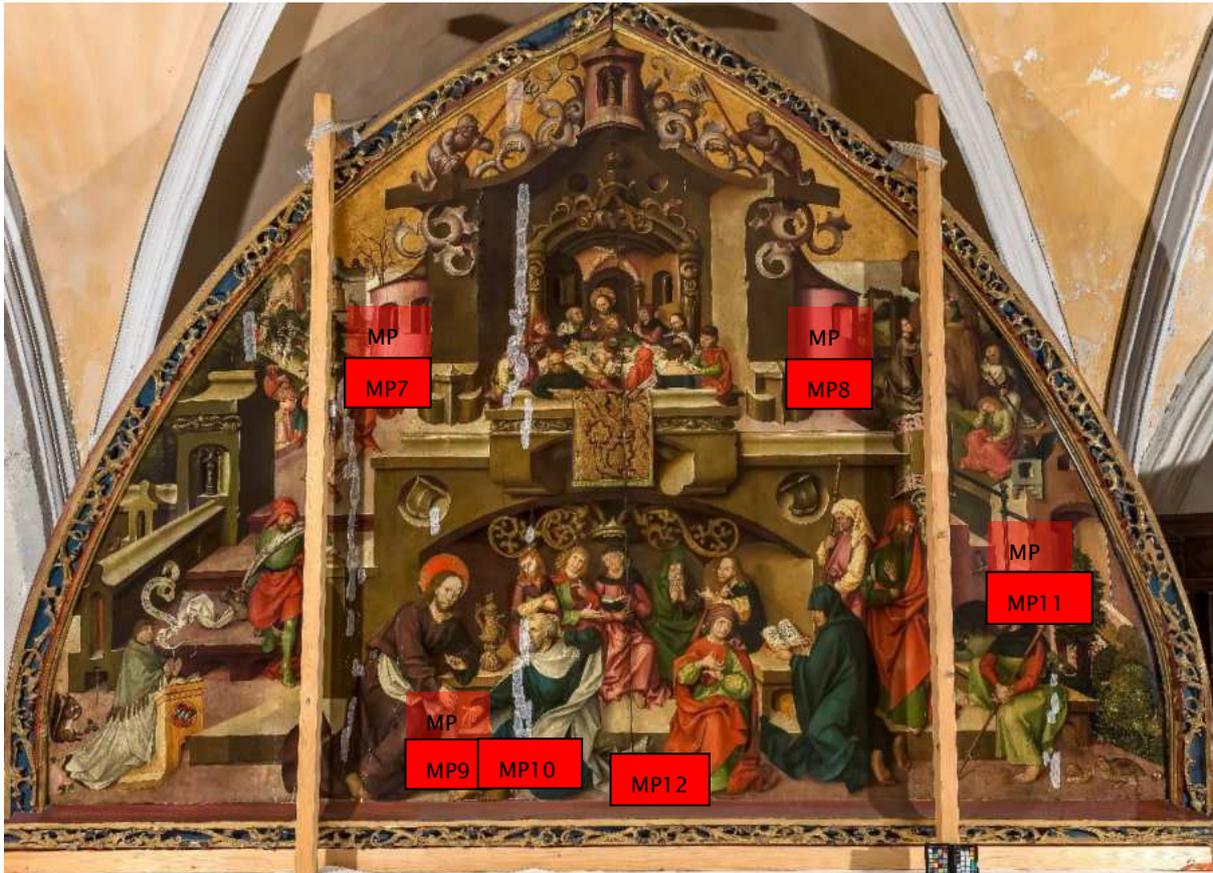
Verortung der wichtigsten Sensoren und Messtechnik; Fokus auf Kunstwerkkontakt



Darstellung der Verortung der Sensoren; hier anhand der Tafelvorderseite.
Die Befestigung erfolgte auf der Tafelrückseite.

MP Elektrischer Widerstand:

1. Rosa Türmchen links (x von links gemessen: 1,24 cm / y von unten gemessen: 1,95 cm)
2. Rosa Türmchen rechts (x von rechts 1,32 cm / y von unten: 1,95 cm)
3. Finger Jesus Fußwaschung (x von links: 1,54 cm / y von unten: 59 cm)
4. Rechte Seite Architektur (ca. 3. Bohle von rechts; x von rechts 0,46 cm / y von unten: 1,03 cm)



Darstellung der Verortung der Sensoren; hier anhand der Tafelvorderseite.
Die Befestigung erfolgte auf der Tafelrückseite sowie am Putz.

10 MP_{OF-T-Sensoren}:

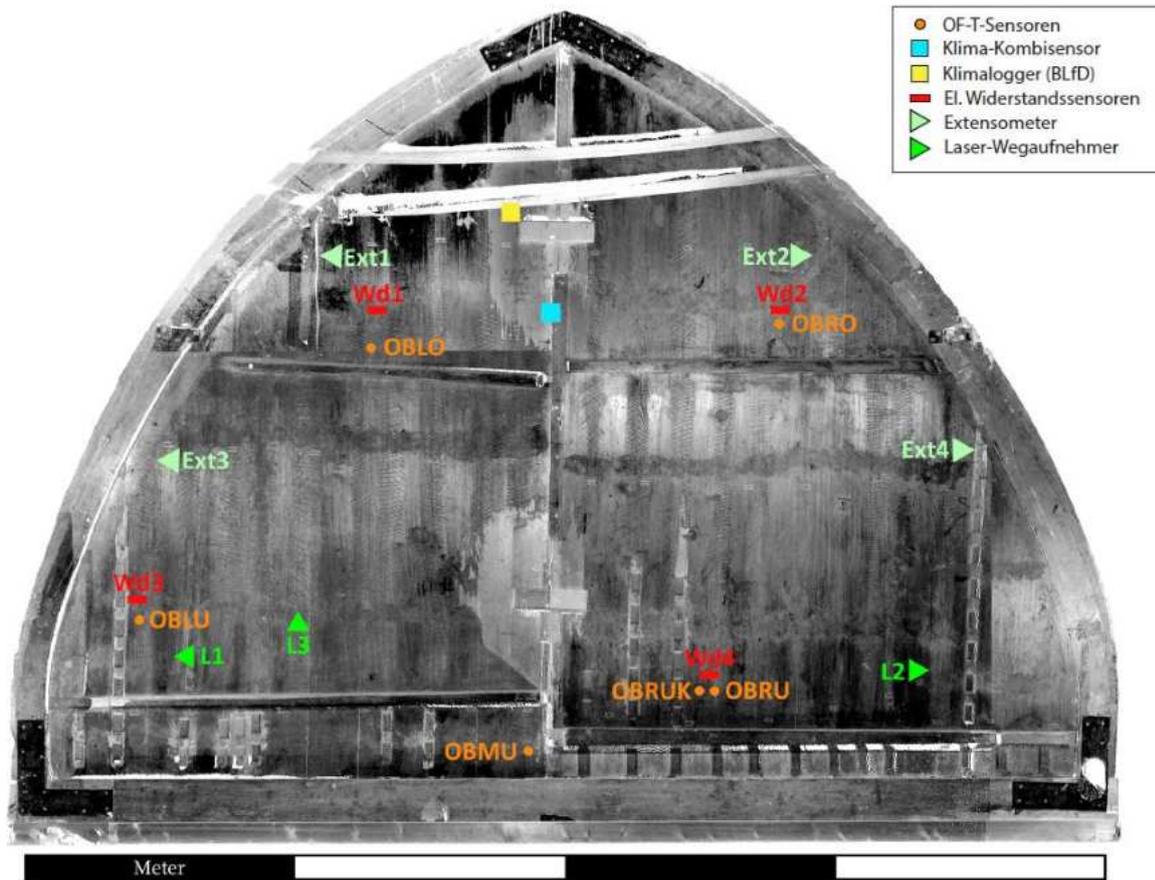
- | | |
|------------------------------|-----------------|
| 4. Rückwand Putz | 9. Rückseite 3 |
| 5. Seitenwand (Fenster) Putz | 10. Rückseite 4 |
| 6. Rahmen (linke Seite) | 11. Rückseite 5 |
| 7. Rückseite 1 | 12. Vorderseite |
| 8. Rückseite 2 | 13. Dummie |

Die Messpunkte MP7 bis MP11 wurden im näheren Umfeld der MP_{Widerstand} angelegt (zumeist auf möglichst ebenen Flächen darunter). Es wurden Japan- und Hollytex®-Papiere mit Tylose 5% und darauf Heißsiegelkleber appliziert. MP8 wird gemäß Methode «sticky-note» (siehe Abschlussbericht Kapitel 4.1.2 Sensoranbringung) befestigt. Bei MP 10 handelt es sich um den vorderseitigen Messsensor der OF-T; dieser wird ebenfalls gemäß Methode «sticky-note» appliziert. Für die Anbringung der MP an Wand, unter der Tribüne und am Rahmen mussten längere Kabel angeschafft werden. Sie wurden ebenfalls über Japanpapier und Hollytex® angebracht. MP 13 wurde an den Referenzproben (siehe Abschlussbericht 3.2.1 Herstellung von Probekörpern) appliziert.

Ergebnisse der Beobachtungen über den Projektverlauf sowie zur Ablösbarkeit nach Projektende siehe Abschlussbericht Kapitel 4.1.2 Sensoranbringung.

Verwendete Materialien

Siehe Abschlussbericht Anhang I, Materialien- und Geräteliste.



Messpunkt	Position (Höhe von Plattform aus gemessen)	Messzeitraum	Intervall	Messgenauigkeit				
OBRU	54 cm	06.10.2022 - Projektende	10 min	$\pm(0,3 + 0,005 t)$ K				
OBRUK	54 cm	10.10.2022 - Projektende						
OBRO	189 cm	06.10.2022 - Projektende						
OBLO	187 cm	10.10.2022 - Projektende						
OBMU	32,5 cm	06.10.2022 - Projektende						
OBLU	97 cm	10.10.2022 - Projektende						
OBV	30 cm	10.10.2022 - Projektende						
OWH	70 cm (ca. 115 cm Abstand)	10.10.2022 - Projektende						
OWF	41 cm (ca. 39 cm seitlich von Gemälde)	25.10.2022 - Projektende						
OWE	-18 cm	25.10.2022 - Projektende						
Laser 1	69,5 cm	29.11.22 - Projektende			10 min	0.25 μ m		
Laser 2	69 cm							
Laser 3	91,5 cm							
Kombifühler hinten	205 cm (ca. 2,5 cm Abstand)	16.09.2022 - Projektende	10 min	Feuchte: ± 3 % r.F. im Bereich 10 ... 90 % r.F.; Temperatur: $\pm 0,2$ K bei 5 ... 60 °C; Druck: $\pm 2,5$ mbar bei 23 °C ± 5 K;				
Kombifühler vorne	166 cm (ca. 18,5 cm Abstand)							
Kombifühler Raum	164 cm (ca. 146 cm Abstand)							
iAir unten	Direkt auf Plattform							
iAir oben	200 cm (ca. 13,5 cm Abstand)							
BLfD-Logger vorne	159 cm (ca. 13,5 cm Abstand)							
BLfD-Logger hinten	237 cm (ca. 6 cm Abstand)							
Extensometer 1	220 cm	22.12.22 - Projektende					10 min	0,002 mm
Extensometer 2	220 cm							
Extensometer 3	143 cm							
Extensometer 4	143 cm							
El. Widerstand 1	197 cm	22.12.22 - Projektende	1 Std	0,1 [$10^* \text{Log}(R)$]				
El. Widerstand 2	197 cm							
El. Widerstand 3	104 cm							
El. Widerstand 4	58 cm							

Tabelle 1: Positionen und Messparameter einzelner Sensoren (Zusammenstellung: TUM, A. Fröhlich, 2024)

Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring 01-Sensoranbringung, Versuche an Probekörpern

[Auszug 2. DBU Zwischenbericht und Ergänzung T. Hilger 24.07.2024]

Anlass und Fragestellung

Eine besondere Herausforderung stellte das Anbringen von Sensoren direkt am Objekt dar (siehe Anhang C Konzeptentwicklung und Monitoring, 00-Verortung Sensoren: Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → reversible Anbringung). Extensometer, Oberflächentempersensoren und die Aufnehmer für den Laser müssen direkt auf der Oberfläche befestigt werden ohne das Original zu schädigen. Zudem müssen sie bei Bedarf leicht zu entfernen sein, ohne sich jedoch über den Zeitraum der Messung zu lösen.

In der Literatur finden sich hierzu beispielsweise zwei Publikationen:

- A) Raffler et al.¹ : mehrere Lagen Japanpapier mit Celluloseether / Acrylate / Cyclododecan (je nach Objektanforderung) werden auf der Oberfläche appliziert, der Sensor wird dann mittels Heißkleber darauf montiert.
- B) Uzielli et al.² : Japanpapier mit Gelatine auf Holzträger kleben, darauf Sperrholz mit Vinylkleber befestigen, an denen die Sensoren angebracht werden können.

Methode

Es wurden verschiedene Testreihen auf – am BLFD vorhandenen Probekörpern – durchgeführt. Im Folgenden ist die Ausführung der Testreihen beschrieben. Die Testreihen sind am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege archiviert und können bei Bedarf zur Einsicht angefragt werden.

Testreihe I



Abb. 1: Probekörper 2 mit unterschiedlichen Papieren und Geweben und Heißklebertropfen:

Obere Reihe: Japanpapier + Tylose® MH300 5% in H₂O; z. T. + Heißkleber
Mittlere Reihe: Hollytex® dünn + Tylose® MH300 5% in H₂O; z. T. + Heißkleber
Untere Reihe: Hollytex® dick + Tylose® MH300 5% in H₂O; z. T. + Heißkleber

In dieser Testreihe wurden Japanpapier bzw. Hollytex® mit Tylose® MH 300, 5% in Wasser, auf eine Probekörper aufgebracht und 24h getrocknet. Anschließend wurden die Papiere zur

¹ Raffler, Susanne, Bichlmair, Stefan, Ralf, Kilian. Mounting of Sensors on Surfaces in Historic Buildings. Energy and Buildings, Volume 95, 15 May 2015, Pages 92-97.

² Uzielli et al. The Deformometric Kit: A method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels. Journal of Cultural Heritage 13S (2012) S 94–S101.

Hälfte mit Plextol® 500, Lascaux®, BEVA®; Sekundenkleber und UHU® endfest 300 als Expoxidkleber bepinselt, um beim ablösen mit Wasser die Auswirkungen auf die Malschicht zu erfahren. Es zeigte sich, dass ein einschichtiger Aufbau zu dünn ist und alle Klebstoffe (z. T. nur geringe) Schäden auf der Oberfläche anrichteten.

Testreihe II



Abb. 2: Probekplatte 3 mit unterschiedlichen Papieren und Geweben und Heißklebertropfen

1	2	3	4
Hollytex® dünn Hollytex® dick Japanpapier + Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber	Hollytex® dünn Japanpapier Hollytex® dünn + Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber	Japanpapier Hollytex® dünn Japanpapier + Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber	Hollytex® dünn Hollytex® dick Hollytex® dünn + Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber

Zuerst genanntes Papier / Polyester-Vlies zu unterst auf der Probekplatte

In dieser Testreihe zeigte sich, dass ein mehrschichtiger Aufbau aus drei Lagen Papier bzw. Vlies und Tylose® das starke diffundieren des Heißklebers verhindern kann und welche Reihenfolge sich in der Ablösung mit Wasser positiv verhält. Bei Kombination 3 lässt sich das Hollytex® samt darüber liegenden Japanpapier und Heißkleber mit Feuchtigkeit gut ablösen. Das Japanpapier bleibt die Oberfläche schützend zurück und lässt sich in einem weiteren Schritt leicht mit Wasser ablösen.

Testreihe III



Abb. 3: Probekplatte 1 mit unterschiedlichen Papieren und Geweben und Heißklebertropfen

Japanpapier Hollytex® dick Hollytex® dick	Japanpapier Hollytex® dick Hollytex® dick	Hollytex® dünn Hollytex® dick Hollytex® dick	Hollytex® dünn Hollytex® dick Hollytex® dick	Hollytex® dick Hollytex® dick Hollytex® dick	Hollytex® dick Hollytex® 5% in H ₂ O	Japanpapier Japanpapier	Japanpapier Japanpapier Japanpapier	Japanpapier Hollytex® dünn	Japanpapier Hollytex® dick
+ Tylose® MH300 3,5% in H ₂ O + Heißkleber	+ Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber	+ Tylose® MH300 3,5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 3,5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 3,5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 5% in H ₂ O	+ Tylose® MH300 5% in H ₂ O

		+ Heißkleber							
--	--	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Zuerst genanntes Papier / Polyester-Vlies zu unterst auf der Probeplatte

Die Testreihe zeigte, dass der Celluloseether Tylose® MH300 in 3,5%iger Lösung keine ausreichend hohe Klebkraft erreicht; teilweise ergaben sich Schäden in der Malschicht, da der Klebstoff auch keine ausreichend dicke Abgrenzungsschicht zum Heißkleber schaffen konnte. Die 5%ige Tylose® eignet sich mit ihrer Dickflüssigkeit und anhand der späteren Klebkraft gut auf den Probeplatten, insbesondere, wenn an eine stehende Applikation gedacht wird. Zudem erschienen die Schäden hierbei geringer.

Zwischenergebnis

Die verschiedenen Kombinationen der Papiere / Polyester-Vlies zeigten, dass das Japanpapier sich am besten an unebene Oberflächenstrukturen anpasst, danach folgt das Hollytex® dünn und dann Hollytex® dick. Letzteres passt sich nicht besonders gut an seinen Untergrund an und lässt sich aufgrund der hydrophoben Oberfläche aus Polyester-Vlies auch weniger gut benetzen bzw. löst es sich starrer und etwas zu leicht wieder vom Untergrund ab. In den Testreihen erweist es sich weiterhin als sehr positiv, die unterste Schicht aus Japanpapier (sehr anpassungsfähig an den Untergrund, flexibel und gut vom Klebstoff benetzbar) anzufertigen. Darauf kann dann Hollytex® dünn appliziert werden, welches sich noch relativ gut an den Untergrund anpasst, gleichzeitig aber eine dickere Abgrenzung schafft, als das Japanpapier. Darauf kann erneut Japanpapier appliziert werden, um dann den Heißkleber aufzubringen. Bei den Ablöse-Versuchen durch Befeuchtung mit Wasser zeigte sich in diesen Schichtpaketen eine gute Trennung des Hollytex® dünn zum untersten Japanpapier. Eine Ablösung des Sensors mit Heißkleber scheint dadurch möglich; die unterste Schicht Japanpapier verbleibt und kann anschließend in einem 2. Schritt mit Feuchtigkeit entfernt werden. Wird hingegen nur Japanpapier verwendet (z. B.: zwei- oder dreilagig), diffundiert der Heißkleber teilweise durch. Außerdem reißt befeuchtetes Japanpapier sehr leicht, wodurch eine Ablösung des starren, fest anhaftenden Sensors mit dem Heißkleber-Pfropfen erschwert wird.

Testreihe IV



Abb. 4: Probeplatte 1 mit unterschiedlichen Papieren und Geweben und Heißklebertropfen

Links	Mittig	Rechts
Japanpapier Hollytex® dünn + Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber	Japanpapier Hollytex® dick + Tylose® MH300 5% in H ₂ O + Heißkleber	Japanpapier Hollytex® dick + Tylose® MH300 3,5% in H ₂ O + Heißkleber

Zuerst genanntes Papier / Polyester-Vlies zu unterst auf der Probeplatte

Die Ergebnisse dieser Testreihe ergänzen die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen; ein nur zweilagiger Aufbau erscheint zu dünn (diffundieren des Heißklebers), die 3,5%ige Tylose® ist zu dünnflüssig und zu wenig Klebstark und das Japanpapier reißt bei Feuchtigkeit sofort ein.

Testreihe V



Abb. 5 und 6: Kombinierte Papiere bzw. Polyester-Vlies mit angedrücktem Heißkleber (ohne Celluloseether)

In der Testreihe wurden Schichtpakete aus Papier / Vlies aufeinandergelegt und mit einem Tropfen Heißkleber auf Papier angedrückt. Es wurde deutlich, dass der Heißkleber in allen Variationen durch den Anpressdruck und die fehlende Celluloseetherschicht durch diffundiert und die Sandwiches auf dem Papier festkleben. Die Kombination aus Hollytex® dünn – dick – dünn erzielte dabei am wenigsten Schaden.



Abb. 7: Sensorkopf mit Heißkleber auf Hollytext befestigt, Oberseite



Abb. 8: Sensorkopf mit Heißkleber auf Hollytext befestigt, Unterseite (Kleber geht durch)

Das Ankleben des Sensorkopfes auf Hollytex® dick zeigt, dass sich dieses z. T. wellt und ggf. schlechter vor Ort appliziert werden kann. Außerdem ist das deutliche Durchdringend des Heißklebers auf die Unterseite deutlich. Als weitere Variation wurden Japanpapier und Hollytex® mit Lascaux 303 HV beschichtet und getrocknet. Die Besonderheit des Klebstoffes, seine besonders niedrige Glasübergangstemperatur (ca. -31°C) ermöglicht das klebrig bleiben und macht es zu einer Art «sticky-note», welche sich wie ein Pflaster ankleben und wieder lösen lässt; es wird kein flüssiger Klebstoffeintrag benötigt und auch keine lange Trocknungszeit. In den Versuchen zeigte sich, dass sich das Japanpapier erstaunlich geschmeidig verhält und mit dem Sensor (+ Heißkleberpunkt) an die Probeplatte anbringen lässt. Hollytex® dünn erweist sich als etwas zu starr und löst sich nach kurzer Zeit durch die Schwerkraft (Sensorgewicht und Zug des Kabels nach unten) mittig ab, was zu einer Lufttasche unter dem Messsensor führt. Auch beim Japanpapier war eine solche Lufttasche nach 12h sichtbar; durch eine neue Aktivierung des Klebstoffes unter Zuführung von Wärme konnte dies behoben werden, wodurch der Sensor über mehrere Wochen ohne Lufttasche an der Probeplatte fixiert werden konnte. Die Ablösung kann durch leichtes, trockenes Abziehen erfolgen. Der Klebrigkeit des beschichteten Papiers (stark Staub- und Schmutz anziehend) kann durch ein von oben appliziertes unbeschichtetes Japanpapier umgangen werden.

Fazit:

Versuche an Dummies ergaben, dass der warme Heißsiegelkleber auch bei mehreren Lagen reinem Japanpapier auf die Oberfläche dringt und die Ablösung erschwert. Die Befeuchtung mit Wasser an den mit Heißsiegelkleber bedeckten Bereichen geschieht nur unzureichend, die Methylcellulose wird dadurch nicht vollständig erweicht. Die Folge waren Schäden an empfindlichen Oberflächen der Dummies bei allen Versuchen.

Anhand der unterschiedlichen Praxisversuche wurden zwei konservatorisch vertretbare Möglichkeiten evaluiert. Möglichkeit 1 besteht aus mindestens 3 Lagen Papier- / Vlies. Für die gute Haftung und Anbringung am potenziell topografischen Untergrund sowie für eine gute Ablösbarkeit des Heißklebers, bei verbleiben der untersten Lage als Schutzschicht wurde eine Abfolge aus Japanpapier – Hollytex® dünn – Japanpapier ausgewählt. Das dicke Hollytex® wurde aufgrund seiner hydrophoben, starren und wenig gut haftenden Eigenschaften abgelegt. Die Fläche der Papiere sollte groß genug sein, die umliegenden Bereiche vor dem Heißsiegelkleber zu schützen und eine gute Handhabbarkeit zu gewährleisten; im vorliegenden Fall waren es ca. 4 x 6 cm. Als Klebstoff für die Papiere / Vliese wurde der Celluloseether Tylose® MH 300 5% in Wasser ausgewählt und nass in nass mit dem Pinsel aufgetragen. Der Sensorkopf wird mit Heißkleber aus der Heißklebepistole befestigt; er muss dafür recht zügig und mit adäquaten Druck in den Tropfen aus heißem Klebstoff eingedrückt

werden. Die Anbringung der Extensometer erfolgte analog mittels Tylose® MH300 5% auf 3 lagigem Japanpapier jeweils auf der linken und rechten Tafelseite. Das Gegenstück des Extensometers wurde auf ein Holzklötzchen geschraubt und mit Heißsigelkleber auf den Japanpapieren befestigt

Für die vergleichsweise unempfindliche Rückseite und die Wand sollte trotzdem die vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik und dem KDWT bereits erprobte und eingesetzte Methode angewandt werden. Für die Vorderseite kam sie aufgrund der Vorversuche nicht infrage. Stattdessen sollte eine weitere Methode gefunden werden, die eine Aushärtung des Heißsigelklebers außerhalb der Bildoberfläche ermöglicht; die sogenannten «sticky-note». Hierzu wurden Japanpapierstücke auf einer einseitig silikonisierten Hostaphanfolie mit dem thermoplastischen Dispersionsklebstoff Lascaux® 303 HV beschichtet und über mindestens 24 h getrocknet. Der Klebstoff besitzt eine niedrige Glasübergangstemperatur und bleibt bei Raumtemperatur dauerhaft klebrig. Auf die Stücke, die noch auf der silikonisierten Hostaphanfolie kleben, wurde nach der Trocknungszeit der Oberflächentempersensor mit Heißsigelkleber – wie oben beschrieben - befestigt. Nach der Auskühlung des Heißsigelklebers kann das Schichtpaket von der Folie abgezogen werden.

Parallel dazu kann auf der zu beklebende Oberfläche am Original das erprobte Schichtpaket aus Japanpapier – Hollytex® dünn mit Celluloseether Tylose® MH 300 5% in Wasser (Pinsel, nass in nass) befestigt werden. Nach der Trocknungszeit von mindestens 3-7 Tagen (je nach Temperatur und r.F.) kann die «sticky-note» darauf befestigt werden. Ein adäquater Anpressdruck und die Nutzung von Handwärme kann die Klebung verbessern.

Die Bedenken zur Minderung der Leitfähigkeit und potenziellen Messungenauigkeit durch eine zu hohe Dicke der Papier- und Klebstofflagen zwischen Gemäldeoberfläche und Sensor wurden praktisch erprobt. Es wurden zwei der evaluierten und konservatorisch verträglichen Methoden neben der Befestigung eines Sensorkopfes direkt auf der Oberfläche mit Heißkleber auf einer farbig gefassten Probeplatte in der Einhausung überprüft. Die Messung ergab, dass die Temperaturdifferenz zwischen den drei Sensoren innerhalb der Messtoleranz des Sensors liegt und somit ohne Relevanz ist.

Für die Anbringung der Endmaße für die Lasermessung musste eine andere Methode gefunden werden, da diese teils senkrecht zur Tafelrückseite angebracht wurden. Im Vorfeld wurde eine kleine Testreihe mit unterschiedlichen Klebstoffen ausgeführt, um deren Eignung für den Einsatz vor Ort zu prüfen. An den zu verwendenden Klebstoff wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Verarbeitung bei relativ niedrigen Temperaturen möglich?
Einhausung zu diesem Zeitpunkt unter 13 °C
- Gute Klebkraft bei geringem Anpressdruck
- schnelles Abbinden bzw. eine gute Anfangshaftung für gute Verarbeitung vor Ort

Als geeignetste Variante wurde die Anbringung mittels doppelseitigem Klebeband (Tesa® Verlegeband, extra stark klebend) ausgewählt. Als Träger für die Keramik-Endmaße, auf denen der Lasersensor misst, dient eine keilförmig zugeschnittene KAPA®-Platte (Produktname: KAPA® Line). Zum Schutz der Holzoberfläche wurde erneut oben genanntes 3-lagiges Japanpapier-Hollytex®-Sandwich aufgebracht. Darauf wurde anschließend mittels dem doppelseitigen Klebeband ein Keil geklebt; auch die Keramik-Endmaße wurden mit diesem Klebeband befestigt. Als Referenz wurde die Probeplatte mit den Testklebungen

ebenfalls in die Einhausung gestellt. Sollte sich die jetzige Lösung als nicht dauerhaft erweisen, könnte die Verwendung eines anderen Stoffes aus der Testreihe in Erwägung gezogen werden.

Ergebnisse der Beobachtungen über den Projektverlauf sowie zur Ablösbarkeit nach Projektende siehe Abschlussbericht Kapitel 4.1.2 Sensoranbringung.

Verwendete Materialien

Siehe Abschlussbericht Anhang I, Materialien- und Geräteliste.

Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring 02-Auswahl der Methoden für das Verformungsmonitoring

[Auszug 1. und 2. DBU Zwischenbericht]

Tabelle 3 1: Verschiedene Methoden für das Verformungsmonitoring und deren Vor- und Nachteile

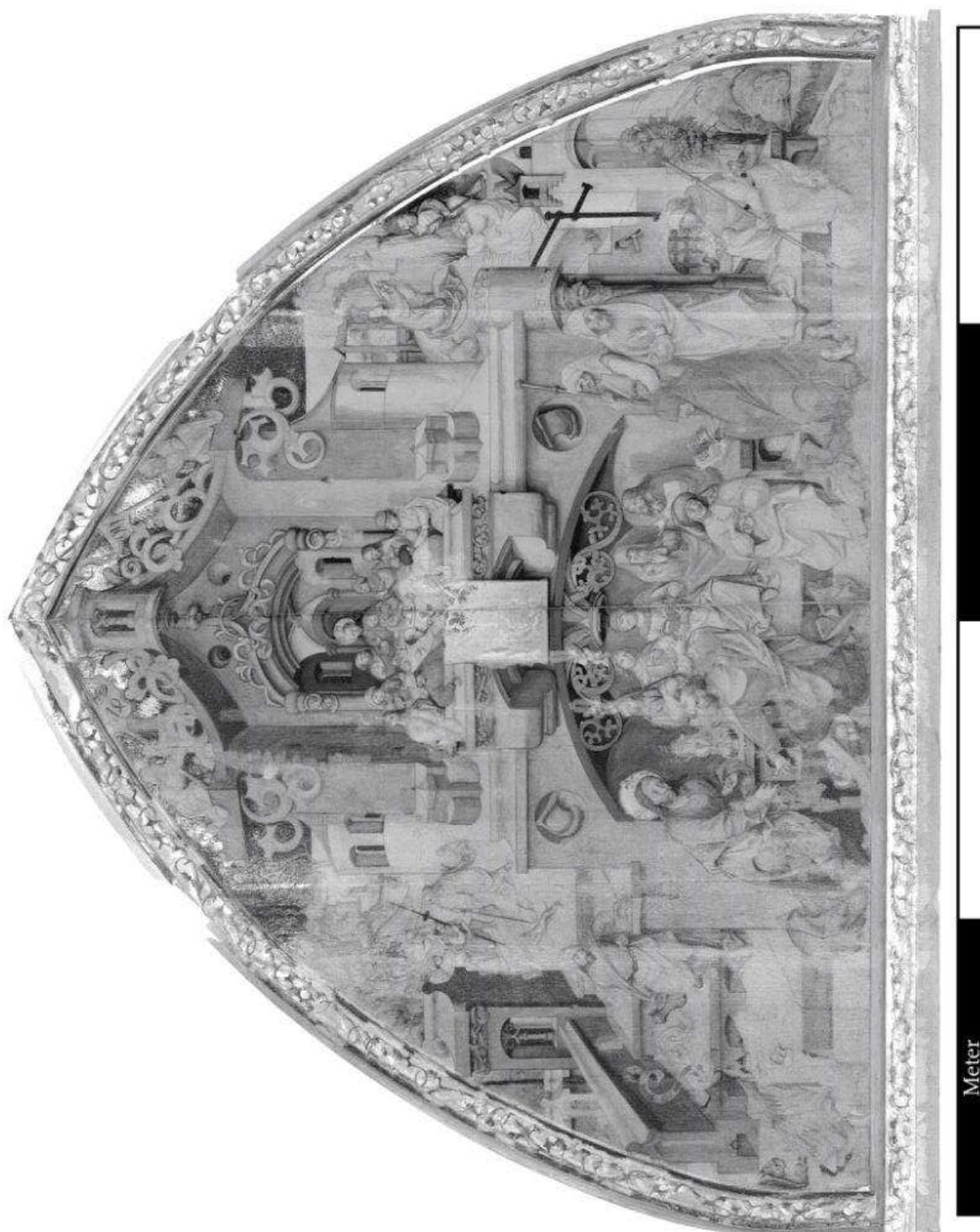
Methoden	Vorteile	Nachteile	Ausschlusskriterium
Faseroptische Messung	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr leicht - Beeinflussen Objekt kaum - Enge Messpunktabstände oder lineare Dehnungsmessung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Unterschiedliche Verklebung nötig - Fasern meist sehr empfindlich - Messverstärker oft sehr teuer - Erwartete Dehnungen der Tafel zu groß 	<ul style="list-style-type: none"> - Hochfeste Klebstoffe aus konservatorischer Sicht inakzeptabel - Erfassung der Bewegung aus der Tafelebene heraus nicht möglich
Dehnungsmessstreifen (DMS)	<ul style="list-style-type: none"> - Günstig - Leicht anzuwenden 	<ul style="list-style-type: none"> - Punktuelle Messung - Teure Messverstärker - Unterschiedliche Verklebung nötig - Wahl eines kunstwerkverträglichen Klebstoffes schwierig 	<ul style="list-style-type: none"> - Erfassung der Bewegung aus der Tafelebene heraus nicht möglich - Risiko der Scheindehnung durch Temperaturveränderung; s. Fuesers et al., 2005.
Nahfeld-photogrammetrie	<ul style="list-style-type: none"> - Berührungslos - 2D- und 3D-Erfassung möglich - Einfache Kameras oder industrielle Systeme möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Für hohe Genauigkeit sind codierte Messmarken auf dem Objekt nötig - Industrielle Systeme genauer, aber teurer - Das in industriellen Anwendungen nötige Speckle-Muster kommt bei Kulturgütern nicht in Frage 	<ul style="list-style-type: none"> - Anwendung bei den beengten Verhältnissen in der Einhausung nicht möglich (keine Erfassung von hinten möglich, flache Betrachtungswinkel von vorne liefern ungenaue Ergebnisse(Luhmann 2018, S. 259)) - Langzeit-Monitoring nicht möglich (Pelagotti et al. 2018, S. 7–8)
Wegaufnehmer (Extensometer)	<ul style="list-style-type: none"> - Viele Messprinzipien: induktiv, potentiometrisch, magnetostruktiv - Einfach Handhabung - Robust - Günstig 	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanische Befestigung am Objekt nötig (schonende Befestigung möglich (siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) - Geringe Auflösung 	
Deformometric Kit	<ul style="list-style-type: none"> - Speziell zur Untersuchung von Dehnung und Wölbung von Holztafelbildern entwickelte Anordnung zweier Extensometer (Uzielli et al. 1992) 	<ul style="list-style-type: none"> - Kraftschlüssige Verbindung nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - Nötige Verschraubung der Trägerstifte konservatorisch nicht akzeptabel
Triangulationslaser	<ul style="list-style-type: none"> - Berührungslos - Quasi-kontinuierliche Messung - hochpräzise - robust 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Kosten 	

Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring

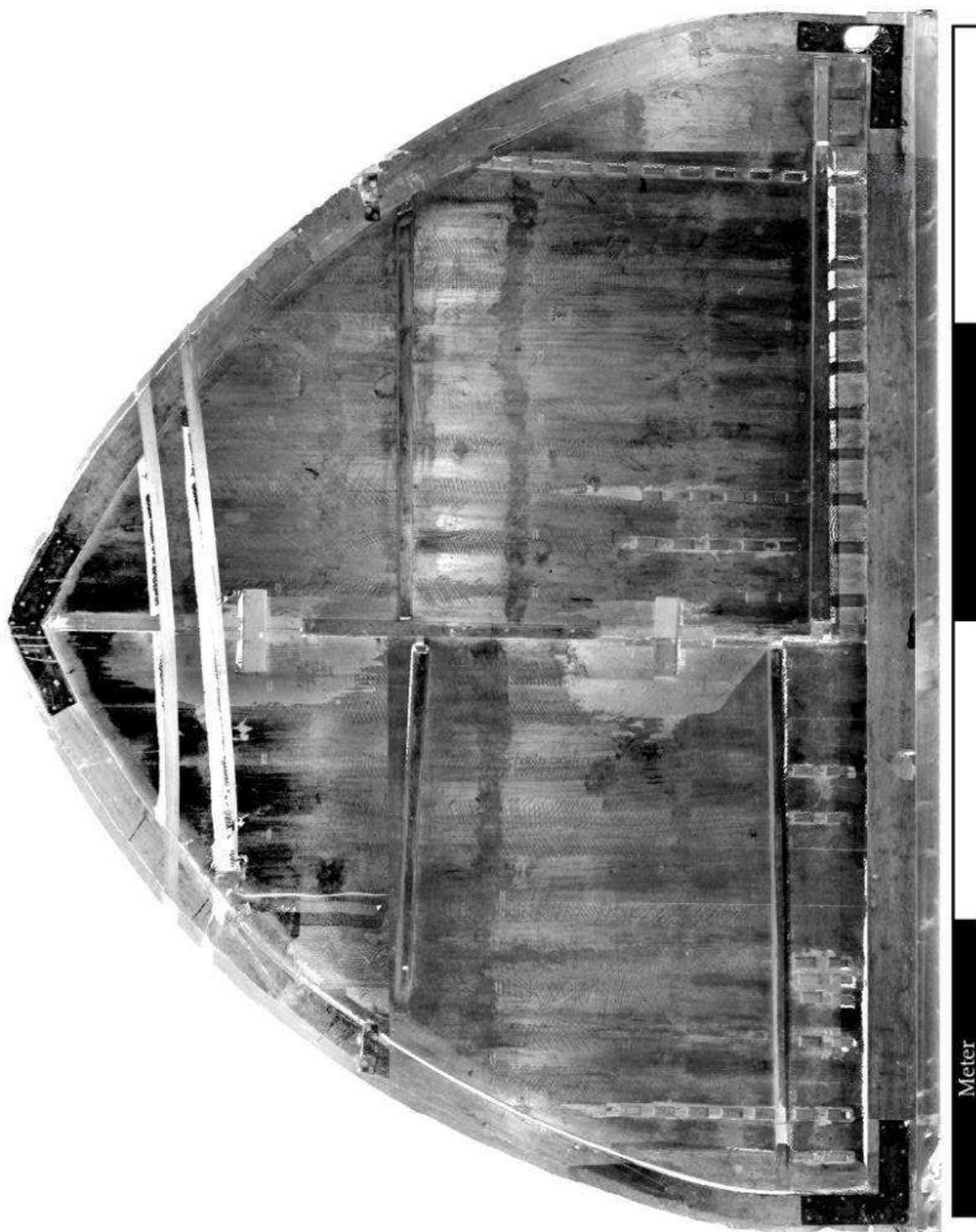
03- Orthofotos Vorder- und Rückseite

Anlass und Fragestellung

Die Gesamtaufnahmen des Tafelgemäldes wurden mit dem terrestrischen Laserscanner Faro Focus S 350 der Firma FARO erstellt (s. Abbildung 3 10). Nach dem Messprinzip des Phasenvergleichs tastet der Laser sein Umfeld in einem Bereich von 360° horizontal und 270° vertikal ab und erstellt so eine dreidimensionale Punktwolke seiner Umgebung. Für die Aufnahmen wurde ein Punktabstand von 6,1 mm auf 10 m Radius gewählt. Damit hat ein einzelner Scan bis zu 43,7 Millionen Punkte. Durch mehrere Scanpositionen verdichtet sich die Punktwolke. Um das Tafelgemälde einschließlich seiner Aufstellungssituation aufnehmen zu können, wurde Scans von mehreren Positionen um das Objekt herum erstellt. Die Aufnahmen beinhalten damit sowohl Vorder-, als auch Rückseite des Tafelgemäldes. Um die Scandaten weiterverarbeiten zu können, wurden die einzelnen Scanstandorte mit der Software FARO Scene 2020.0.7 zueinander registriert. Aus der daraus resultierenden Punktwolke konnten dann verzeichnungsfreie Orthofotos der Vorder- und Rückseite generiert werden. Gerade auf der Rückseite war es aufgrund des geringen Abstands zur Rückwand schwierig, eine Gesamtaufnahme mittels Fotografie durchzuführen. Die Abbildungen befinden sich im Anhang (s. Abbildung Anhang F: Ergebnisse, Scans 1-4).



**Abbildung 1: Orthogonale Gesamtaufnahme des Tafelgemäldes, Vorderseite.
Erstellt mit einem Laserscanner (FARO) (Foto: L. Pallas, KDWT).**



**Abbildung 2: Orthogonale Gesamtaufnahme des Tafelgemäldes, Rückseite.
Erstellt mit einem Laserscanner (FARO) (Foto: L. Pallas, KDWT).**

Anhang D: Hygrothermische Simulation 00- Herstellung von Probekörpern und verwendete Materialien

Beschichtung der Probekörper (Glasfritten + Holzplatten)

Zusammensetzung und Auftrag der Schichten:

Probekörper- bezeichnung	Schicht(en)	Materialzusammensetzung	Auftragsmethode
F_VS_1-9; F_RS_1-6; F_SD_1-3 Alle Holzplatten	Vorleimung 1/2; Vorleimung 1/2; Vorleimung 1-3 Vorleimung 1/2	Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser	Ca. 45-50 °C, Abmessung über Spritze, direkt auf Pinsel gegeben; Auftrag mit breitem Borstenpinsel, Gr. 40
F_VS_1-9 Alle Holzplatten	Grundierschicht 1	Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser + Champagner Kreide (1:1,3)	Ca. 45-50 °C; Abmessung über Spritze, direkt auf Pinsel gegeben; gestupfter Auftrag mit Rundpinsel
F_VS_1-9 Alle Holzplatten	Grundierschicht 2-8 Grundierschicht 2-7	Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser + Champagner Kreide (1:1,4)	Ca. 45-50 °C; Abmessung über Spritze, in Keramikschale gegeben; gestrichen mit breitem Borstenpinsel, Gr. 40 Schliff mit Nassschleifpapier bis 400er Körnung
F_VS_1-9 Alle Holzplatten	Absperrschicht 1/2	Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser	Ca. 45-50 °C, Abmessung über Spritze, direkt auf Pinsel gegeben; Auftrag mit breitem Borstenpinsel, Gr. 40
F_VS_1-9 Alle Holzplatten	Malschicht	<u>Bindemittel:</u> Leinöl (sonneneingedickt) <u>Pigmente/Füllstoffe:</u> Bleiweiß, Grünspan (synthetisch), Champagnerkreide, Blutstein (nat. Eisenoxid) <u>Lösemittel:</u> Sangajol <u>Herstellung:</u> Anreiben von Trockenpigmenten mit Leinöl, vor Auftrag mit Sangajol verdünnt (um Streichfähigkeit zu verbessern); Bleiweiß wurde aus Arbeitsschutzgründen als fertige Leinölfarbe bezogen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Grünspan + Champagner Kreide + Leinöl (1:1:0,67 GT) ➤ Blutstein + Leinöl (1: 0,3 GT) 	<u>Glasfritten:</u> Abwiegen von 0,92 g (entspr. ca. 0,32 ml) Farbe + 2 Tropfen Sangajol > in Schale vermischen; Auftrag mit Rinderhaarpinsel, Gr. 20 <u>Holzplatten:</u> Abwiegen von 5,8 g (entspr. ca. 2 ml) Farbe + 11 Tropfen Sangajol

		<u>Mischungsverhältnis der Einzelfarben (GT):</u> Bleiweiß 69 %, Grünspan/Kreide 29 %, Blutstein 1,57 %	
F_RS_1-6 Alle Holzplatten	Bindemittelauftrag/Leinölfirnis	Leinölfirnis (Mangan sikkativiert), Sangajol zum Pinsel auswaschen	Abmessung über Spritze, direkt auf Pinsel gegeben, Auftrag mit Borstenpinsel, Gr. 30
F_SD_1-3	Firnis 1 (Schellack)	Schellack (hellst) in Ethanol gelöst (1:2 GT)	Abmessung über Spritze, direkt auf Pinsel gegeben, Auftrag mit Borstenpinsel, Gr. 18
F_SD_1-3	Firnis 2 (Schellack)	Dammarharz gelöst in Balsamterpentinöl, doppelt rektifiziert (1:4 GT)	Abmessung über Spritze, direkt auf Pinsel gegeben; Auftrag mit Borstenpinsel, Gr. 18

Verwendete Materialien und Geräte:

Produkt	Hersteller	Bezugsquelle
Balsamterpentinöl, doppelt rektifiziert, Nr. 70010	Kremer-Pigmente	Bestand BLfD
Blätterschellack hellst (entfärbt, wachsfrei), Nr. 60450	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Bechergläser (verschiedene Größen)	Schott(?)	Bestand BLfD
Bleiweiß (Kremerweiß in Leinöl), Nr. 460006	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Blutstein farbstark, Nr. 48651	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Champagner Kreide, natürliches Calciumcarbonat, Etiquette Violette; Nr. 58000	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Dammar Harz, beste Qualität (handverlesen), Nr. 6000	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Demin. Wasser		BLfD
Digitaler Messschieber, Digi-Met	Preisser	Bestand BLfD
Digitale Präzisionswaage, Kern PCB, Max 250 g, d=0,001 g	Kern	Bestand BLfD
Ethanol, Rotipurant ≥ 99,8 %, p.a., vergällt	Roth	Bestand BLfD
Glasläufer		Bestand BLfD
Glasreibplatte		Künstlerbedarf Schachinger
Grundierpinsel, Art School, Gr. 40	Rico-Design	Idee. Creativmarkt
Grünspan (synthetisch), Nr. 44450	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Hasenleim in Würfeln (aus Hasenfellen), Nr. 63025	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Keramikschaale		Bestand BLfD
Keramikschaale mit Mörser		Bestand BLfD
Leinöl (sonneneingedickt), natur kaltgeschlagen, Nr. 73056		Kremer-Pigmente
Leinöl Firnis (Mangan sikkativiert, kobaltfrei), Nr. 73100	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Pinsel (diverse Synthetik)		Bestand BLfD
Rindshaar-Ölmalpinsel, flach, Gr. 20	Kremer-Pigmente	Kremer-Pigmente
Sangajol (White Spirit), Nr. 70480	Kremer-Pigmente	Bestand BLfD
Spatel (diverse)		Bestand BLfD
Spritzen (diverse)		Bestand BLfD
Weithalsflaschen (verschiedene Größen)	Deffner & Johann	Bestand BLfD

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Bericht HTB-010/2024

Hygrothermische Simulation des Tafelgemäldes in Freising in Hinblick auf die Vorgehensweise zur Auffeuchtung

Durchgeführt im Auftrag des
Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München

Der Bericht umfasst
25 Seiten Text
4 Tabellen
11 Bilder

*Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet*

Dr. Kristina Holl
Dr. Stefan Bichlmair

Valley, 11. Juni 2024

Gruppenleiter

**Stefan
Bichlmair** Digital
unterschrieben von
Stefan Bichlmair
Datum: 2024.06.11
11:38:12 +02'00'

Dr.-Ing.
Stefan Bichlmair

Bearbeiterin

Kristina Holl Digital unterschrieben
von Kristina Holl
Datum: 2024.06.11
11:13:05 +02'00'

Dr. phil. Dipl. Rest.
Kristina Holl

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-00
Telefax +49 711 970-3395
www.ibp.fraunhofer.de

Standort Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-0
Telefax +49 8024 643-366

Inhalt

1	Hintergrund	3
2	Bestimmung der Materialkenndaten	4
2.1	Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783	4
2.2	Sorptionsisotherme	6
3	Raumklima in der Sakristei und seine Auswirkung	7
4	Hygrothermische Simulation zur Untersuchung von Temperatur- und Feuchteverläufen in Materialverbänden von Kunstwerken	11
4.1	Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Sakristei auf das Tafelgemälde	11
4.2	Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Einhausung auf das Tafelgemälde	15
4.3	Simulation der Klimaschrankversuche	15
4.4	Simulation der passiven Auffeuchtung	17
5	Ergebnisse	18
6	Zusammenfassung und Ausblick	19
A.1	Ergebnisse Materialkenndaten	25

1 Hintergrund

Das großformatige Tafelgemälde zur Passion Christi von Hans Mair aus dem 15. Jh. befindet sich in der unteren Domsakristei des Doms St. Maria und St. Korbilian in Freising. Es zählt zu den qualitativvollsten gemalten Ensembles der Spätgotik in Altbayern.

Aufgrund von ungünstigen Klimabedingungen durch konstant zu geringe Werte der relativen Feuchte wurde das Freisinger Tafelgemälde (3,0 m x 2,8 m) stark geschädigt. Der Holz-Bildträger hat sich durch den Volumenschwund stark verformt, so dass die Bildschicht an einigen Stellen dachziegelförmig aufsteht (Bild 1). Um konservatorische Maßnahmen ergreifen zu können und um weitere Verluste zu verhindern, soll das Tafelbild im Rahmen eines DBU-Forschungsprojektes (AZ 37502/01) kontrolliert an seine geometrischen Ursprungsmaße angenähert werden. Dazu wird der Holzträger über eine systematische Klimatisierung konditioniert und befeuchtet, um sich langsam wieder über hygri-sche Quellung auszudehnen. Die dabei entstehenden Bewegungen und Veränderungen am Holz und an der Malschicht müssen vorab abgeschätzt werden, damit eine weitere Schädigung verhindert werden kann. Dies soll mit Hilfe der hygrothermischen Simulation erfolgen.

Durch die hygrothermische Simulation sollen die im Tafelgemälde in unterschiedlicher Schichttiefe vorliegenden Temperatur- und Feuchteschwankungen abgeschätzt werden, die derzeit aufgrund des anliegenden Raumklimas vorliegen. Dazu müssen Materialkenn-daten ermittelt werden (siehe Kapitel 2). Das Raumklima, in dem sich das Kunstwerk seit geraumer Zeit befand, ist Grundlage für die Ermittlung des Verhaltens bei sich ändernden klimatischen Verhältnissen. Daher erfolgt für die Einschätzung der klimatischen Situation eine Analyse der gemessenen Raumklimadaten (siehe Punkt 3).

Der Bericht bezieht sich auf die Fragestellung des DBU-Projektes AZ 37502/01 »Entwicklung und modellhafte Anwendung einer ‚in situ‘ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes«.



Bild 1:
Tafelbild Domsakristei Freising, Gesamtansicht 2020 © Diözesanmuseum Freising, Foto: Walter Bayer (2020).

2 Bestimmung der Materialkennndaten

Um das hygrothermische Verhalten des Tafelgemäldes zu simulieren, wird im ersten Schritt auf bereits bestehende Materialkennndaten zu historischen Tafelgemälden zurückgegriffen. Um jedoch die Simulation am konkreten Fallbeispiel durchführen zu können, ist es erforderlich, die Materialkennndaten (Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsisotherme etc.) des komplexen Bildschichtaufbaus des Tafelgemäldes labortechnisch zu bestimmen.

2.1 Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Proben erfolgte nach DIN EN ISO 7783 [1] durch das Feucht- und Trockenbereichsverfahren, auch als „wet - cup“ bzw. „dry - cup“-Verfahren bezeichnet. Als Prüfumgebung wurde in den Laboren des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik eine Klimakammer mit einem konstanten Klima von 50 % r.F. und einer Temperatur von 23 °C verwendet. Bei diesem Verfahren wird der flächige Prüfkörper des Probenmaterials auf den Rand eines Prüfgefäßes gesetzt und mit diesem dampfdicht verbunden. Im Inneren des Gefäßes befindet sich beim Feuchtbereichsverfahren eine gesättigte Salzlösung, beim Trockenbereichsverfahren Silicagel. Beide Mittel sorgen

für eine definierte und konstante relative Luftfeuchte: Ammoniumdihydrogenphosphat erzeugt im Gefäß für die Wet-cup Messung eine relative Luftfeuchte von 93 % und bei der dry-cup Messung eine relative Luftfeuchte von 3 % r.F.. Aufgrund des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen Gefäßinnerem und Klimakammer diffundiert Wasserdampf durch die Probe. Nach einiger Zeit stellt sich ein konstanter Diffusionsstrom ein, der eine konstante Gewichtsab- (wet-cup) bzw. -zunahme (dry-cup) des Messgefäßes pro Zeiteinheit zur Folge hat. Diese entspricht dem Diffusionsstrom. Die Formeln zur Umrechnung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte in den Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizienten, aus welchem sich über die Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten schließlich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl errechnet, sind in DIN EN ISO 12572 [2] beschrieben. Daraus lässt sich die äquivalente Luftschichtdicke s_d bestimmen. Der Wert entspricht der Dicke einer ruhenden Luftschicht mit dem gleichen Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand wie der des Probekörpers.

Zur Ermittlung der Materialkenndaten des Tafelgemäldes entnahm das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege (BlfD) Materialproben am Holztafelgemälde für die am häufigsten verwendeten Farb- und Bindemittel. Basierend auf den Ergebnissen wurden drei verschiedene Aufstriche auf Glasfritten (Trägerplatte) erstellt. Die Fritten wurden am 12. Juni 2023 mit entsprechender Dokumentation des Schichtenauftrags und des Gewichts dem Institut übergeben. Analysiert wurde der Aufbau der Bildschicht (»Aufbau Vorderseite VS«). Die originale Malschicht wurde mit ölhaltigem Bindemittel angefertigt. Darauf befinden sich noch zwei Firnissschichten. Da die Trocknungszeit von Ölmalerei sehr lange ist, wurde der Firnis auf separate Glasfritten aufgetragen (»Aufbau Firnis SD«). Auf der holzsichtigen Rückseite des Tafelgemäldes befindet sich ein Leinölfirnis. Dieser wurde ebenfalls auf separate Glasfritten aufgestrichen (»Aufbau Rückseite RS«).

Die Proben wurden in den Laboren des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Holzkirchen vermessen, um nach DIN EN ISO 7783 [2] die Wasserdampfdurchlässigkeit zu bestimmen. Die Ergebnisse der Messungen finden sich in Tabelle 1. Die dazugehörigen Messprotokolle finden sich im Anhang.

Tabelle 1:
 Auflistung der in der Sammlung befindlichen Materialien und Materialkombinationen und Anforderungen an das Raumklima nach unterschiedlichen Literaturangaben.

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_A1 F562_A2 F562_A3	»Aufbau Vorderseite VS«	23 °C 0 – 50 % r.F.	1,15 1,09 1,18	1,14
F562_A4 F562_A5 F562_A6		23 °C 50 – 93 % r.F.	0,69 0,65 0,62	
F562_B1 F562_B2 F562_B3	»Aufbau Rückseite RS«	23 °C 0 – 50 % r.F.	0,29 0,25 0,26	0,27
F562_B4 F562_B5 F562_B6		23 °C 50 – 93 % r.F.	0,11 0,06 0,19	
F562_C1 F562_C2 F562_C3	»Aufbau Firnis SD«	23 °C 0 – 50 % r.F.	1,99 1,99 1,88	1,95
F562_C1 F562_C2 F562_C3		23 °C 50 – 93 % r.F.	0,57 0,56 0,53	

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe (Glasfritte)

2.2 Sorptionsisotherme

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt, welcher Wassergehalt sich bei vorgegebener relativer Luftfeuchte in einem Material einstellt. Die Bestimmung der Sorptionsisotherme ist für Baustoffe mit einem messtechnisch unkomplizierten Verfahren möglich und in DIN EN ISO 12571 [3] als Klimakammerverfahren genormt. Hier wird die Probe bei konstantem Klima bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte (Massenkonstanz) gelagert. Diese wird durch periodisches Wiegen ermittelt. Hat sich die Ausgleichsfeuchte eingestellt, wird die Probe schrittweise in der jeweiligen Klimakammer bei höheren Luftfeuchten umgelagert. Aus den einzelnen Werten wird die Adsorptionsisotherme ermittelt. Der umgekehrte Vorgang senkt die relative Luftfeuchte schrittweise. Daraus ergibt sich die Desorptionsisotherme. Beim Vergleich beider Kurven wird ein Hysterese-Effekt erkennbar, die Desorption erfolgt im Vergleich zur Adsorption verzögert. Die Adsorptions- und Desorptionskurven der im Kunstwerk vorhandenen Materialien werden durch die Messung der Ausgleichsfeuchte bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bestimmt. Für die in der Norm DIN EN ISO 12571 [3] beschriebene Vorgehensweise werden drei Proben zu mindestens zehn Gramm benötigt. Dies ist für die Ermittlung der Kennwerte mit geringen Schichtstärken nicht realistisch. Daher wurden die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten mittels

dynamischer Wasserdampfsorption (DVS = dynamic vapour sorption) ermittelt. Hier wird für die Gewichtsbestimmung eine Mikrowaage verwendet, so dass wenige Gramm einer Probe ausreichen. Für die Messung an der MPA in Stuttgart wurde nach Abschluss der Messungen zur Ermittlung des s_d -Werts von den Aufstrichen der Vorderseite (Grundierung und Malschicht) Material entnommen. Die Ergebnisse für die Vorderseite sind in Bild 2 dargestellt.

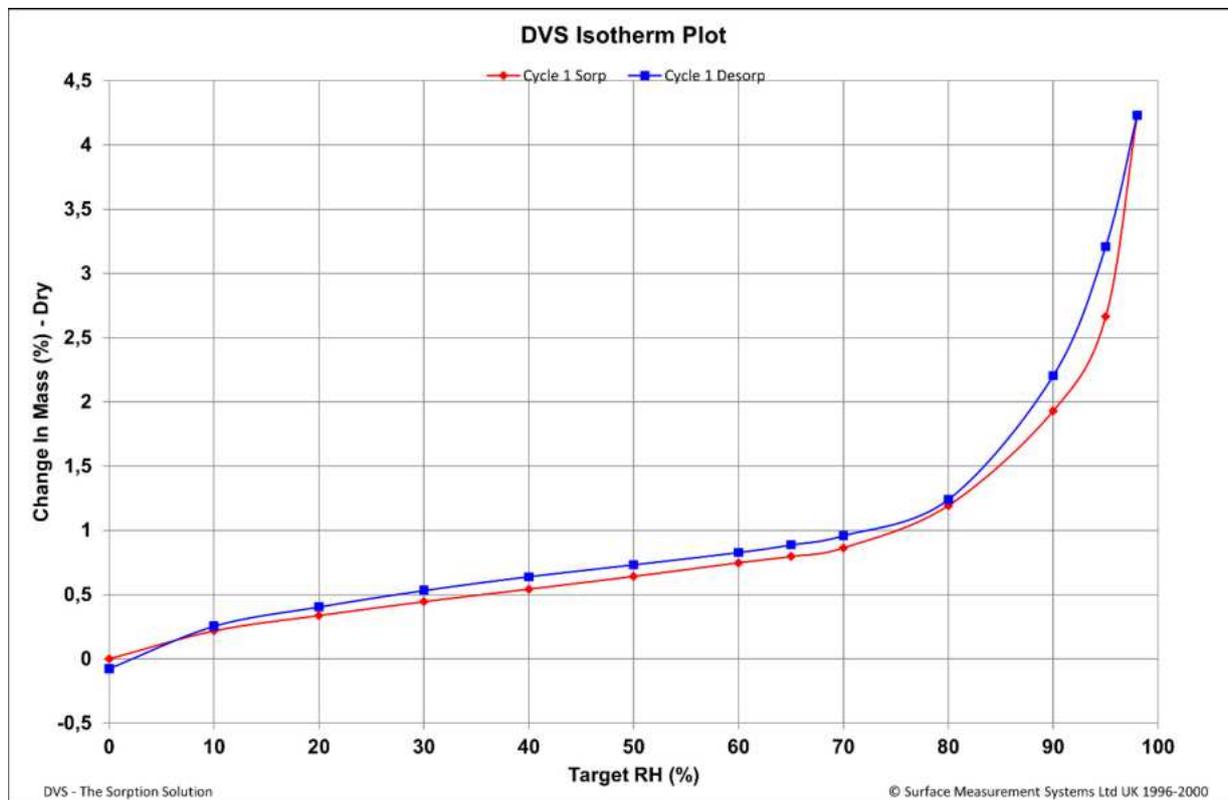


Bild 2:
Sorptionsisotherme der Bildschicht gemessen mit DVS, Grafik: MPA Stuttgart.

3 Raumklima in der Sakristei und seine Auswirkung

Das Raumklima in der Sakristei wurde durch das BIfD seit Mai 2020 gemessen. Zur Beurteilung des Raumklimas wurden u.a. Datenlogger (Temperatur und relative Feuchte) an der Vorder- und Rückseite installiert. Für die Untersuchung der Schadensphänomene, die sich aufgrund der Situation in der Sakristei ergeben, wird der Zeitraum vor dem Bau der Einhausung verwendet. Bild 4 zeigt die Temperatur und Feuchte vor und hinter dem Tafelgemälde von Januar 2021 bis Juli 2022.

Den größten Einfluss auf die Erhaltung des Tafelgemäldes hat die Nutzung der Sakristei. Im Winter wird der Raum nutzungsbedingt beheizt. Dies bewirkt eine starke Reduzierung der relativen Feuchte. 2021 wurde das Raumklima der Sakristei mit einem mobilen Befeuchter stabilisiert. Ohne zusätzliche Befeuchtung sinkt die relative Feuchte bis unter 40 % r.F. ab. Dies zeigt sich im Winter 2022. In diesem Zeitraum hat keine zusätzliche Luftbefeuchtung stattgefunden

(Bild 3). Daraus resultierte eine geringe relative Feuchte mit Minimalwerten von 34,4 % r.F. am 13. März. In diesem Zeitraum wurden die größten Bewegungen (Schrumpfung) im Tafelgemälde festgestellt. Im Gegensatz dazu steigt im Sommer die relative Feuchte auf maximal rund 77 % r.F. (Vorderseite: 76,9 % r.F., Rückseite: 77,4 % r.F.). Im Mittelwert (Gesamter Messzeitraum Januar 2021 bis Juli 2022) liegt die relative Feuchte bei ca. 62 % r.F. (Vorderseite: 61,1 % r.F., Rückseite: 62,3 % r.F, siehe Tabelle 2).

Die Fenster der Sakristei werden im Jahresverlauf regelmäßig nach Bedarf durch die Mesner geöffnet. Dies erzeugt Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte und wirkt sich auf die Erhaltung des Tafelgemäldes aus. Ab April 2022 ist die Einhausung des Tafelgemäldes fertig gestellt (4.4.2022, in Bild 3 markiert mit der gestichelten grauen Linie). Dies zeigt sich in den Messdaten unmittelbar anhand der deutlichen Reduzierung der Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte.

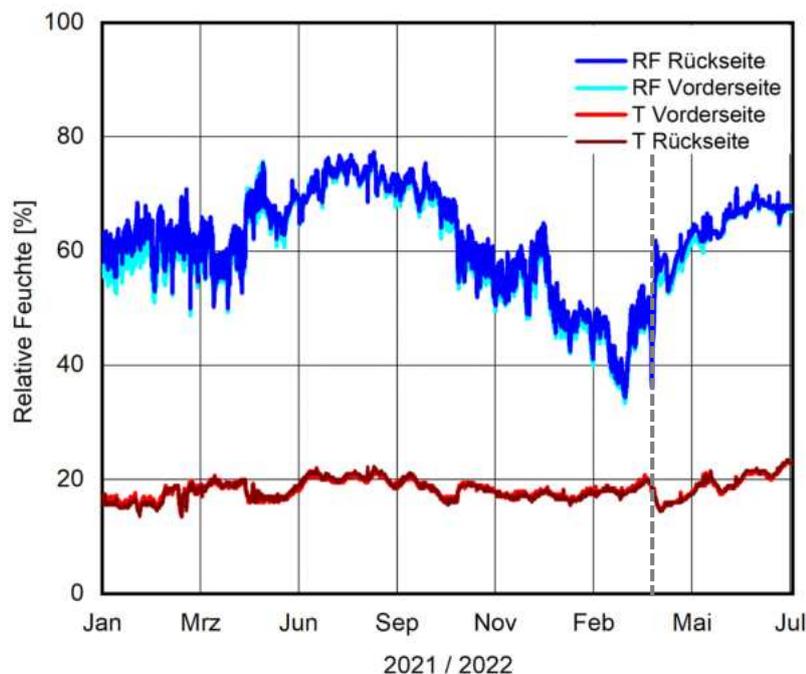


Bild 3:

Grafische Darstellung von Temperatur und relative Feuchte, gemessen vor und hinter dem Tafelgemälde für den Zeitraum vom 1.1.2021 bis 31.7.2022. Die Fertigstellung der Einhausung am 4.4.2022 führt zu einer sofortigen Stabilisierung des Klimas (gestrichelte Linie). Die relative Feuchte liegt zwischen 34,4 % r.F. und 77,4 % r.F. Im Winter 2021 wurde zur Stabilisierung des Raumklimas ein Befeuchter eingesetzt, im Winter 2022 nicht. Dies führt zu kritischen Werten unter 40 % r.F. im Zeitraum Ende Februar bis März 2022.

Zwischen der Vorder- und Rückseite sind insbesondere in der relativen Feuchte zeitweise Unterschiede festzustellen. Vor allem im Zeitraum vom

16.- 23.2.2021 treten hier immer wieder Abweichungen der relativen Feuchte von über 5 % r.F. auf, vgl. Bild 4. Am 15.3.2021 liegt eine maximale Differenz von 8,5 % r.F. vor (siehe auch Tabelle 2). Dies begründet sich mit der Position des Tafelgemäldes in der Sakristei auf einem Podest nahe einer Außenwand. Die Beheizung des Raumes erfolgt durch Radiatoren, die u.a. nahe am Schreibtisch aufgestellt sind. Dieser ist neben dem Tafelgemälde platziert und kann das Mikroklima an der Vorderseite beeinflussen. Tendenziell ist die Vorderseite einer geringeren relativen Feuchte ausgesetzt als die Rückseite des Tafelgemäldes.

In Tabelle 2 ist die statistische Auswertung der Messdaten dargelegt. Hier muss allerdings die Messgenauigkeit der Datenlogger berücksichtigt werden. Verwendet wurden hier Temperatur und Feuchtesensoren der Fa. Easylog. Der Hersteller gibt eine Genauigkeit für Temperatur von $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ und relative Feuchte von $\pm 2 \text{ } \%$ r.F. an (<https://www.automation24.de/usb-temperatur-und-feuchte-datenlogger-lascar-easylog-el-sie-2>, Stand 13.5.2024). Die Minimal- und Maximalwerte der Messwerte weichen teilweise nur um 1 % r.F. voneinander ab und liegen innerhalb der Messungenauigkeit. Die Messung erfolgte in einem Intervall von 10 Minuten.

In Bild 5 ist der Temperatur- und Feuchteverlauf zum Vergleich mit dem durch die Einhausung erzeugten Raumklima im Zeitraum 1.1. – 31.12. 2023 abgebildet. Die statistische Auswertung ist in Tabelle 3 aufgeführt.

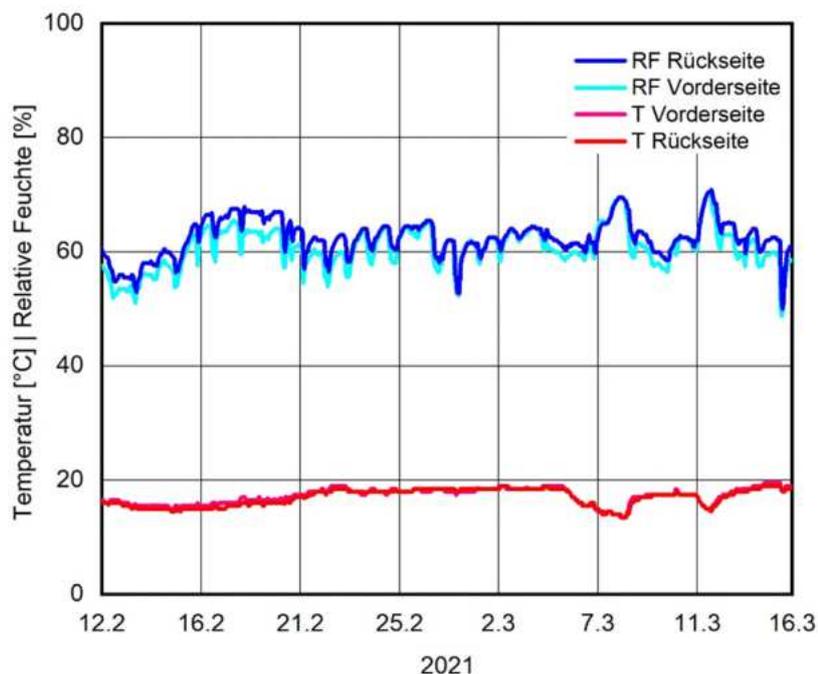


Bild 4: Detaildarstellung von Temperatur und relativer Feuchte an der Vorder- und

Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum von 12.2. bis 16.3.2021. Insbesondere in der relativen Feuchte ist ein Gradient zwischen Vorder- und Rückseite erkennbar teilweise bis zu 5 % r.F. sichtbar.

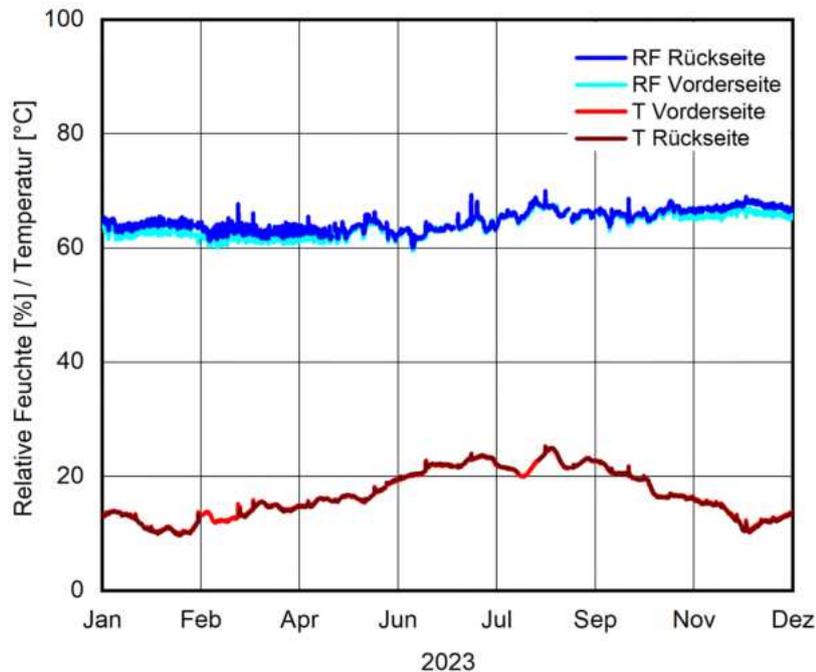


Bild 5: Grafische Darstellung von Temperatur und relative Feuchte, gemessen vor und hinter dem Tafelgemälde für den Zeitraum vom 1.1. – 31.12.2023.

Tabelle 2: Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum vom 1.1.2021 bis 31.07.2022.

Position	Anzahl	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ
Vorderseite T [°C]	13844	13,5	18,4	23,0	9,5
Rückseite T [°C]	13844	13,5	18,4	23,5	10
Vorderseite RH [% r.F.]	13844	33,4	61,1	76,9	43,5
Rückseite RH [% r.F.]	13844	34,4	62,3	77,4	43
Unterschied RH Vorderseite / Rückseite [% r.F.]	8758	0	1,3	8,5	-

Tabelle 3:
 Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum vom 1.1. bis 31.12.2023.

Position	Anzahl	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ
Vorderseite T [°C]	10049	9,0	16,2	25,3	16,3
Rückseite T [°C]	9317	8,9	16,2	25,4	16,5
Vorderseite RH [% r.F.]	10049	60,0	64,8	72,3	9,8
Rückseite RH [%r.F.]	8570	59,5	64,8	70,5	9,8
Unterschied RH Vorderseite / Rückseite	-	0,5	0	1,8	-

4 Hygrothermische Simulation zur Untersuchung von Temperatur- und Feuchteverläufen in Materialverbänden von Kunstwerken

Herr Prof. Dr. Künzel entwickelte, basierend auf den physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports zur Ermittlung des Feuchteverhaltens von mehrschichtigen Bauteilaufbauten unter natürlichen Klimarandbedingungen ein geschlossenes Differenzialgleichungssystem [4]. Dieses wurde im Softwareprogramm WUFI® numerisch umgesetzt, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt und mit Hilfe der Freilandversuchsstelle Holzkirchen experimentell verifiziert.

Die Prozesse, die in einem Kunstwerk ablaufen, sind mit denen eines Bauteils vergleichbar. In beiden Fällen handelt es sich um poröse Materialien mit spezifischen Eigenschaften sowie vergleichbaren Transportprozessen von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Daher ist es naheliegend, die bestehenden hygrothermischen Simulationsprogramme auch auf Kunstwerke anzuwenden [5]. Diese Methode ermöglicht, die Auswirkung von kurzfristigen Schwankungen auf unterschiedliche Materialverbände in differenzierter Weise zu untersuchen.

Die hygrothermische Simulation des Tafelgemäldes wurde in unterschiedlichen Variantenberechnungen durchgeführt. Zunächst wurde die Reaktion des Tafelgemäldes auf das in der Sakristei vorliegende Klima untersucht (4.1) und anschließend das in der Einhausung gemessene Klima zur Beurteilung der neuen klimatischen Situation eingesetzt (4.2). Begleitend zu den Klimaschrankversuchen, die an der Universität Bamberg mit Probepplatten durchgeführt wurden, erfolgte die Simulation der Szenarien (4.3). Hierfür werden die gemessenen Raumklimadaten, vor und während dem Zeitraum der Einhausung eingesetzt.

4.1 Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Sakristei auf das Tafelgemälde

Um die Temperatur- und Feuchteverläufe aufgrund des Raumklimas in den einzelnen Schichten des Kunstwerks zu untersuchen, eignet sich WUFI® Pro. Es berechnet anhand des eindimensionalen Querschnitts eines Bauteils die

Veränderung von thermischen und hygrischen Bedingungen über den zeitlichen Verlauf.

In der Querschnittsansicht ist der Schichtenaufbau von links nach rechts (außen nach innen) sichtbar: Leinölfirnis, Holz, Bildschicht (Grundierung und Mal-schicht), Firnis (Schellack, Dammar). Um die Temperatur- und Feuchteverteilung innerhalb der einzelnen Schichten zu ermitteln, können in den einzelnen Lagen »Monitorpositionen« gesetzt werden. Die so markierten Stellen werden bei der hygrothermischen Berechnung berücksichtigt und können gesondert ausgegeben werden (Bild 6). Dies ermöglicht die Beurteilung der Temperatur und relativen Feuchte sowohl an der Oberfläche als auch in den Bauteil- bzw. Malschichten. Dies ist messtechnisch, insbesondere bei sehr dünnen Schichten nur schwer umzusetzen. Insbesondere für die Untersuchung der Variationsbreite der Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte im Verbund sind diese Informationen aufschlussreich – etwa zur Beurteilung des Schadensrisikos oder auch der Effizienz einer durchgeführten Maßnahme. Einige weitere Einstellungen, wie die Ausgangsbedingungen, Klimaparameter, Übergangs- und Randbedingungen, sind vor Beginn der Simulationsrechnung festzulegen.

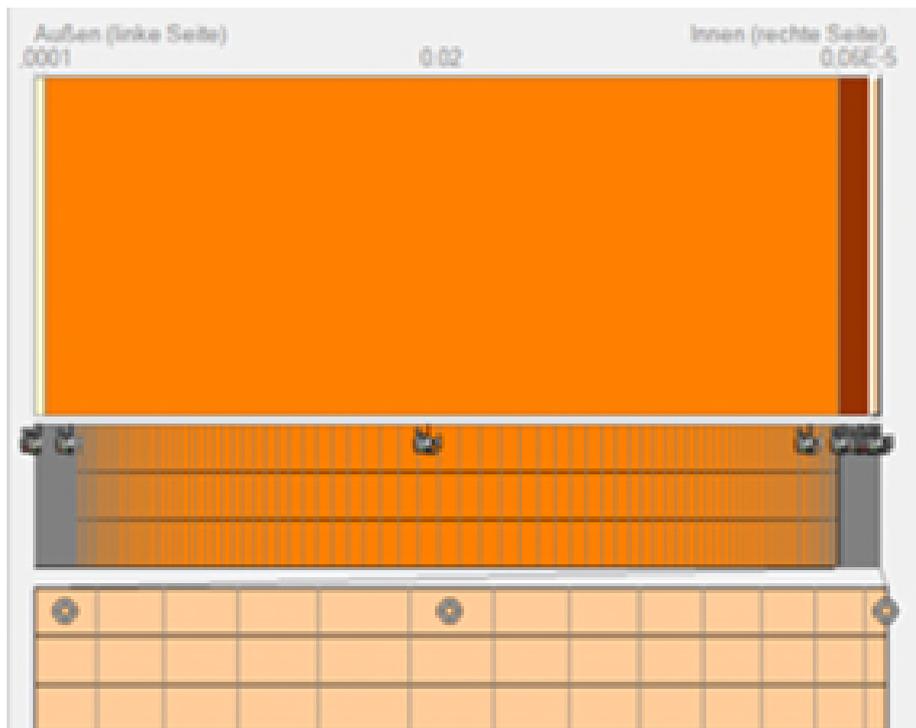


Bild 6:
Bildschirmaufnahme aus dem Simulationsprogramm WUFI® Pro zeigt den Querschnitt des Holztafelgemäldes unter Berücksichtigung der gemessenen Materialproben (Überzug, Bildschicht, Firnis). Aufbau von links nach rechts: Leinölfirnis (0,1 mm) | Fichtenholz longitudinal (20 mm) | Mal- und Fassungsschicht (0,6 mm) | Firnis (0,06 mm). Die Videokamera kennzeichnet eine »Monitorposition«, an der die Temperatur- und Feuchtwerte berechnet werden. (Grafik: Fraunhofer IBP).

Für eine genauere Berechnung der Feuchteverläufe im Gefüge wird im ersten Rechendurchgang eine für die jeweiligen Materialien typische Ausgleichsfeuchte angenommen. Anschließend wird der Wassergehalt für das gesamte Gefüge ausgegeben, dieser als neue Startbedingung in die Simulation eingegeben und nochmals berechnet. Das Ergebnis der Temperatur- und Feuchteverläufe ist entweder über die grafische Darstellung des Programmes sichtbar oder kann als Textdatei ausgegeben werden.

Um die Auswirkungen des bestehenden Raumklimas in der Sakristei auf das Tafelgemälde zu untersuchen, wurden die dort gemessenen Klimadaten als Eingabedaten für das Modell verwendet. Bild 7 und Bild 8 zeigen die berechneten Feuchteverläufe innerhalb des Materialverbunds an sechs Positionen:

- Firnis – pink
- Malschicht (inklusive Grundierung) – lila
- Fichte innen am Übergang zur Bildschicht – violett
- Fichte in der Mitte des Holzträgers – hellblau
- Fichte aussen, am Übergang zum Leinölfirnis – blau
- Leinölfirnis (Holzüberzug) – dunkelblau

Bild 7 bildet die Reaktion des Materialverbunds über den gesamten Zeitraum hinsichtlich der relativen Feuchte ab. Die Temperatur ist in allen Schichten gleich und ist deshalb nicht mit dargestellt. Die relative Feuchte zeigt innerhalb der einzelnen Schichten nur geringe Abweichungen auf. Zwischen Leinölfirnis und Firnis der Bildvorderseite liegt im Mittel ein Gradient von 1,7 % r.F. vor (Maximum: 10,0 % r.F. am 1. April 2022:). In Bild 8 ist exemplarisch der Zeitraum von einem Monat zeitlich höher aufgelöst dargestellt (1.12-31.1.2022). Die kurzfristigen Schwankungen des Raumklimas zeigen sich klar erkennbar auch in der Malschicht. Insgesamt stellen sich jedoch nur geringe Schwankungen der relativen Feuchte in der Malschicht ein.

Die geringen Gradienten innerhalb des Materialverbunds deuten darauf hin, dass insbesondere die lang anhaltenden Trockenzeiten unterhalb von 60 % r.F. verantwortlich für die Schäden am Objekt sind. Von Mitte Oktober bis Mitte April liegen die Werte mit einer kurzen Ausnahme unter 60 % r.F. Wie sich das stabile Raumklima auf das Tafelgemälde auswirkt ist in 4.2. beschrieben.

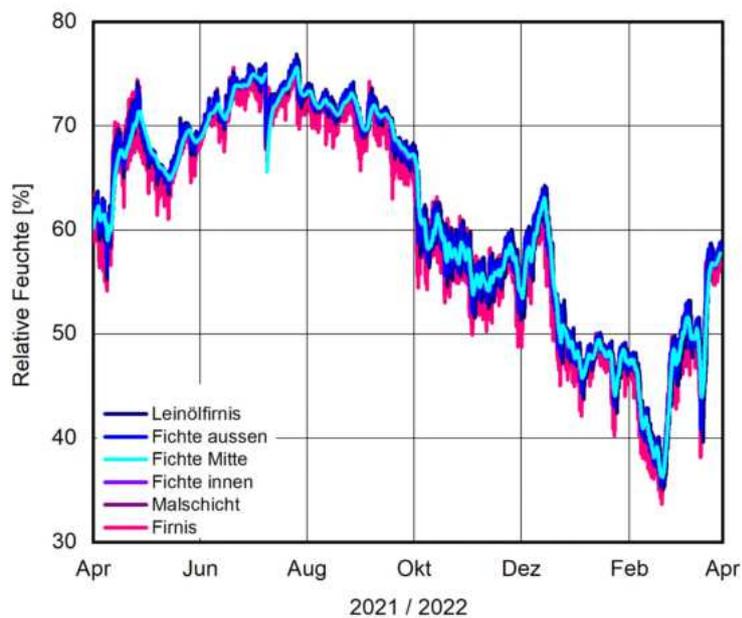


Bild 7:
Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Sakristei vorliegende Raumklima vom 15.4. 2021 – 14.4. 2022.

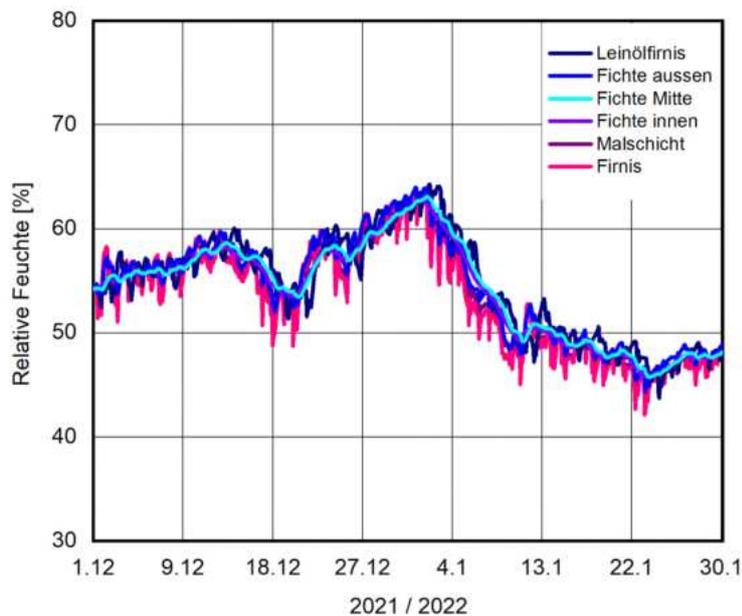


Bild 8:
Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Sakristei vorliegende Raumklima vom 1.12. 2021 – 31.1.2022.

4.2 Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Einhausung auf das Tafelgemälde

Für die Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Einhausung auf das Tafelgemälde wurden die bisher beschriebenen Eingabedaten beibehalten und lediglich andere Klimadaten verwendet. Für die Untersuchung werden Messdaten der Vorder- und Rückseite aus dem Jahr 2023 mit Einhausung verwendet (Bild 5). Die Ergebnisse sind in Bild 9 zu sehen. Wie bereits bei der Simulation ohne Einhausung mit Raumklima der Sakristei (Bild 6), liegen auch mit Einhausung innerhalb des Materialverbunds zu vernachlässigende Schwankungen der Temperatur, sowie geringe Schwankungen der relativen Feuchte vor (Bild 9). Zwischen Leinölfirnis und Firnis der Bildvorderseite liegt hier im Mittel ein Gradient von 1,9 % r.F. vor, wobei die maximalen Werte nur bei 3,8 % r.F. sind. Die Werte liegen in der Holzschicht im Mittel bei 65,9 % r.F.

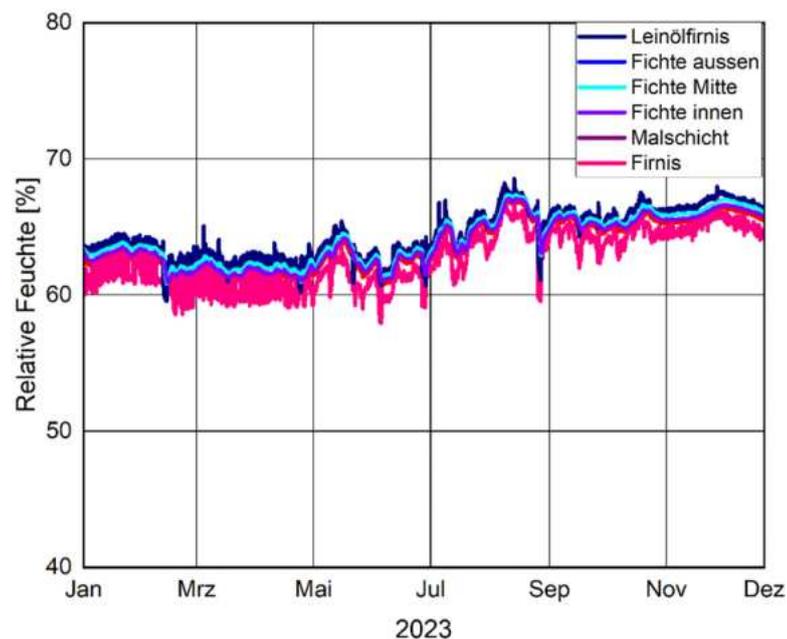


Bild 9:
Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Einhausung vorliegende Raumklima vom 1.1.– 1.12.2023.

4.3 Simulation der Klimaschrankversuche

Für die Klimaschrankversuche wurde, basierend auf den gemessenen Klimadaten bei konstanter Temperatur eine maximale Feuchteänderung produziert, wie sie in der Realität stattgefunden hat. Während die reale Feuchteänderung über

einen Zeitraum von mehreren Wochen abgelaufen ist, wurde diese hier auf den Zeitraum von 18 Tagen angesetzt.

Ziel der Tests im Klimaschrank ist es, anhand der Prüfkörper die Reaktion des Materialverbunds eines Holztafelgemäldes bei einem Feuchtesprung von 80 % r.F. auf 34 % r.F. zu untersuchen. Dieser ist angelehnt an die Klimadaten, die in der Sakristei zwischen 2021 und 2022 gemessen wurden und mittels 3D-Scanning die größte Bewegung verzeichnet wurde (siehe Klimadatenauswertung, Abschnitt 3.1). Mit Hilfe der hygrothermischen Simulation wird aufgezeigt, wann die größten Bewegungen und damit das höchste Schadensrisiko auftritt. Um lediglich den Einfluss der Feuchtigkeit zu untersuchen, erfolgte dieser Versuch bei einer konstanten Temperatur von 19 °C.

Bild 10 zeigt die Reaktion in den einzelnen Schichten auf die Feuchteänderung von 80 % auf 34 % r.F. Hier wird die unterschiedliche Reaktion der einzelnen Schichten auf die neuen klimatischen Bedingungen sichtbar. Die beiden äußeren Schichten reagieren unmittelbar auf die Änderung der relativen Feuchte. Da aufgrund des Diffusionswiderstandes der Malschicht aus den unteren Schichten weniger Feuchte nachtransportiert wird, sinkt die relative Feuchte im Firnis auf der Malschicht schneller ab als im Leinölfirnis (Rückseite des Tafelgemäldes). Der an der Malschicht angrenzende Teil des Holzes (»Fichte innen«) und Holztafelmitte (»Fichte Mitte«) zeigen die stärkste Pufferung, d.h. langsamste Anpassung an den Feuchtesprung im Materialverbund. Innerhalb eines Tages sinkt die relative Feuchte dort nur um rund 20 % r.F. ab. Dadurch treten insbesondere innerhalb des Trägers Feuchtedifferenzen von über 25 % r.F. auf. Ein Angleichen der Feuchteverhältnisse ist nach ca. 6 Tagen erreicht. Diese Beobachtung entspricht den Auswertungen der Streifenlichtscans (vgl. [6] 4. Zwischenbericht), bei denen in den ersten fünf Tagen die größte Verformung stattfindet.

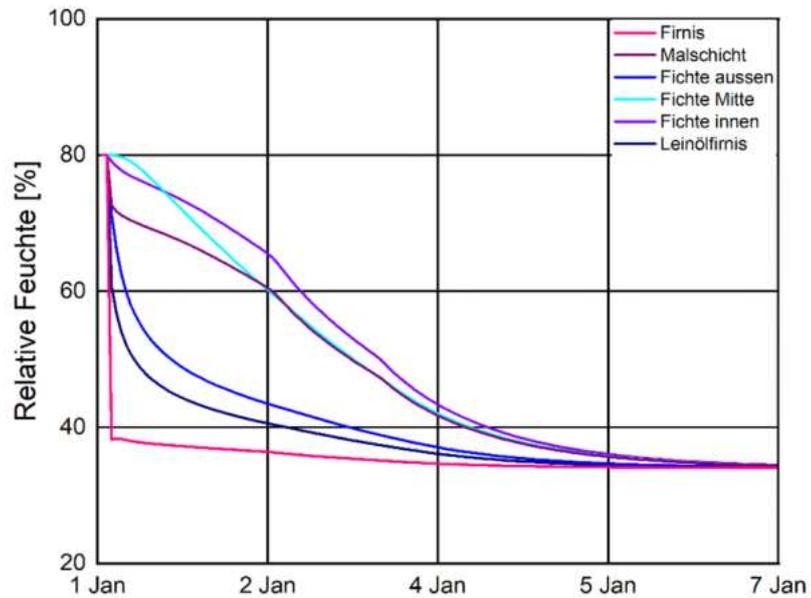


Bild 10:
 Feuchteverteilung im Materialverbund des Tafelgemäldes beim Klimaschrankversuch bei einem Feuchtesprung von 80 % r.F. auf 34 % r.F. (bei konstanter Temperatur von 19 °C).

4.4 Simulation der passiven Auffeuchtung

Im Rahmen der Überlegungen zur künftigen Konservierung des Tafelgemäldes am originalen Standort mit passiven Methoden wurde an der TU München eine Masterarbeit durchgeführt [7]. Hier wurden unterschiedliche Systeme (Lehmwand, Textil und konditionierte Salze) die an der Rückseite von Dummykunstwerken angebracht wurden miteinander verglichen. Dieses Szenario wird mit Hilfe der hygrothermischen Simulation untersucht. Hierzu wird an der Rückseite des Schichtenaufbaus eine konstante relative Feuchte von 65 % r.F. angelegt und an der Vorderseite die 2021 in der Sakristei gemessenen Klimadaten eingesetzt. Bild 11 zeigt hierzu die Ergebnisse. Es wird deutlich, dass einerseits das Feuchteniveau im Materialverbund weniger stark absinkt. Gleichzeitig ist aber der Gradient innerhalb des Materialverbunds hoch, da insbesondere die Bildschicht auf das Innenraumklima reagiert. Um dies zu vermeiden müsste entweder das Tafelgemälde verglast werden oder das Innenraumklima zusätzlich konditioniert werden.

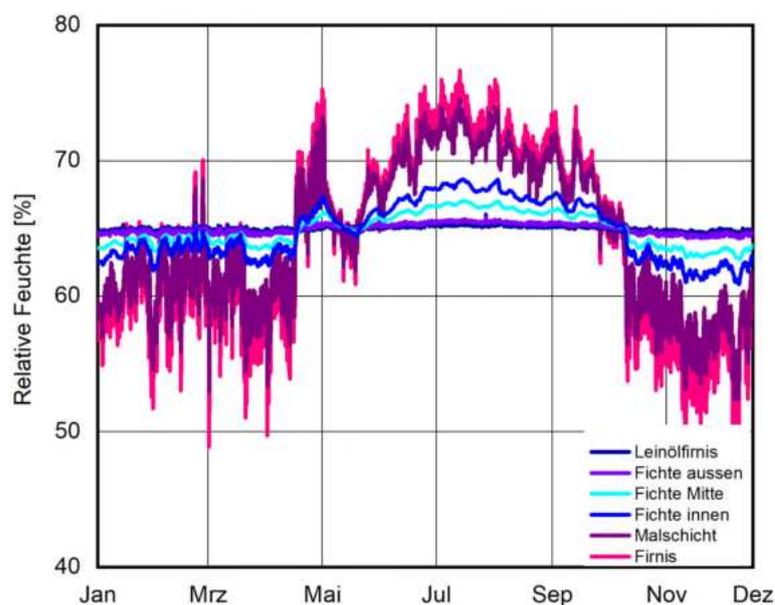


Bild 11:
 Feuchteverteilung im Materialverbund des Tafelgemäldes mit gemessenem Raumklima in der Sakristei an der Vorderseite und konstanter relativer Feuchte von 65 % auf der Rückseite, Zeitraum vom 15.1 – 31.12.2021.

5 Ergebnisse

Aus der Klimaanalyse zeigt sich bereits deutlich der klimastabilisierende Effekt, den die Einhausung mit sich bringt. Inwieweit sich das stabile Raumklima im Vergleich zum bisher in der Sakristei vorliegenden Klima auf das Tafelgemälde auswirkt, kann mit der hygrothermischen Simulation gezeigt werden. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, war die Ermittlung der Materialkennndaten des Tafelgemäldes notwendig.

Für den Vergleich der in 4.1 (Raumklima Sakristei) und 4.2 (Raumklima Einhausung) beschriebenen Simulationen wurde an den einzelnen Positionen des simulierten Malschichtaufbaus eine statistische Auswertung der relativen Feuchte vorgenommen, vgl. Tabelle 4. Hieraus wird ersichtlich, dass bei konstanter relativer Feuchte, wie sie in der Einhausung vorlag, innerhalb einer Schicht Unterschiede der relativen Feuchte zwischen und 7,8 % r.F. (Malschicht) und 12 % r.F. (Firnis) vorliegen können. Im Vergleich dazu liegt der Gradient der relativen Feuchte mit dem in der Sakristei gemessenen Raumklima zwischen 39,2 % r.F. (Holz Mitte) und 42,5 % r.F. (Firnis). Innerhalb des Materialverbunds liegt ein maximaler Gradient von 3,8 % r.F. (Einhausung) bzw. 10 % r.F. (Sakristei) vor. Das stabile Raumklima führt dazu, dass im Tafelgemälde geringere Adsorptions- und Desorptionsvorgänge ablaufen. Dadurch entstehen geringere Spannungen, die sich durch die unterschiedliche Reaktion der einzelnen

Schichten ergeben können, deutlich. Dies trägt maßgeblich zur langfristigen Erhaltung bei.

Tabelle 4:

Statistische Auswertung der relativen Feuchte in den simulierten Positionen für die Szenarien Sakristei und Einhausung.

Position	Simulation Raumklima Sakristei				Simulation Raumklima Einhausung			
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ
Leinölfirnis	35,0	61,5	76,9	41,9	59,5	64,5	68,6	9,1
Fichte außen	35,4	61,5	76,4	41,0	59,8	64,5	68,2	8,4
Fichte Mitte	36,2	61,2	75,6	39,4	60,8	64,2	70,0	9,2
Fichte innen	36,2	61,1	75,4	39,2	60,9	63,9	69,8	8,9
Malschicht	34,4	60,7	75,8	41,4	60,5	63,7	68,3	7,8
Firnis	33,6	60,5	76,1	42,5	55,8	62,6	67,9	12,1

Wie sich die Änderung der relativen Feuchte auf den Materialverbund auswirkt, und wie lange es dauert, bis sich das Tafelgemälde auf die neuen Klimawerte einstellt, wurde anhand eines Experiments an Probelplatten im Klimaschrank am Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologie (KDWT) untersucht (vgl. [6], [8]). Ergänzend dazu wurde die Reaktion innerhalb der einzelnen Schichten mit WUFI® Pro simuliert (4.3). Es wurde deutlich, dass große Änderungen der relativen Feuchte innerhalb des Materialverbunds zu einem sehr hohen Gradienten führen und erst nach einer knappen Woche die relative Feuchte in allen Schichten wieder ausgeglichen ist (Bild 10).

Hinsichtlich der künftigen Lagerung des Tafelgemäldes wurde in Absprache mit dem Forschungsprojektbeteiligten die Reaktion des Tafelgemäldes bei passiver Befeuchtung simuliert. Hier zeigte sich, dass innerhalb des Materialverbunds ein hoher Gradient vorliegen kann, wenn die Rückseite passiv konstant befeuchtet wird und das vorliegende Raumklima nicht konditioniert wird. Dennoch birgt die Methode einer rückseitigen Konditionierung bzw. Befeuchtung Potential, das mit einer sensorgestützten Ansteuerung der Befeuchtung optimiert werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Simulationen konnte abgeschätzt werden, wie sich das Tafelgemälde bei klimatischen Schwankungen verhält. Anders als erwartet, lagen in den Simulation sowohl im Klima der Sakristei also auch in der Einhausung geringe Gradienten innerhalb des Materialverbunds vor. Es zeigte sich jedoch die unmittelbare Reaktion des gesamten Verbunds auf klimatische Änderungen, die auch mit den Streifenlichtscans gezeigt werden konnte. Hinsichtlich der Beurteilung der Sensibilität des Tafelgemäldes auf klimatische Änderungen bestätigten und ergänzten sich die beiden Methoden.

Die Ergebnisse wurden dann für die Konzipierung des Klimaschrankversuchs verwendet. Mit Hilfe von optischen Untersuchungen an Probestplatten durch Streifenlichtscans konnte die Reaktion des Tafelgemäldes auf einen Feuchte-sprung genauso nachvollzogen werden, wie in der Simulation dargelegt wurde. Die größte Änderung in den Probestplatten fand innerhalb von einer Woche statt. Allerdings dauerte es bei den Messungen im Klimaschrank bis zu 10 Tage, bis die Ausgleichsfeuchte erneut vorlag. Alle Erkenntnisse flossen in den Auf-feuchtungsversuch am realen Kunstwerk in der Einhausung mit ein. Dieser erfolgte in zwei Schritten von 65 % r.F. auf 70 % r.F. und anschließend auf 75 % r.F. Die Dauer einer Auffeuchtung wurde vorab auf ca. 7 bis 10 Tage geschätzt. Es zeigte sich, dass diese erst nach 14 Tagen abgeschlossen waren. Trotzdem ergaben die Voruntersuchungen und Vorüberlegungen eine gute Näherung. Sie haben außerdem zum Verständnis verholfen, wie schnell die Tafel trotz der Größe auf klimatische Schwankungen reagiert.

Hinsichtlich der zukünftigen Lagerung des Tafelgemäldes konnten gemeinsam mit den Projektbeteiligten Strategien überlegt und diskutiert werden. So zeigte sich in der Simulation, dass die passive Befeuchtung von der Rückseite ohne Einbeziehung des an der Vorderseite anliegenden Raumklimas nicht ideal ist, da sie im Materialverbund Gradienten erzeugt, die nicht zuträglich für die Erhaltung des Tafelgemäldes sind. Daher sollte im Fall einer passiven Befeuchtung diese dynamisch auf das vorne anliegenden Raumklimas reagieren können, oder eine zusätzliche Klimapufferung auf der Vorderseite vorgesehen werden, beispielsweise durch eine Verglasung. Hinsichtlich des Risikos für Schimmelbildung wurden alle Varianten mit WUFI® Bio berechnet. Hieraus ergab sich kein Schimmelpilzrisiko. Da jedoch bei der in-situ Beurteilung Schimmelsporen festgestellt wurden, sollte ein Schimmelpilzmonitoring durchgeführt werden.

Für die Beurteilung der Auswirkungen des vorliegenden Raumklimas, wie auch zur Ermittlung eines Klimazielkorridors zur Konservierung und langfristigen Lagerung ist die Methode der hygrothermischen Simulation sehr hilfreich. In Kombination mit optischen Verfahren kann eine verlässliche, individuelle Risikoabschätzung für Kunstwerke in kritischen klimatischen Situationen erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 7783: Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Schalenverfahren (ISO 7783:2018); Deutsche Fassung EN ISO 7783:2018
- [2] DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572: 2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016
- [3] DIN EN ISO 12571: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2021); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2021
- [4] Künzel, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation Universität Stuttgart 1994
- [5] Holl, Kristina: Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation, Dissertation München 2016
- [6] Hilger, Theresa et al.: Entwicklung und modellhafte Anwendung einer ‚in situ‘ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes, 4. Zwischenbericht, DBU-Projekt (AZ 37502/01), 31.12.2023 (unveröffentlicht)
- [7] Kocan, Osman: Ressourcenschonende in-situ Befeuchtungsmethode für ein historisches Holztafelgemälde, Masterarbeit TU München, WS23/24 (unveröffentlicht)
- [8] Koserog, Natalie: Bewertung der Auswirkungen von Temperatur- und Feuchteveränderungen auf gefasste Holzoberflächen anhand von Klimaschrankversuchen Masterarbeit Otto-Friedrich-Universität Bamberg, WS 23/24 (unveröffentlicht)

Bildverzeichnis

Bild 1:	Tafelbild Domsakristei Freising, Gesamtansicht 2020 © Diözesanmuseum Freising, Foto: Walter Bayer (2020).	4
Bild 2:	Sorptionsisotherme der Bildschicht gemessen mit DVS, Grafik: MPA Stuttgart.	7
Bild 3:	Grafische Darstellung von Temperatur und relative Feuchte, gemessen vor und hinter dem Tafelgemälde für den Zeitraum vom 1.1.2021 bis 31.7.2022. Die Fertigstellung der Einhausung am 4.4.2022 führt zu einer sofortigen Stabilisierung des Klimas (gestrichelte Linie). Die relative Feuchte liegt zwischen 34,4 % r.F. und 77,5 % r.F.. Im Winter 2021 wurde zur Stabilisierung des Raumklimas ein Befeuchter eingesetzt, im Winter 2022 nicht. Dies führt zu kritischen Werten unter 40 % r.F. im Zeitraum Ende Februar bis März 2022.	8
Bild 4:	Detaildarstellung von Temperatur und relativer Feuchte an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum von 12.2. bis 16.3.2021. Insbesondere in der relativen Feuchte ist ein Gradient zwischen Vorder- und Rückseite erkennbar teilweise bis zu 5 % r.F. sichtbar.	9
Bild 5:	Grafische Darstellung von Temperatur und relative Feuchte, gemessen vor und hinter dem Tafelgemälde für den Zeitraum vom 1.1. – 31.12.2023.	10
Bild 6:	Bildschirmaufnahme aus dem Simulationsprogramm WUFI® Pro zeigt den Querschnitt des Holztafelgemäldes unter Berücksichtigung der gemessenen Materialproben (Überzug, Bildschicht, Firnis). Aufbau von links nach rechts: Leinölfirnis (0,1 mm) Fichtenholz longitudinal (20 mm) Mal- und Fassungsschicht (0,6 mm) Firnis (0,06 mm). Die Videokamera kennzeichnet eine „Monitorposition“, an der die Temperatur- und Feuchtwerte berechnet werden. (Grafik: Fraunhofer IBP).	12
Bild 7:	Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemälde als Reaktion auf das in der Sakristei vorliegende Raumklima vom 15.4. 2021 – 14.4. 2022.	14
Bild 8:	Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Sakristei vorliegende Raumklima vom 1.12. 2021 – 31.1.2022.	14
Bild 9:	Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Einhausung vorliegende Raumklima vom 1.1. – 1.12.2023.	15

- Bild 10: Feuchteverteilung im Materialverbund des Tafelgemäldes beim Klimaschrankversuch bei einem Feuchtesprung von 80 % r.F. auf 34 % r.F. (bei konstanter Temperatur von 19 °C). 17
- Bild 11: Feuchteverteilung im Materialverbund des Tafelgemäldes mit gemessenem Raumklima in der Sakristei an der Vorderseite und konstanter relativer Feuchte von 65 % auf der Rückseite, Zeitraum vom 15.1 – 31.12.2021. 18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung der in der Sammlung befindlichen Materialien und Materialkombinationen und Anforderungen an das Raumklima nach unterschiedlichen Literaturangaben.	6
Tabelle 2:	Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum vom 1.1.2021 bis 31.07.2022.	10
Tabelle 3:	Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum vom 1.1. bis 31.12.2023.	11
Tabelle 4:	Statistische Auswertung der relativen Feuchte in den simulierten Positionen für die Szenarien Sakristei und Einhausung.	19

Anhang

A.1 Ergebnisse Materialkenndaten

Prüfbericht HoFM-070/2023

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Durchgeführt im Auftrag von:
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München
DEUTSCHLAND

Holzkirchen, 21. November 2023



Prüflaboratorium
durch DAkkS GmbH akkreditiert nach
DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Prüfstelle Feuchte, mineralische
Werkstoffe
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-222
Telefax +49 8024 643-366
www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de

Geprüftes Material: „Aufbau Vorderseite VS“

Historischer Anstrich auf Glas-Fritte

Herstellerangaben:

Auftrag von 3x Vorleimung (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser)

Grundierschicht 1 (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser +

Champagner Kreide (1:1,3))

Grundierschicht 2-8 in (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser +

Champagner Kreide (1:1,4))

Absperrschicht 1/2 (Hasenhautleim 7% GT in demin. Wasser)

Malschicht

Ermittelte Werte durch das Prüflabor:

Mittlere Dicke Anstrich: 0,71 mm

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen fertig aufgetragen auf Glas-Fritten am 12. Juni 2023 angeliefert. Das Material wurde direkt vom bayrischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) aufgetragen und dokumentiert.

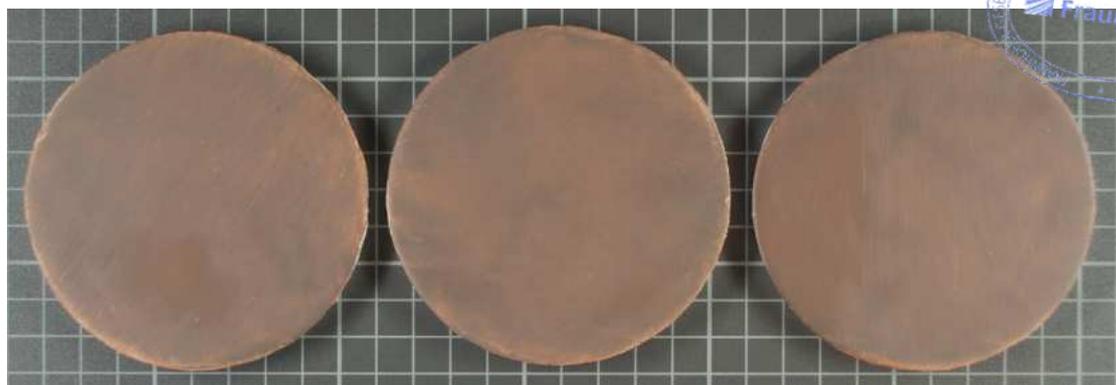


Bild 1: Materialprobe auf Glasfritte „Aufbau Vorderseite VS“.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Der Anstrich wurde mehrlagig auf 6 mm dicke Glasfritten vom Auftraggeber aufgetragen. Die Proben zeigen keine erkennbaren Mängel oder Besonderheiten.

Probenbezeichnung:

F562_A1 bis F562_A3

F562_A4 bis F562_A6

F562_G0

Proben für dry-cup

Proben für wet-cup

Nullprobe ohne Anstrich

Probenfläche

kreisförmig: Durchmesser 90 mm

Prüfverfahren

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783, 2019-02.

Trockenschalenverfahren: 23 °C, 0 – 50 % r.F. (Sorbens: Silicagel).

Feuchtschalenverfahren: 23 °C, 50 – 93 % r.F. (Sorbens: Ammoniumdihydrogenphosphat).

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden von Juni bis Juli 2023 durchgeführt.

Tabelle 1: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d des Produktes „Aufbau Vorderseite VS“

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_A1 F562_A2 F562_A3	„Aufbau Vorderseite VS“	23 °C, 0 – 50 % r.F.	1,15 1,09 1,18	1,14
F562_A4 F562_A5 F562_A6		23 °C, 50 – 93 % r.F.	0,69 0,65 0,62	0,65

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025:2018 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-00 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
3 Seiten Text,
1 Tabelle und
1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 21. November 2023

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Technischer Leiter der Prüfstelle

Martin Krus

Digital unterschrieben
von Martin Krus
Datum: 2023.11.21
14:02:32 +01'00'

Prof. Dr. Martin Krus



Sachbearbeiterin

Kristin Lengsfeld

Digital unterschrieben
von Kristin Lengsfeld
Datum: 2023.11.21
12:05:13 +01'00'

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld

Prüfbericht HoFM-071/2023

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Durchgeführt im Auftrag von:
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München
DEUTSCHLAND

Holzkirchen, 21. November 2023



Prüflaboratorium
durch DAkkS GmbH akkreditiert nach
DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Prüfstelle Feuchte, mineralische
Werkstoffe
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-222
Telefax +49 8024 643-366
www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de

Geprüftes Material: „Aufbau Rückseite RS“

Historischer Anstrich auf Glas-Fritte

Herstellerangaben:

Auftrag von 3x Vorleimung (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser)
Bindemittelauftrag/Leinölfirnis

Ermittelte Werte durch das Prüflabor:

Mittlere Dicke Anstrich: 0,75 mm

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen fertig aufgetragen auf Glas-Fritten am 12. Juni 2023 angeliefert. Das Material wurde direkt vom bayrischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) aufgetragen und dokumentiert

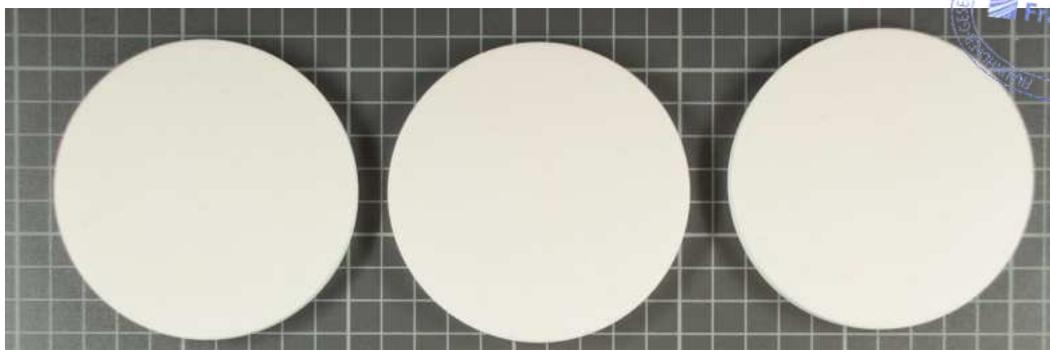


Bild 1: Materialproben auf Glasfritte „Aufbau Rückseite RS“.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Der Anstrich wurde mehrlagig auf 6 mm dicke Glasfritten vom Auftraggeber aufgetragen. Die Proben zeigen keine erkennbaren Mängel oder Besonderheiten.

Probenbezeichnung:

F562_B1 bis F562_B3

Proben für dry-cup

F562_B4 bis F562_B6

Proben für wet-cup

F562_G0

Nullprobe ohne Anstrich

Probenfläche

kreisförmig: Durchmesser 90 mm

Prüfverfahren

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783, 2019-02.

Trockenschalenverfahren: 23 °C, 0 – 50 % r.F. (Sorbens: Silicagel).

Feuchtschalenverfahren: 23 °C, 50 – 93 % r.F. (Sorbens: Ammoniumdihydrogenphosphat).

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden von Juni bis Juli 2023 durchgeführt.

Tabelle 1: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d des Produktes „Aufbau Rückseite RS“

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_B1 F562_B2 F562_B3	„Aufbau Rückseite RS“	23 °C, 0 – 50 % r.F.	0,29 0,25 0,26	0,27
F562_B4 F562_B5 F562_B6		23 °C, 50 – 93 % r.F.	0,11 0,06 0,19	0,12

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025:2018 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-00 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
3 Seiten Text,
1 Tabelle und
1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 21. November 2023

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Technischer Leiter der Prüfstelle
Digital unterschrieben
von Martin Krus
Datum: 2023.11.21
14:00:35 +01'00'

Martin Krus

Prof. Dr. Martin Krus



Sachbearbeiterin
Digital unterschrieben
von Kristin Lengsfeld
Datum: 2023.11.21
12:06:29 +01'00'

Kristin Lengsfeld

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld

Prüfbericht HoFM-072k/2023

Korrektur von Prüfbericht Nr. HoFM-072/2023
Die Änderungen zur vorherigen Version sind im Anhang des
Berichtes aufgeführt.

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Durchgeführt im Auftrag von:
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München
DEUTSCHLAND

Holzkirchen, 18. Dezember 2023



Prüflaboratorium
durch DAkkS GmbH akkreditiert nach
DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Prüfstelle Feuchte, mineralische
Werkstoffe
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-222
Telefax +49 8024 643-366
www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de

Geprüftes Material: „Aufbau Firnis SD“

Historischer Anstrich auf Glas-Fritte

Herstellerangaben:

Auftrag von 3x Vorleimung (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser)

Firnis 1 (Schelllack)

Firnis 2 (Dammarfirnis)

Ermittelte Werte durch das Prüflabor:

k.A.

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen fertig aufgetragen auf Glas-Fritten am 12. Juni 2023 angeliefert. Das Material wurde direkt vom bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) aufgetragen und dokumentiert.

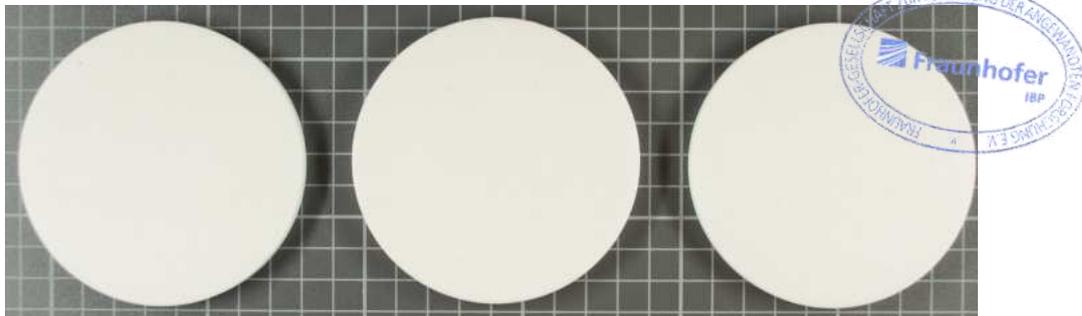


Bild 1: Materialproben auf Glasfritte „Aufbau Firnis SD“.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Der Anstrich wurde mehrlagig auf 6 mm dicke Glasfritten vom Auftraggeber aufgetragen. Die Proben zeigen keine erkennbaren Mängel oder Besonderheiten.

Probenbezeichnung:

F562_C1 bis F562_C3

F562_G0

Nullprobe ohne Anstrich

Probenfläche

kreisförmig:

Durchmesser 90 mm

Prüfverfahren

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783, 2019-02.

Trockenschalenverfahren: 23 °C, 0 – 50 % r.F. (Sorbens: Silicagel).

Feuchtschalenverfahren: 23 °C, 50 – 93 % r.F. (Sorbens: Ammoniumdihydrogenphosphat).

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden von Juni bis Juli 2023 durchgeführt.

Tabelle 1: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d des Produkts „**Aufbau Firnis SD**“

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_C1 F562_C2 F562_C3	„Aufbau Firnis SD“	23 °C, 0 – 50 % r.F.	1,99 1,99 1,88	1,95
F562_C1 F562_C2 F562_C3		23 °C, 50 – 93 % r.F.	0,57 0,56 0,53	0,55

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025:2018 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-00 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
4 Seiten Text,
1 Tabelle und
1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 18. Dezember 2023

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Technischer Leiter der Prüfstelle

Martin Krus

Digital unterschrieben
von Martin Krus
Datum: 2023.12.19
10:33:21 +01'00'

Prof. Dr. Martin Krus



Sachbearbeiterin

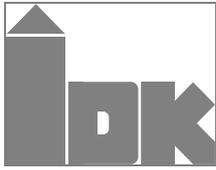
Kristin Lengsfeld

Digital unterschrieben
von Kristin Lengsfeld
Datum: 2023.12.19
08:55:54 +01'00'

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld

Anhang

Seite	Kapitel	Ursprüngliche Version (HoFM-072/2023)	Korrigierte Version (HoFM-072k/2023)
2	Geprüftes Material	Herstellerangaben: Firn 1 (Schellack) Firn 2 (Schellack) Ermittelte Werte durch das Prüflabor: Mittlere Dicke Anstrich: 0,72 mm	Herstellerangaben: Firn 1 (Schellack) Firn 2 (Dammarfirnis) Ermittelte Werte durch das Prüflabor: k.A.



Institut für Diagnostik
und Konservierung an Denkmalen
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht DD 76/2023

Luftwechselformung einer temporären Einhausung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes: „Entwicklung und modellhafte Anwendung einer ‚in situ‘ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes“

DBU Projekt: AZ 37502/01

Beauftragt durch: Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstrasse 21
80333 München

Bearbeiter: Dipl. Ing. (FH) Thomas Löther

Anzahl der Seiten: 4

Anlagen: - Seiten

Thomas Löther

Dresden, 23.11.2023

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:
Schloßplatz 1
01067 Dresden
Tel.: 0351 48435-100
Fax.: 0345 472257-29
Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:
Domplatz 3
06108 Halle
Tel.: 0345 472257-20
Fax.: 0345 472257-29
e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Dr. Stephan Pfefferkorn
Dipl.-Ing. Konstanze Förster-Wetzel
Prof. Dr. Jeannine Meinhardt
Geschäftsführerin:
Dipl.-Ing (FH) Thomas Löther
Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
IBAN: DE52850503003120115524
BIC: OSDDDE81XXX
St-Nr.: 203 140 15097
Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Erfassung des natürlichen Luftwechsels	2
2.1	Methodik Luftwechselformel	2
2.2	Datenblätter der Luftwechselformel	3

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes „Entwicklung und modellhafte Anwendung einer ‚in situ‘ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes“ (AZ 37502/01) erfolgen auch raumklimatische Untersuchungen und Simulationen. Um diese Simulationen richtig kalibrieren zu können, ist die Bestimmung des natürlichen Luftwechsels eine wichtige Messgröße.

Das im Forschungsprojekt beteiligte Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) führte die Tracergasmessung innerhalb der Einhausung durch, um eine Messgröße zum natürlichen Luftwechsel zu ermitteln.

2 Erfassung des natürlichen Luftwechsels

2.1 Methodik Luftwechselformel

Die Untersuchung des Luftwechsels erfolgt nach der Referenzgasmethode mit Hilfe von CO₂. Um den Luftwechsel eines Raumes zu bestimmen, wird eine definierte Menge an Referenzgas in die Raumluft der temporären Einhausung abgegeben. Um die bestmögliche Vermischung des eingebrachten Gases mit der Raumluft zu erreichen, werden Lüfter eingesetzt, die das Gas sofort nach dem Austritt verteilen. Sensoren messen im Minutenabstand die Referenzgaskonzentration, sowie Lufttemperatur und Luftfeuchte. Der Versuchsaufbau der Messung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 12569. Die Messwerte werden an ein Notebook gesendet und dort verarbeitet. Aus Art und Weise des Referenzgaskonzentrationsanstiegs und des anschließenden Konzentrationsabfalls erfolgt die Ermittlung des Luftwechsels mit Hilfe einer Modellrechnung. Die Berechnung wird einerseits nach den Vorgaben von DIN EN ISO 12569 ausgeführt und berücksichtigt lediglich die Abkonzentrationsphase des Referenzgases, alternativ dazu kommt ein Berechnungsverfahren zum Einsatz, das Auf- und Abkonzentrationsphase einbezieht. Dadurch wird der praxisrelevante Wert des mittleren Luftwechsels ermittelt.

2.2 Datenblatt der Luftwechselformung

Luftwechselformung

Objektdatenblatt

Objektdaten	
Objektname:	Dom Freising
Objektadresse:	Domberg 36 85354 Freising
Objektdetail/Bezeichnung des Raumes:	Sakristei mit temporärer Einhausung
Datum:	17.07.2023



Kenndaten - Eigenschaften des Raumes		
Raumtemperatur [°C]	23,6	Besonderheiten: Messung in einer baulich abgedichteten temporären Einhausung
rel. Feuchte [%]	65,0	
Grundfläche [m²]:		
Ø Höhe [m]:		
Volumen [m³]:	95	
Fensterfläche [m²]:		
Oberflächenmaterial:	verputzte Wandoberflächen, eine Fensterfront, Holzfußboden, Holzeinbauten	

Kenndaten - Wetterbedingungen am Tag der Messung			
Lufttemperatur [°C] (Tagesmittel)	26	Windstärke [Bft] (Tagesmittel)	---
rel. Feuchte [%] (Tagesmittel)	50	max. Windgeschwindigkeit [km/h]	5

Luftwechselformung/Ergebnisse	
Messbeginn:	17.07.2023, 11:20 Uhr
Messverfahren:	Referenzgasmethode in Anlehnung an Versuchsaufbau nach DIN EN ISO 12569
Referenzgas:	CO ₂

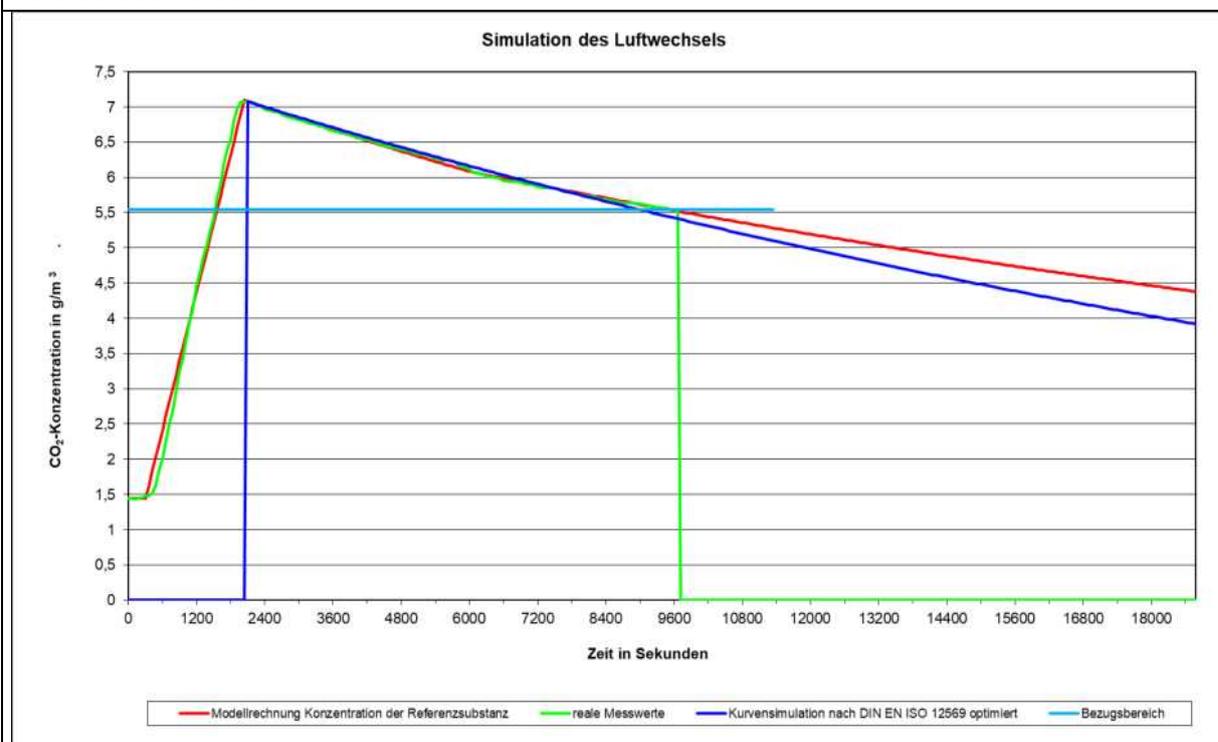
Luftwechselformel

Objektdatenblatt

Objektdaten	
Objektname:	Dom Freising
Objektadresse:	Domberg 36 85354 Freising
Objektdetail/Bezeichnung des Raumes:	Sakristei mit temporärer Einhausung
Datum:	17.07.2023

Berechnung der Luftwechselrate:	Luftwechselrate
nach DIN EN ISO 12569	0,08
IDK-Modellrechnung unter Berücksichtigung der Auf- und Abkonzentrationsphase:	0,13

Luftwechselsimulation:



Bemerkungen:

Messung mit geschlossenem Fenster und Tür



Anhang E: Weitere Untersuchungen

01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

[Auszug 4. DBU Zwischenbericht]

Nebel, Nebelfluide Herstellung und Zusammensetzung

Zur Herstellung von Nebel werden Nebelmaschinen eingesetzt. Die elektrisch betriebenen Geräte sind meist transportabel. Der eigentliche Nebel wird in dem Gerät aus einem Fluid hergestellt. Die heute benutzten Maschinen und das Fluid dafür wurden um 1973 entwickelt. Dabei wird ein Gemisch aus destilliertem Wasser und hochreinen Glycolen mit einer Pumpe durch ein rohrförmiges auf ca. 300°C erhitztes Heizelement mit enger Mensur gepresst. Beim Austritt aus der Düse des Geräts kondensiert dann der Glycoldampf in Form mikroskopisch kleiner Tröpfchen zu Nebel. Die aus kleinen Flüssigkeitströpfchen bestehenden Aerosole haben Partikelgrößen von 0,5 – 2 µm. Für eine normale Untersuchung in einem Raum werden nur wenige Milliliter Fluid verdampft, die mehrere Kubikmeter Nebel ergeben. Der entstandene Nebel nimmt sehr schnell die Raumlufttemperatur an und somit ist man in der Lage „temperaturgleiche Medien“ miteinander zu vergleichen. Der Nebel bewegt sich dann in der gleichen Geschwindigkeit und in die gleiche Richtung wie die im Raum vorhanden Luftschichten. Somit können Luftströmungen in Räumen visualisiert werden. Der Nebeldampf entwickelt sich an der Düse des Gerätes, wird von dort mit leichtem Druck in den Raum geblasen. In der Luft verteilt und verdünnt sich der Nebeldampf immer weiter. Der Nebeldampf hat je nach Zusammensetzung des Fluids eine Standzeit von mehreren Minuten bis Stunden und verflüchtigt sich dann vollständig. Die Moleküle aus den Aerosolen gehen vollständig in die Gasphase über. Über den gegebenen Luftaustausch wird das Material in die Umwelt abgegeben und ist dem Untersuchungsraum nicht mehr nachweisbar.

Zusammensetzung der Fluide, einzelne Bestandteile

- Nebelfluide: bestehen zu großen Anteilen aus Wasser (H₂O). Es kommt hochreines destilliertes Wasser zum Einsatz, um Rückstände beim Verdampfen in der Maschine zu vermeiden.
- Propylenglykol: eine Hauptkomponente in den gängigsten Nebelfluids; geruch- und geschmacksloses Erdölderivat; in der Industrie häufig als wasserbindende Substanz eingesetzt
- Glycerin: Glycerin erhöht die Standzeit der Aerosoltröpfchen.

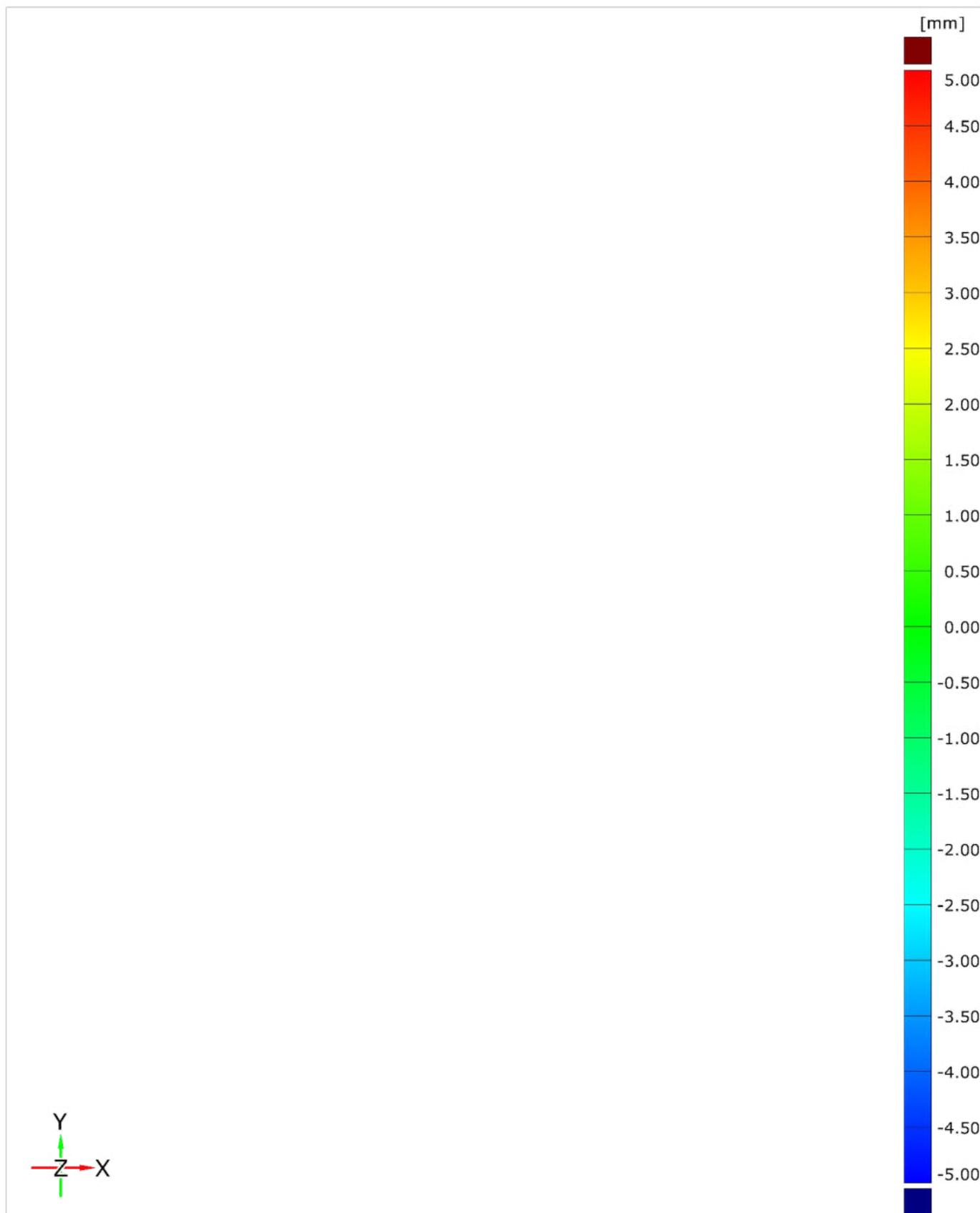
Risikobetrachtung

Risiken für die menschliche Gesundheit wurden in vielen Studien untersucht. Generell wird Nebel aus Nebelfluid bei korrekter Anwendung als nicht gesundheitsschädlich eingeschätzt. Jedoch ist zu erwähnen, dass die genauen Inhaltsstoffe zumeist nicht vom Hersteller ausgewiesen sind. Die Sicherheitsdatenblätter der Produkte sind meistens auch nicht aufschlussreicher. Für private Anwender entfallen in den Sicherheitsdatenblättern zusätzliche Informationen zu den Inhaltsstoffen. Problematisch kann es werden, wenn die Nebelmaschinen eine ungenaue Temperatursteuerung aufweisen. Wird das Fluid auf mehr als 350 °C erhitzt, können krebserregende Stoffe freigesetzt werden, die für den Menschen gesundheitsschädlich sind. Aus diesem Grund sollten nur professionelle Maschinen von seriösem Anbieter für die Erzeugung von Nebel zum Einsatz kommen. Ein Einsatz von Nebel

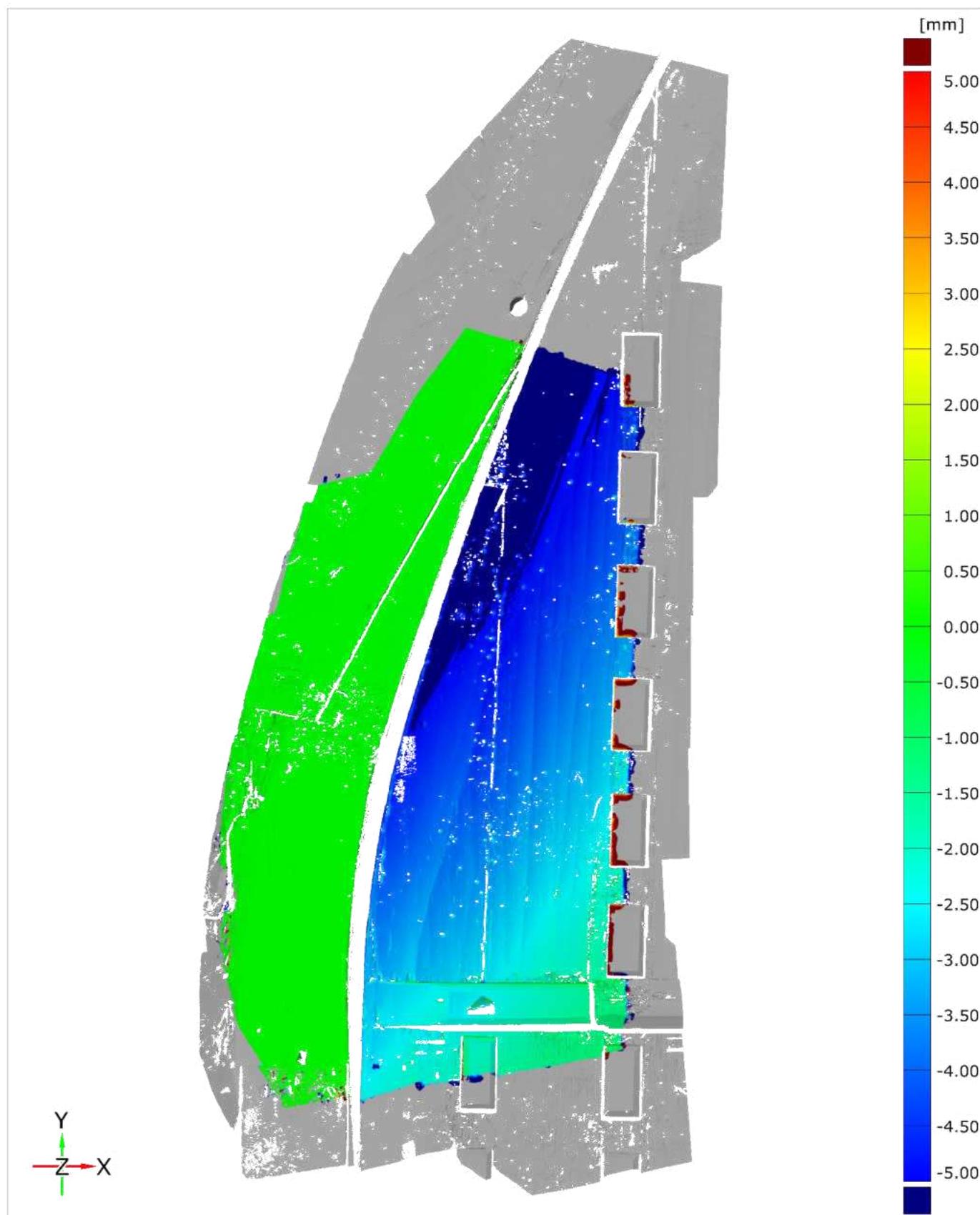


in geschlossenen, nicht durchlüfteten Räumen ist verboten. Risiken für Kunst- und Kulturgut können dann entstehen, wenn das Fluid im Aerosol sich als Niederschlag auf Oberflächen sammelt. Dies könnte vor allem an Flächen passieren, deren Temperatur deutlich unter der Umgebungstemperatur im Raum liegt. Auch könnte der Niederschlagseffekt auftreten, wenn der Nebel direkt auf eine Fläche geblasen werden sollte und sich nicht ordnungsgemäß in der Luft verbreiten kann. Da es sich um hochreine Substanzen handelt, die alle unter normalen Umgebungsbedingungen in die Gasphase übergehen, kann zunächst damit gerechnet werden, dass nach dem Verdampfen keine Rückstände auf den Oberflächen zu erwarten sind. Zu klären ist, ob es zu Lösungsreaktionen zwischen dem Fluid und dem Material der Oberfläche kommen könnte, die dann zu einer Veränderung des Objektes führen und ob sich möglicherweise doch Festbestandteile auf der Oberfläche ablagern.

Freising | Tafelgemälde Rückseite |



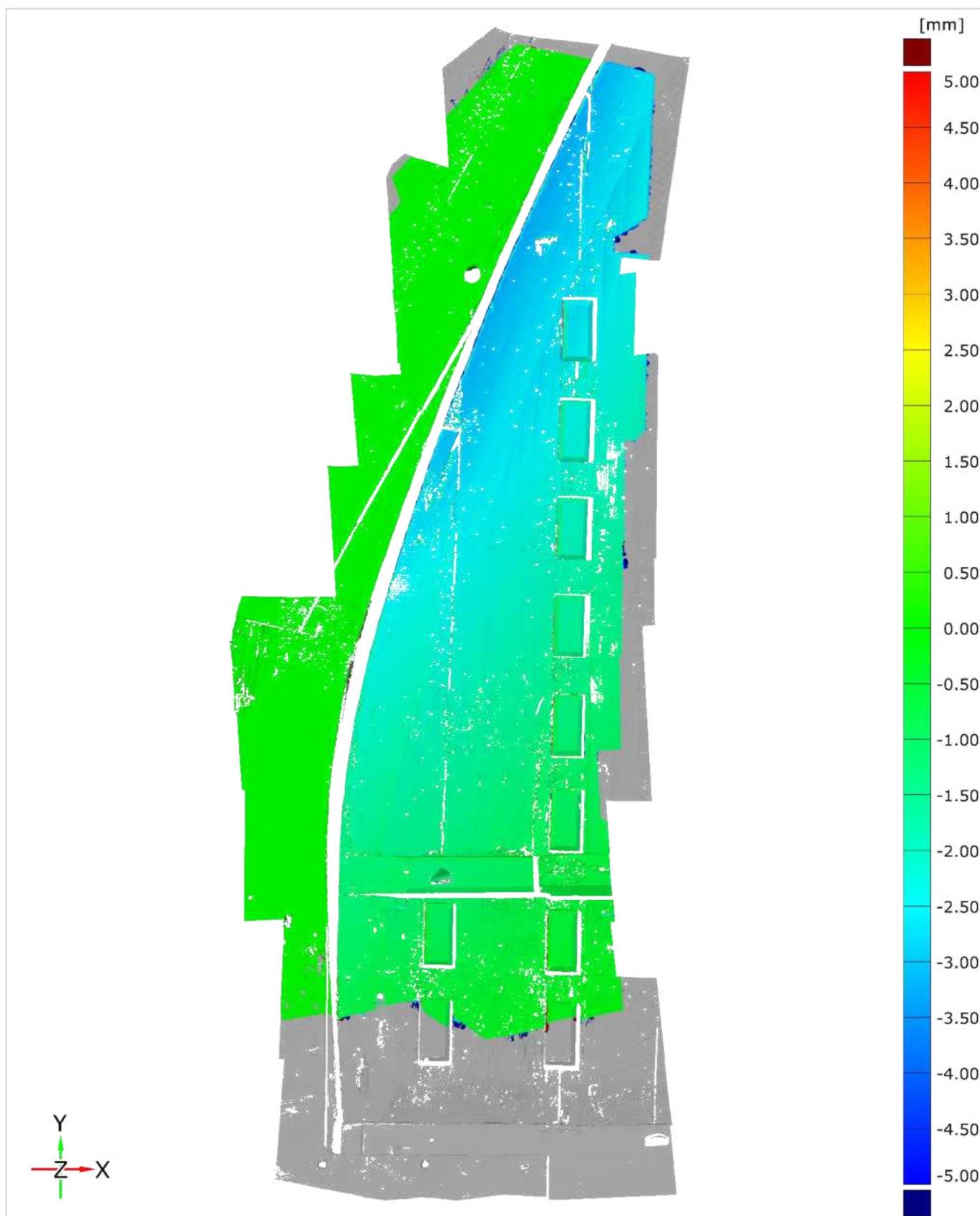
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 19.05.2022 (Soll), 13.06.2022 (Ist)



Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

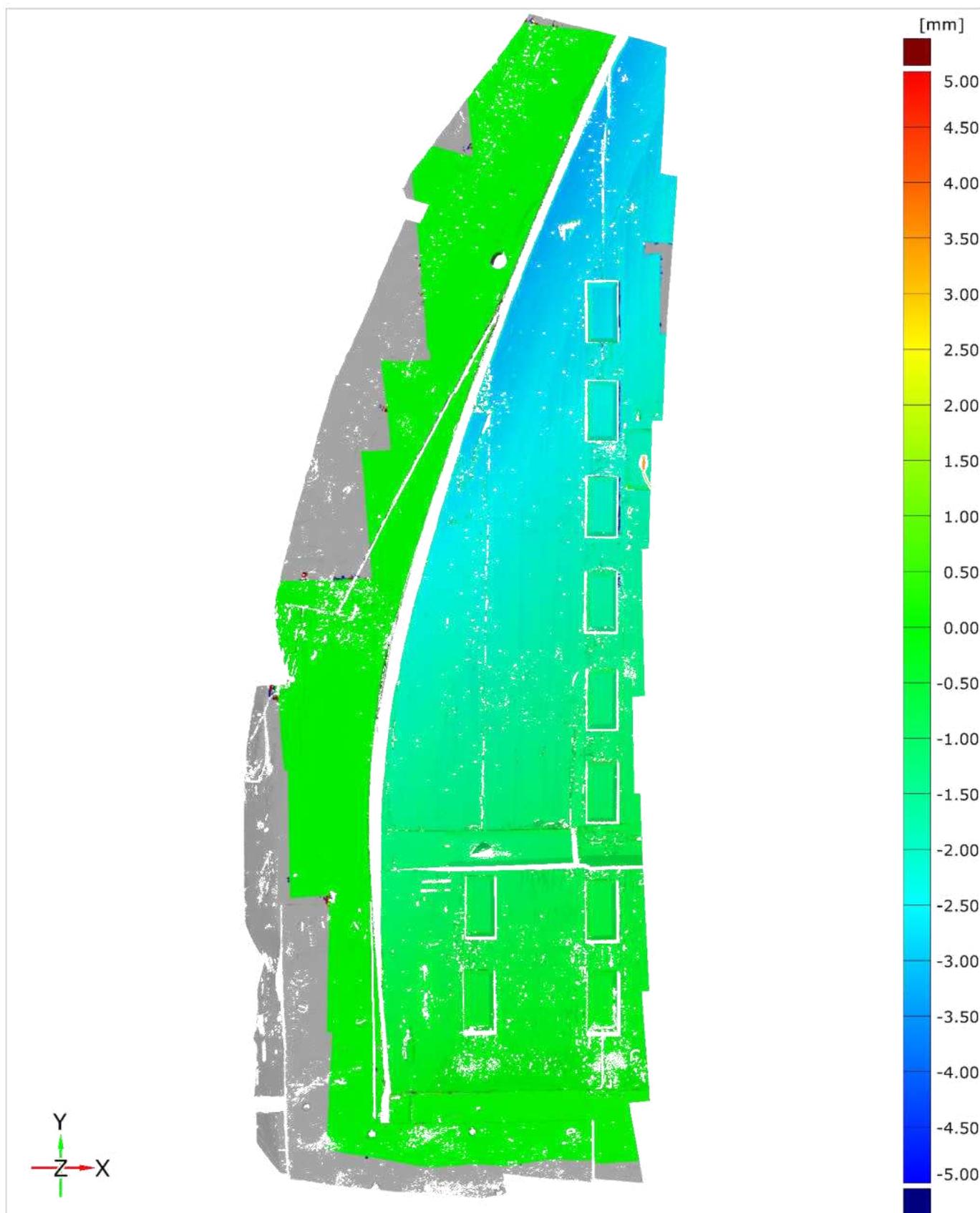
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 13.06.2022 (Soll), 24.08.2022 (Ist)



Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

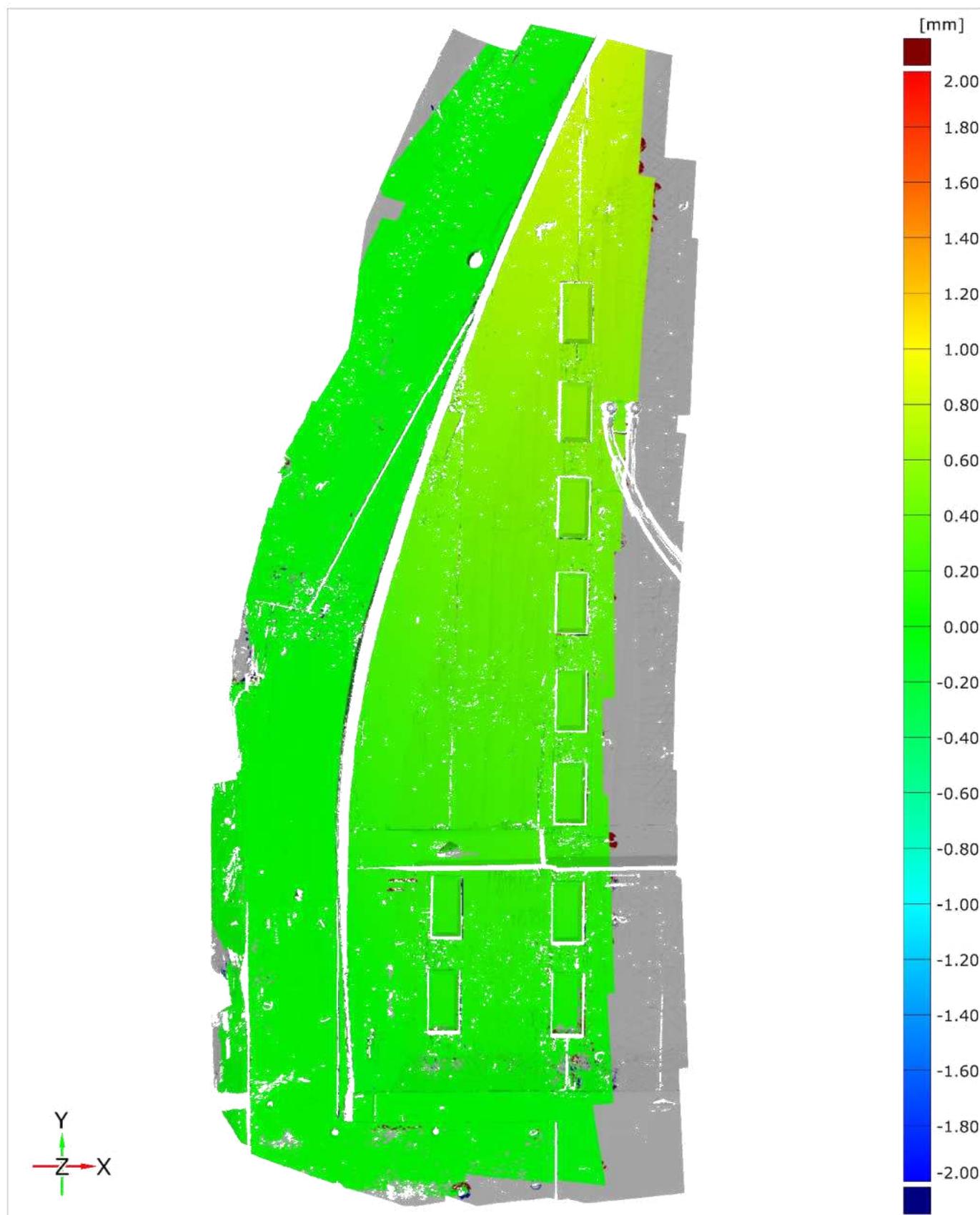
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 24.08.2022 (Soll), 12.12.2022 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

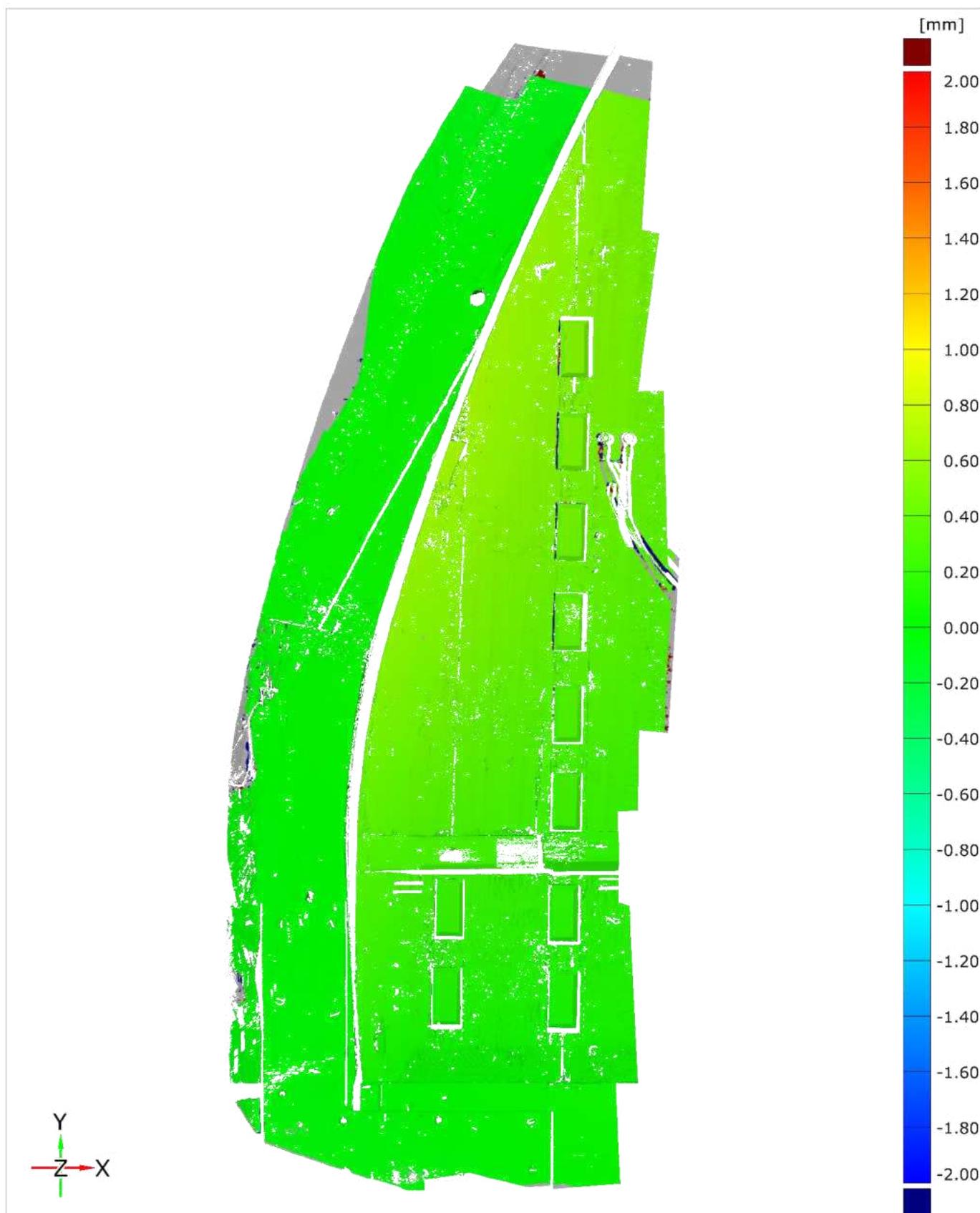
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 12.12.2022 (Soll), 20.02.2023 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

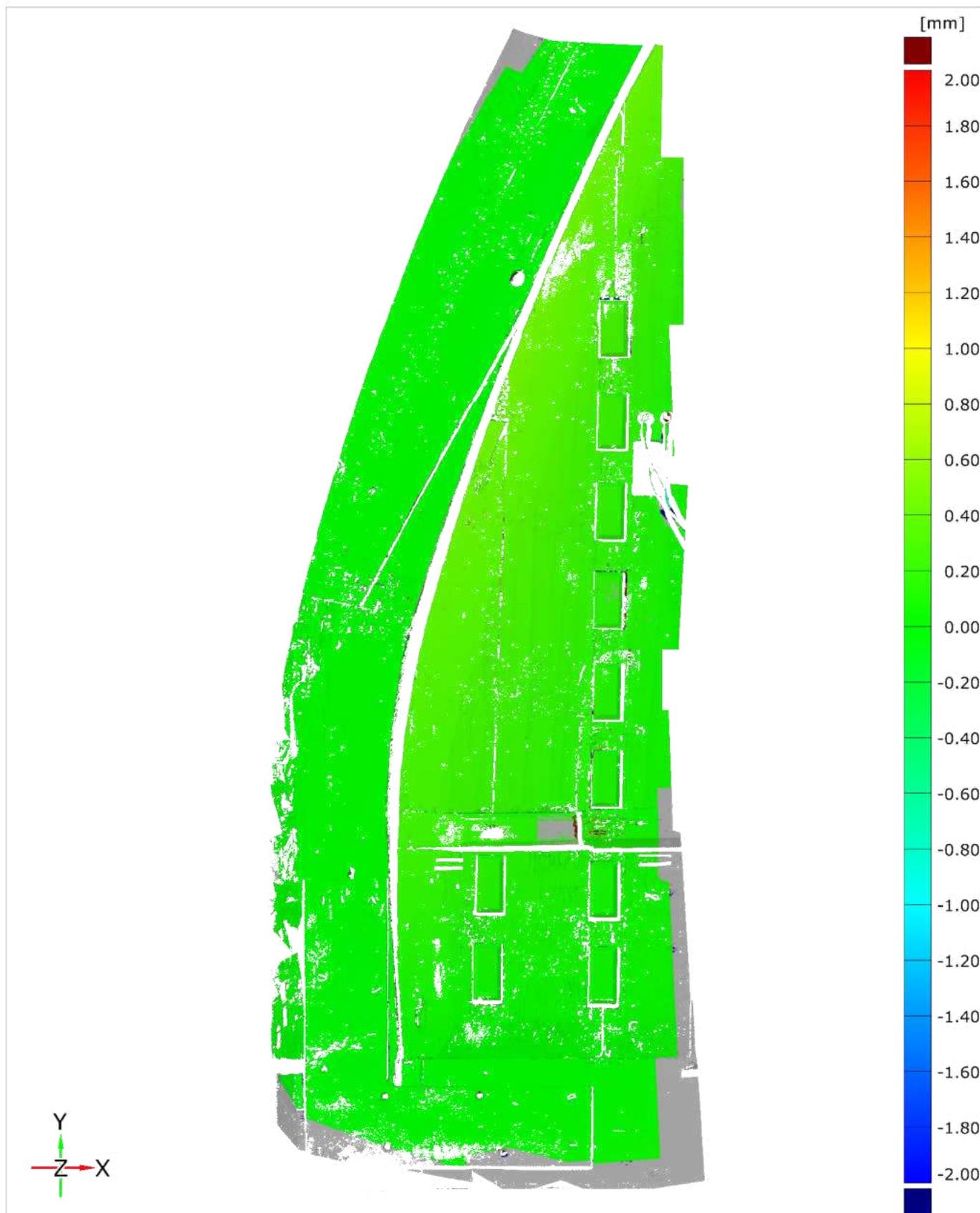
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 20.02.2023 (Soll), 13.03.2023 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

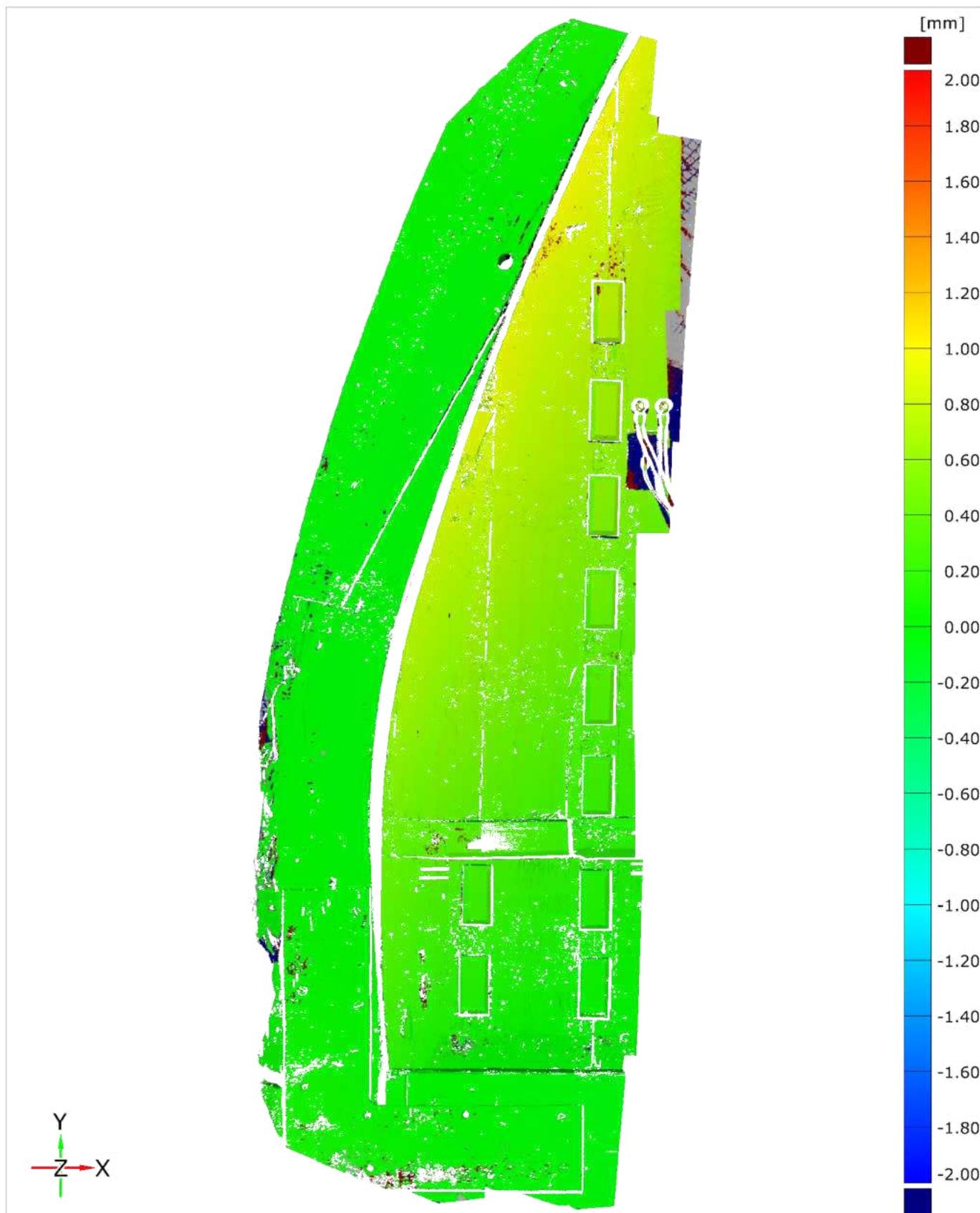
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 13.03.2023 (Soll), 30.05.2023 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

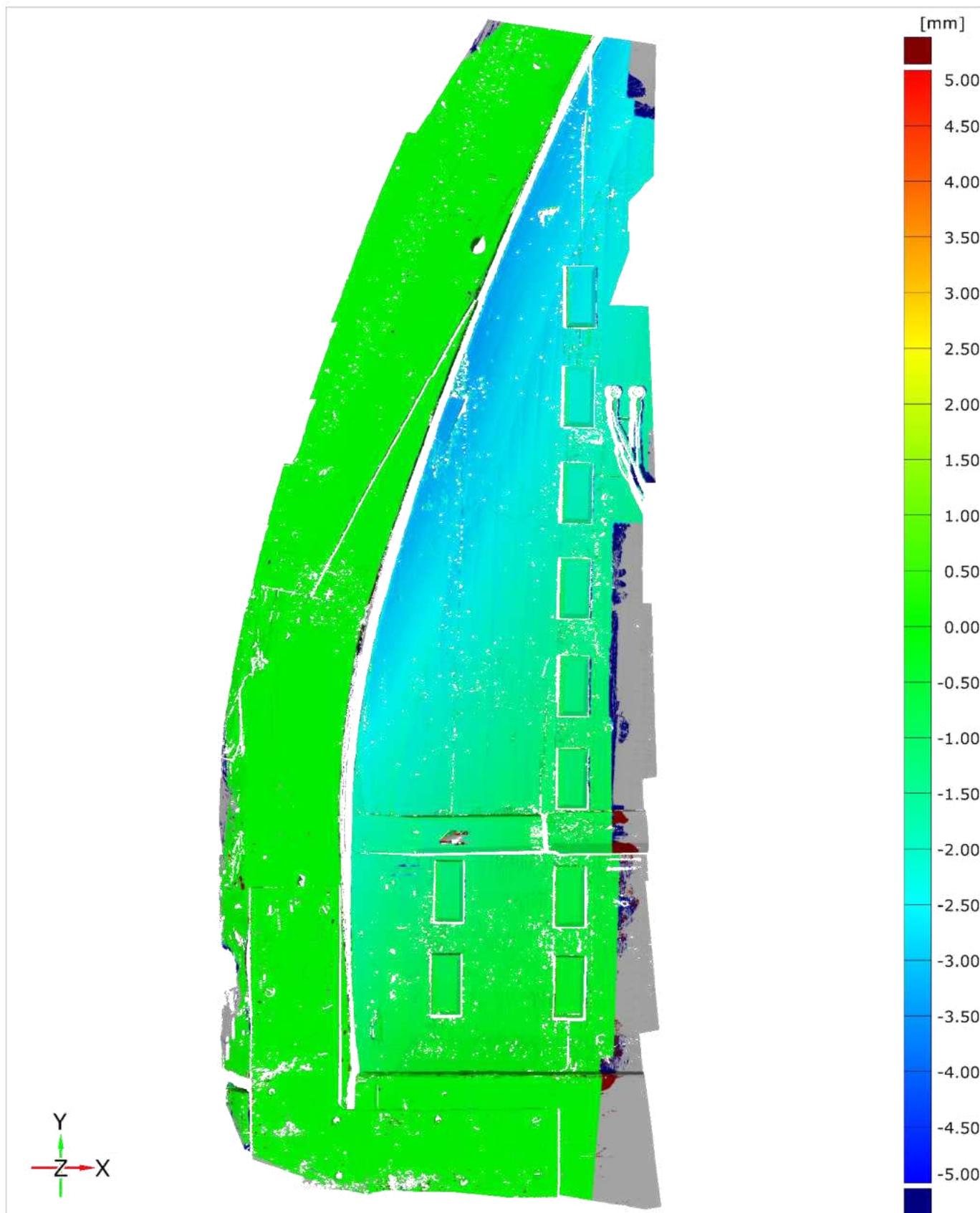
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 30.05.2023 (Soll), 20.06.2023 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

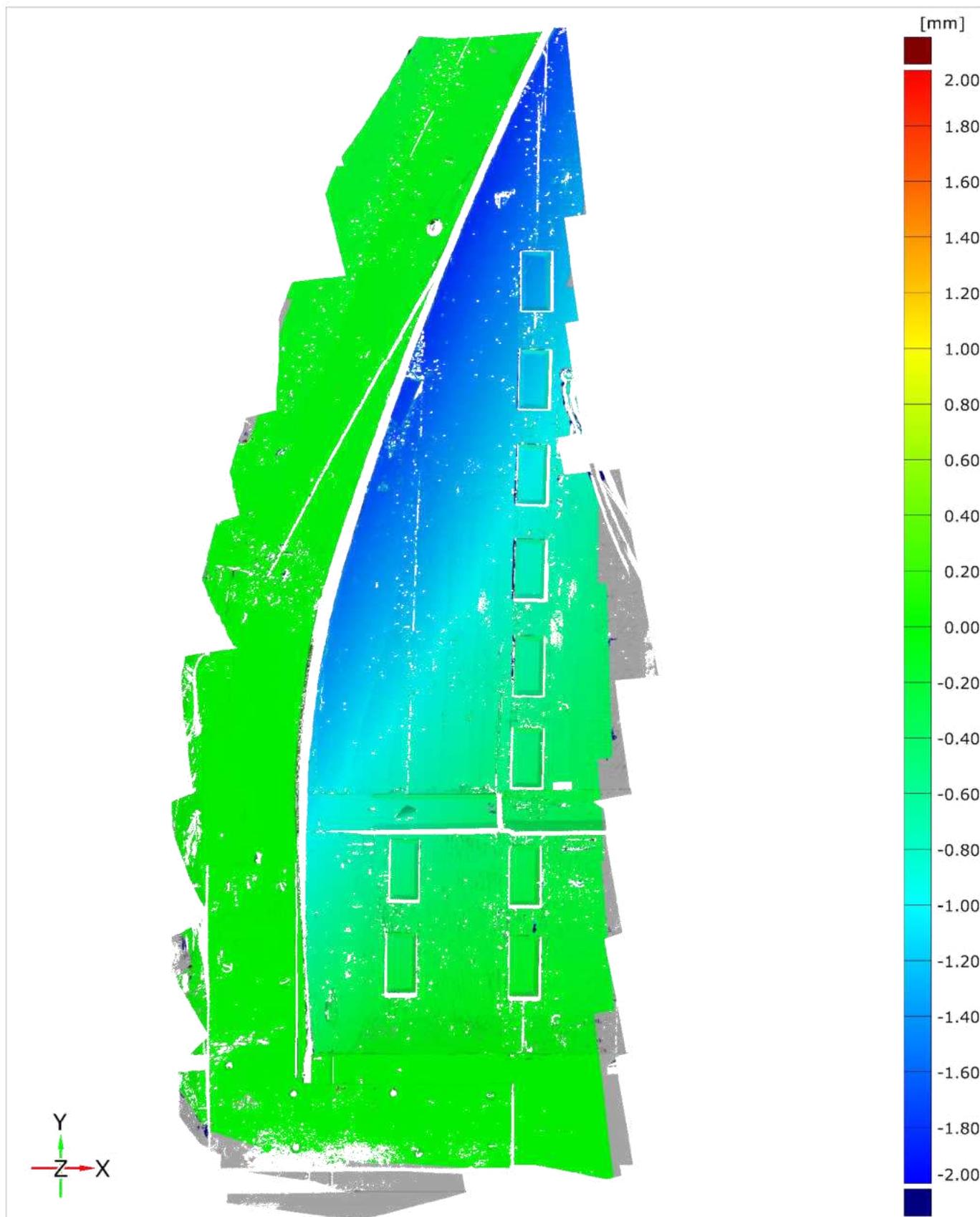
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 20.06.2023 (Soll), 22.08.2023 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

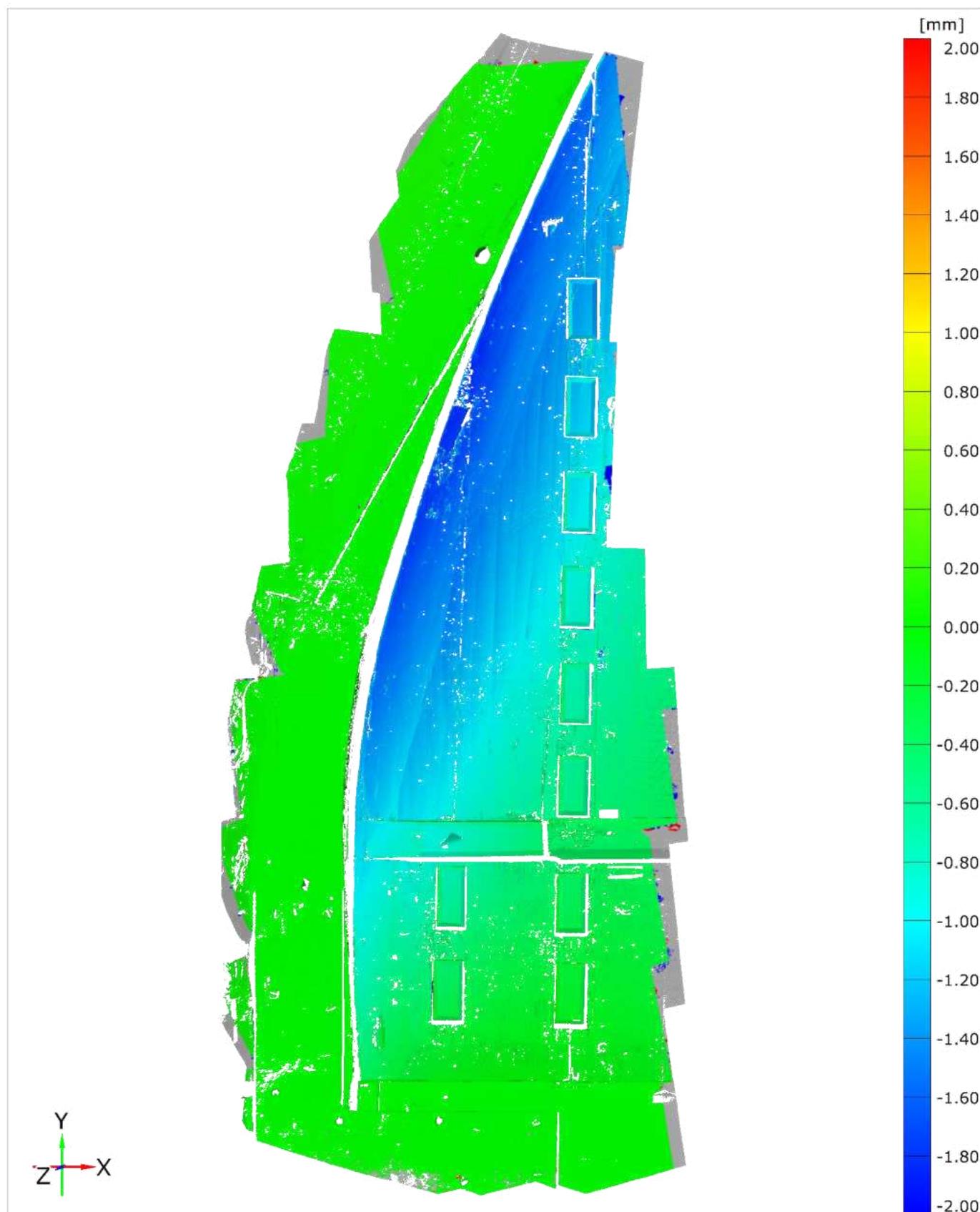
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 22.08.2023 (Soll), 24.01.2024 (Ist)



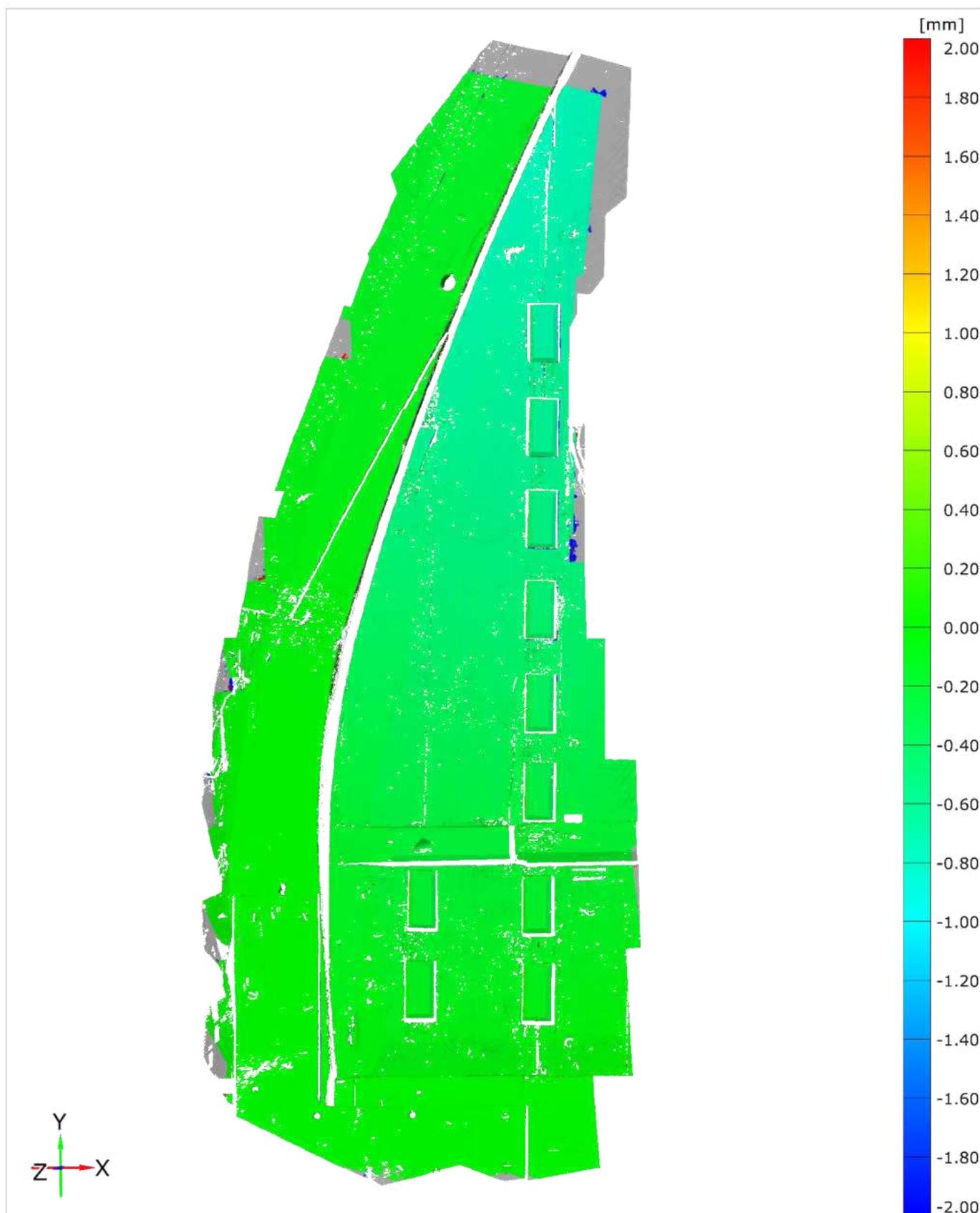
Lokales Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

Freising | Tafelgemälde Rückseite | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



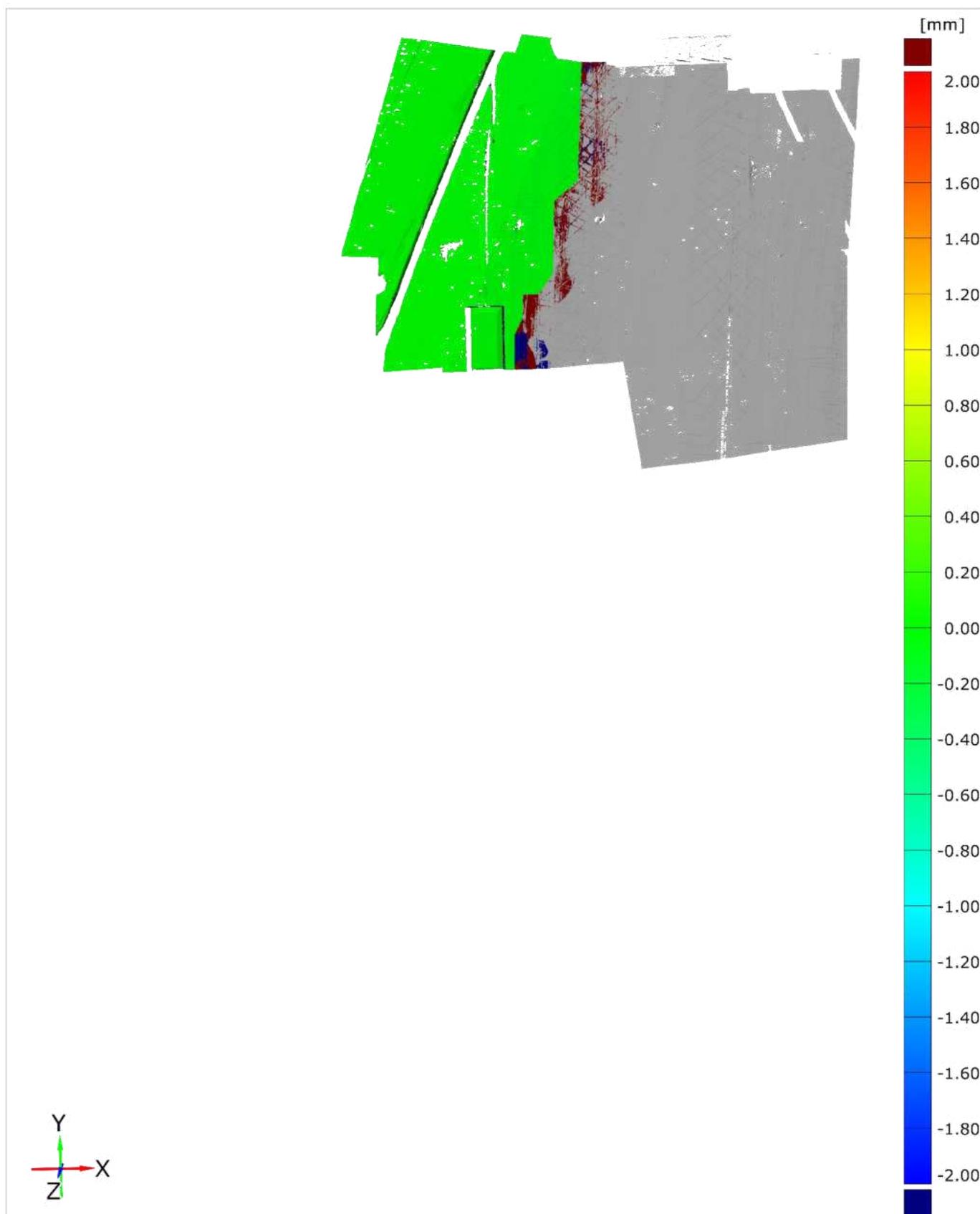
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



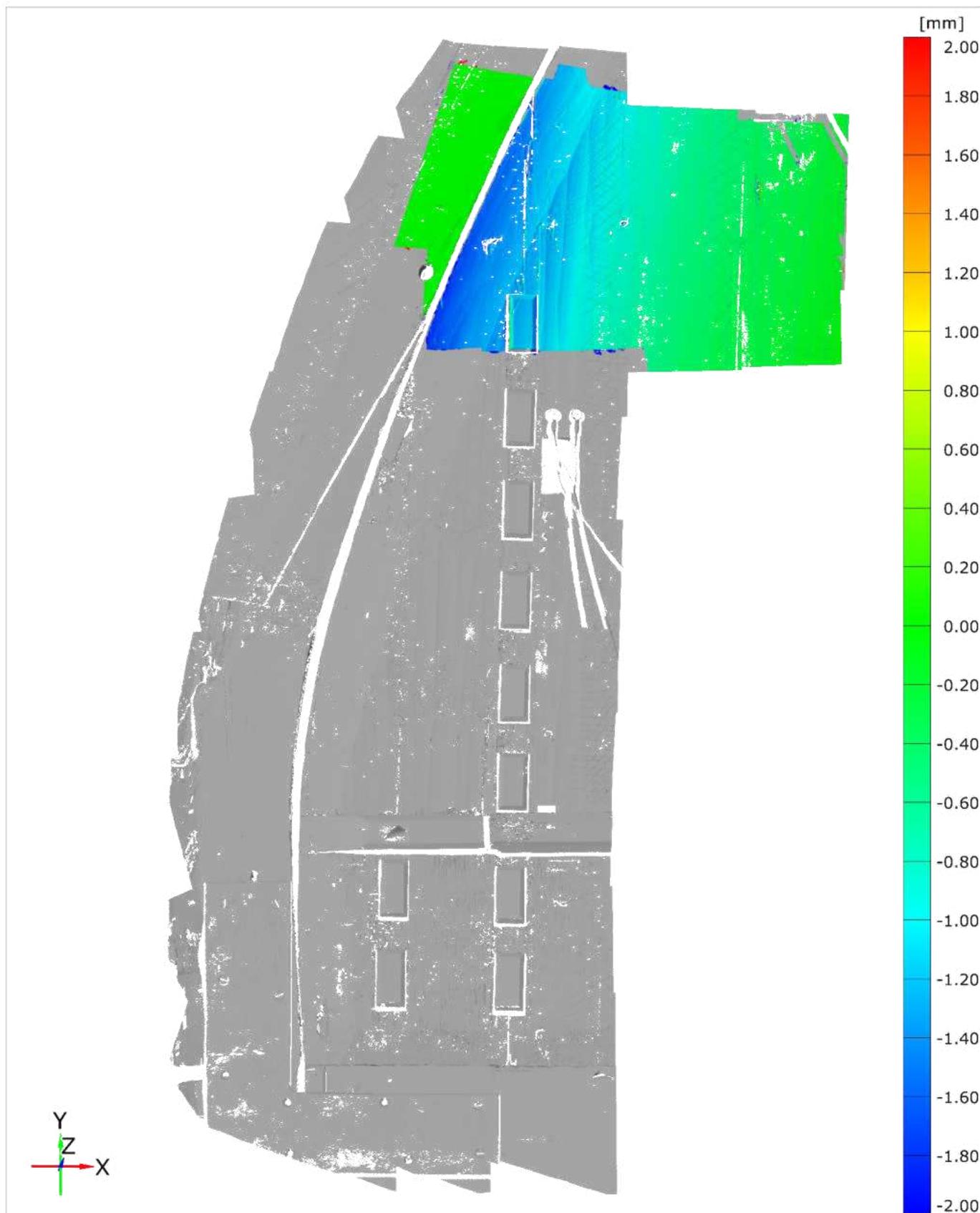
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

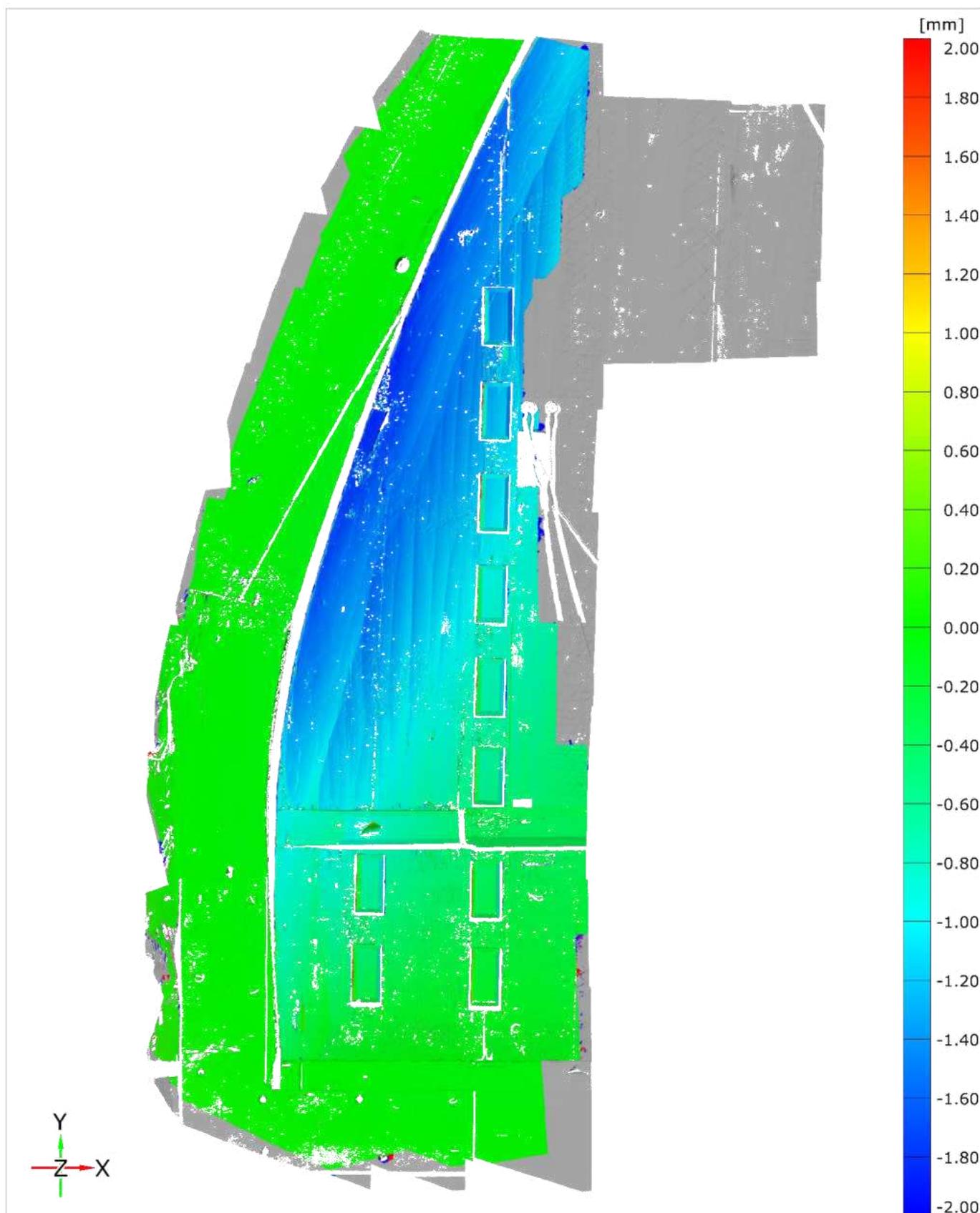
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 15.02.2024 (Soll), 15.03.2024 (Ist)



Freising | Tafelgemälde Rückseite | 15.03.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



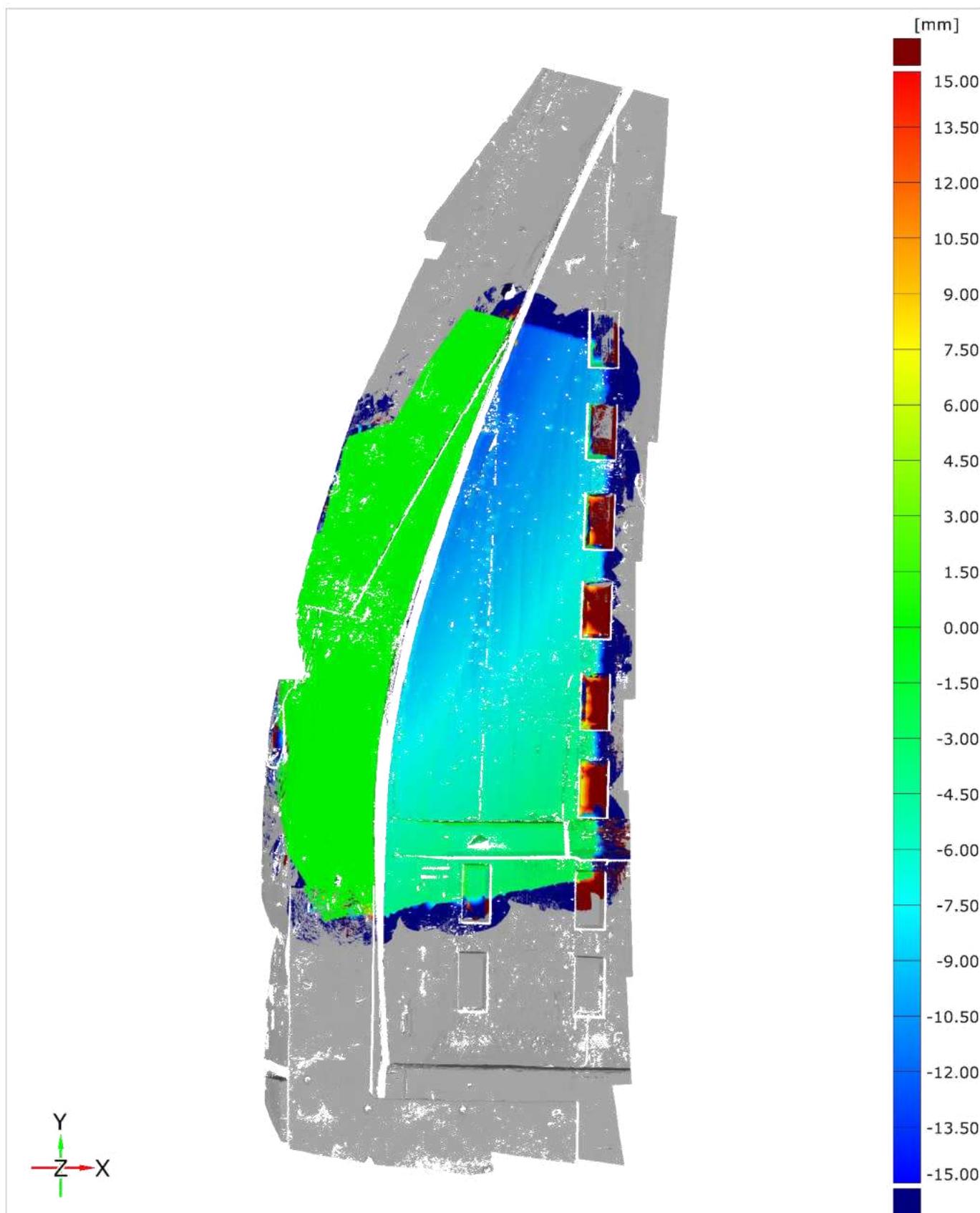
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

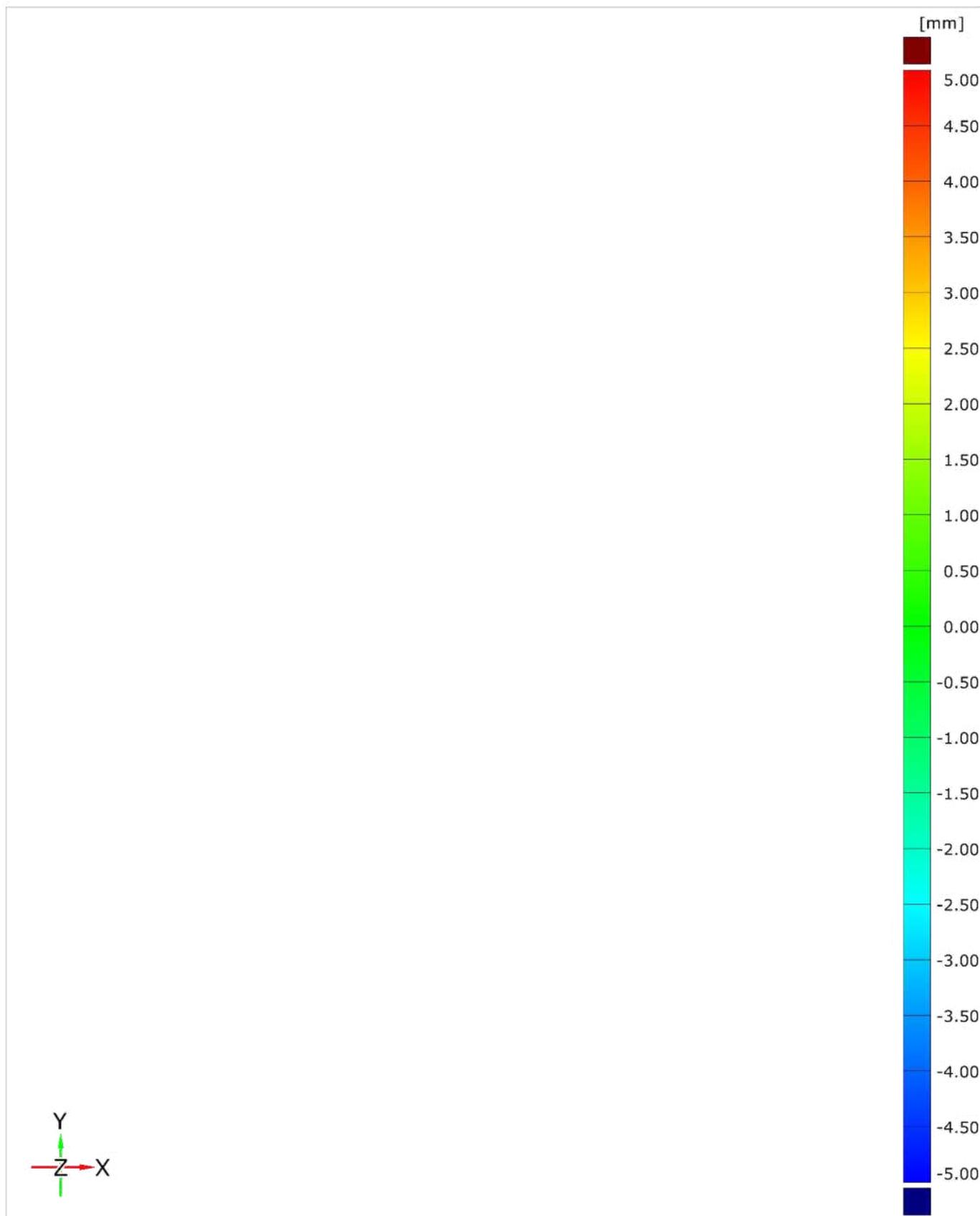
Freising | Tafelgemälde Rückseite | 19.05.2022 (Soll), 12.12.2022 (Ist)



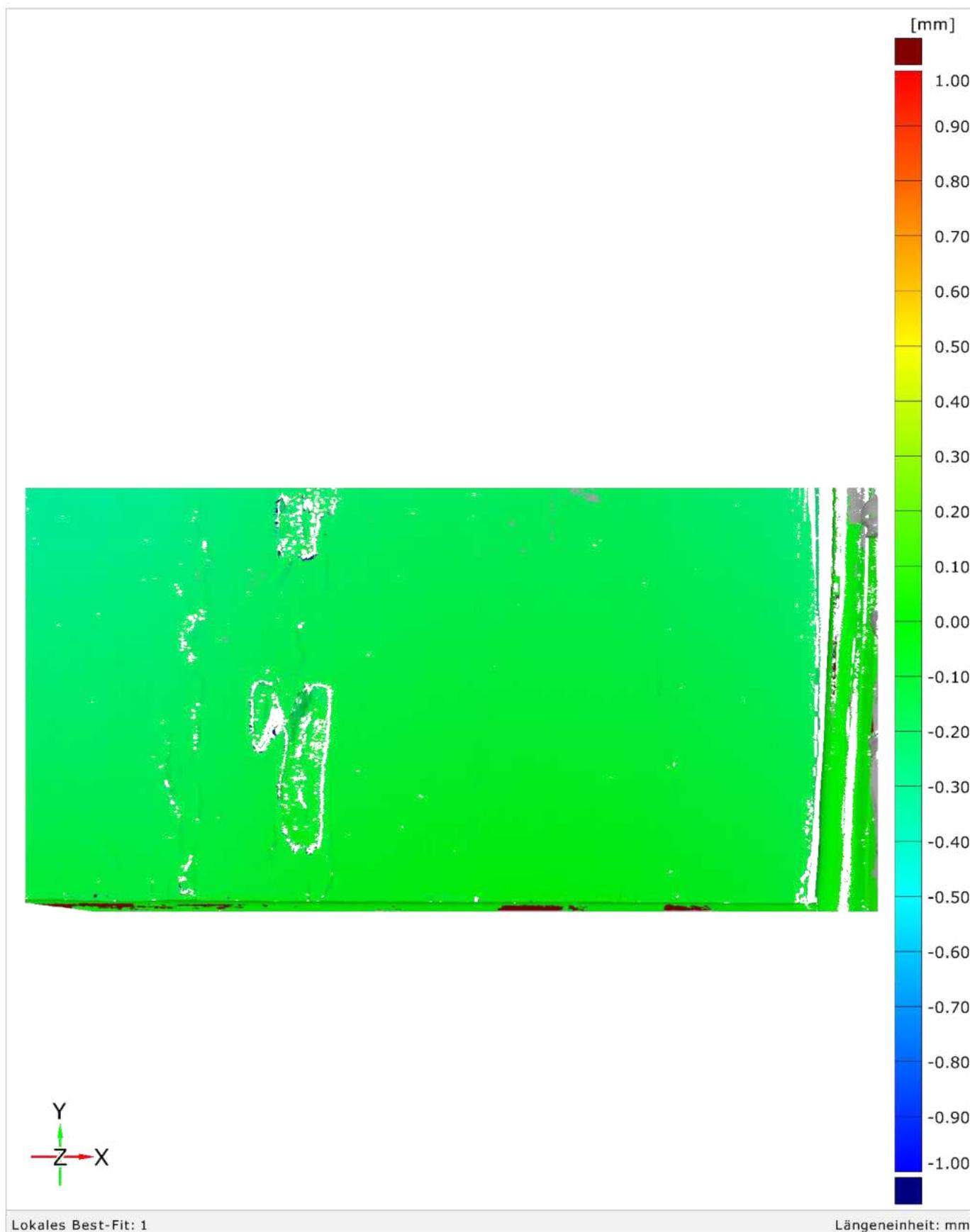
Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

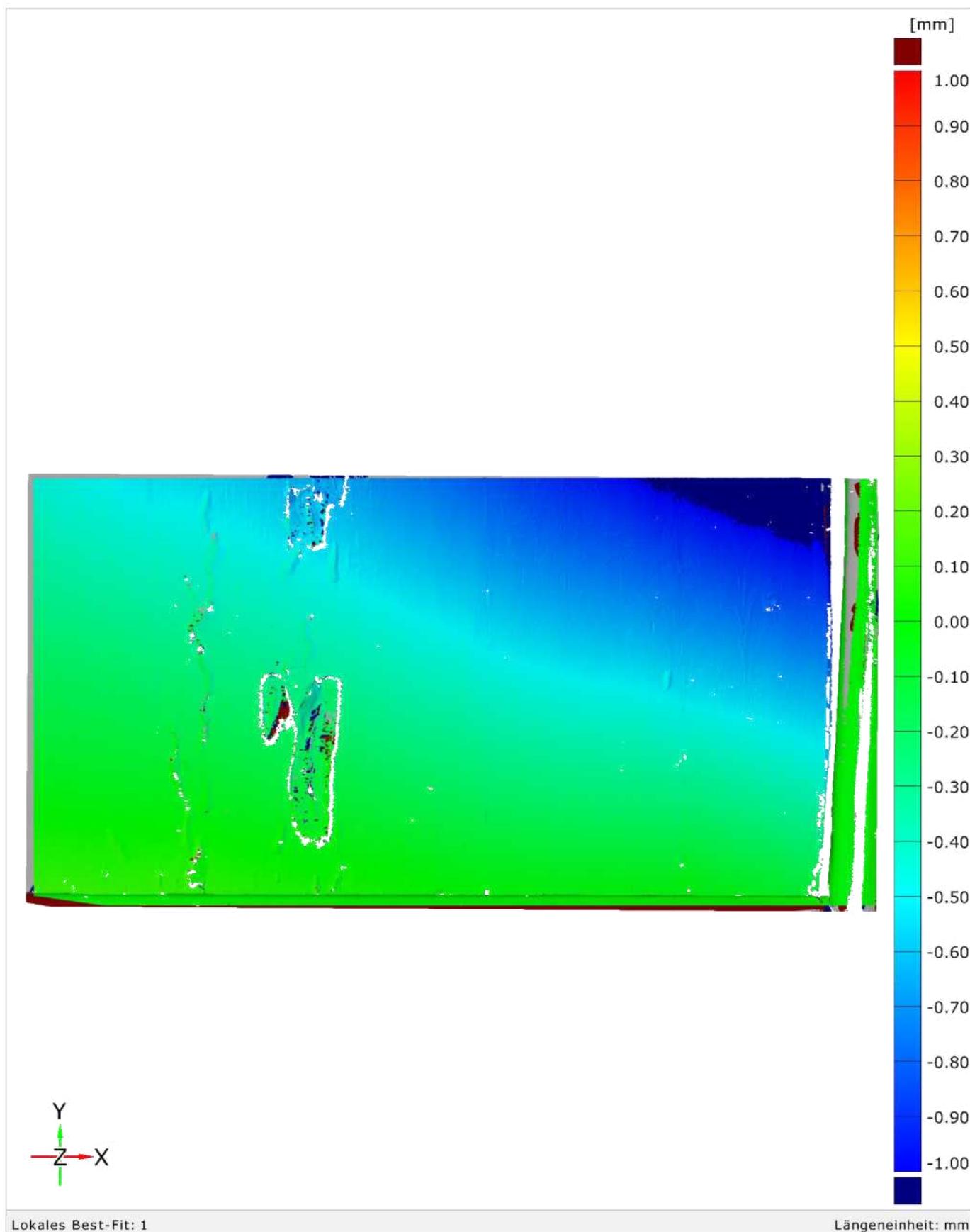
Freising | Tafelgemälde Rechts unten |



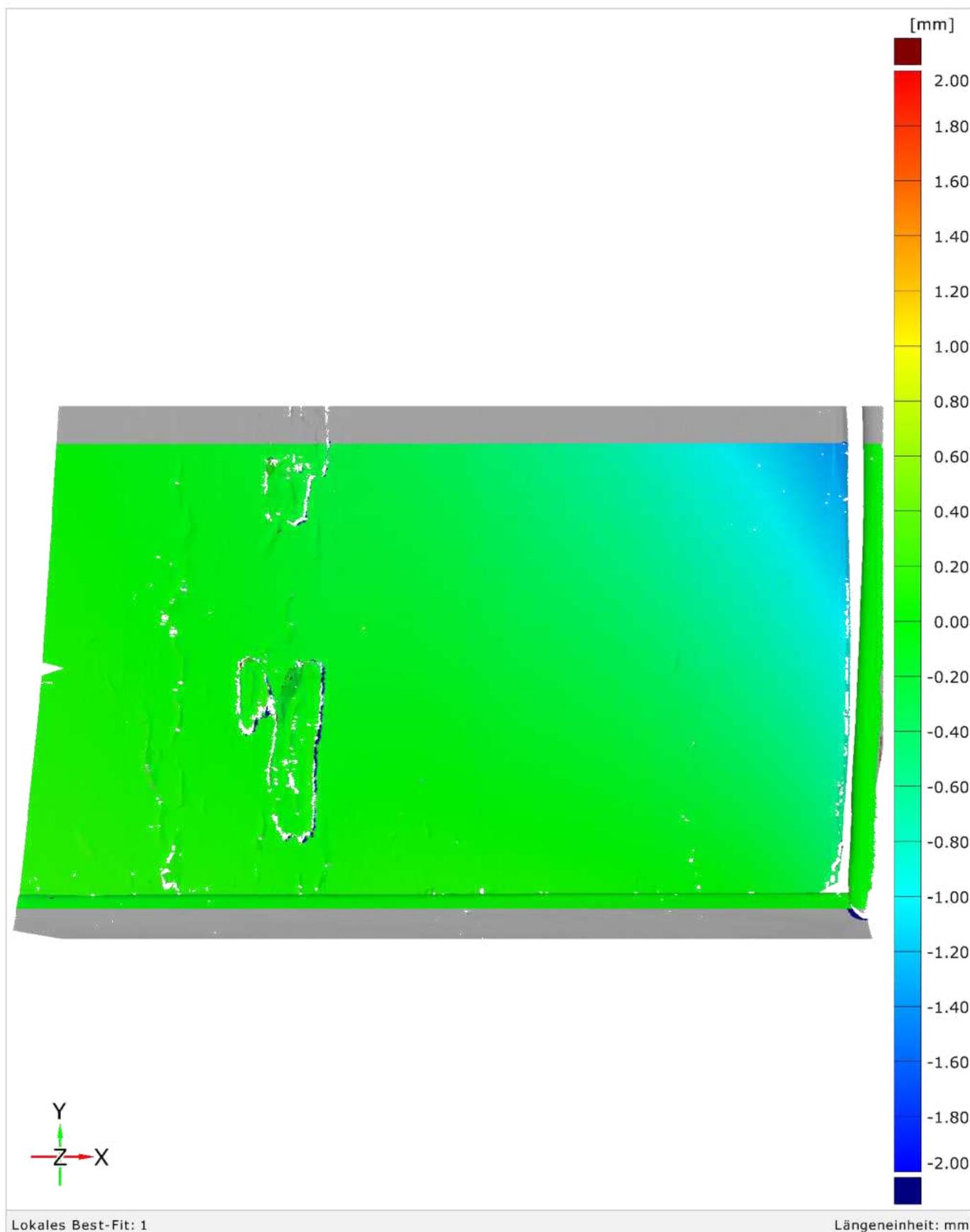
Freising | Tafelgemälde Rechts Unten | 14.07.2020 (Soll), 13.10.2020 (Ist)



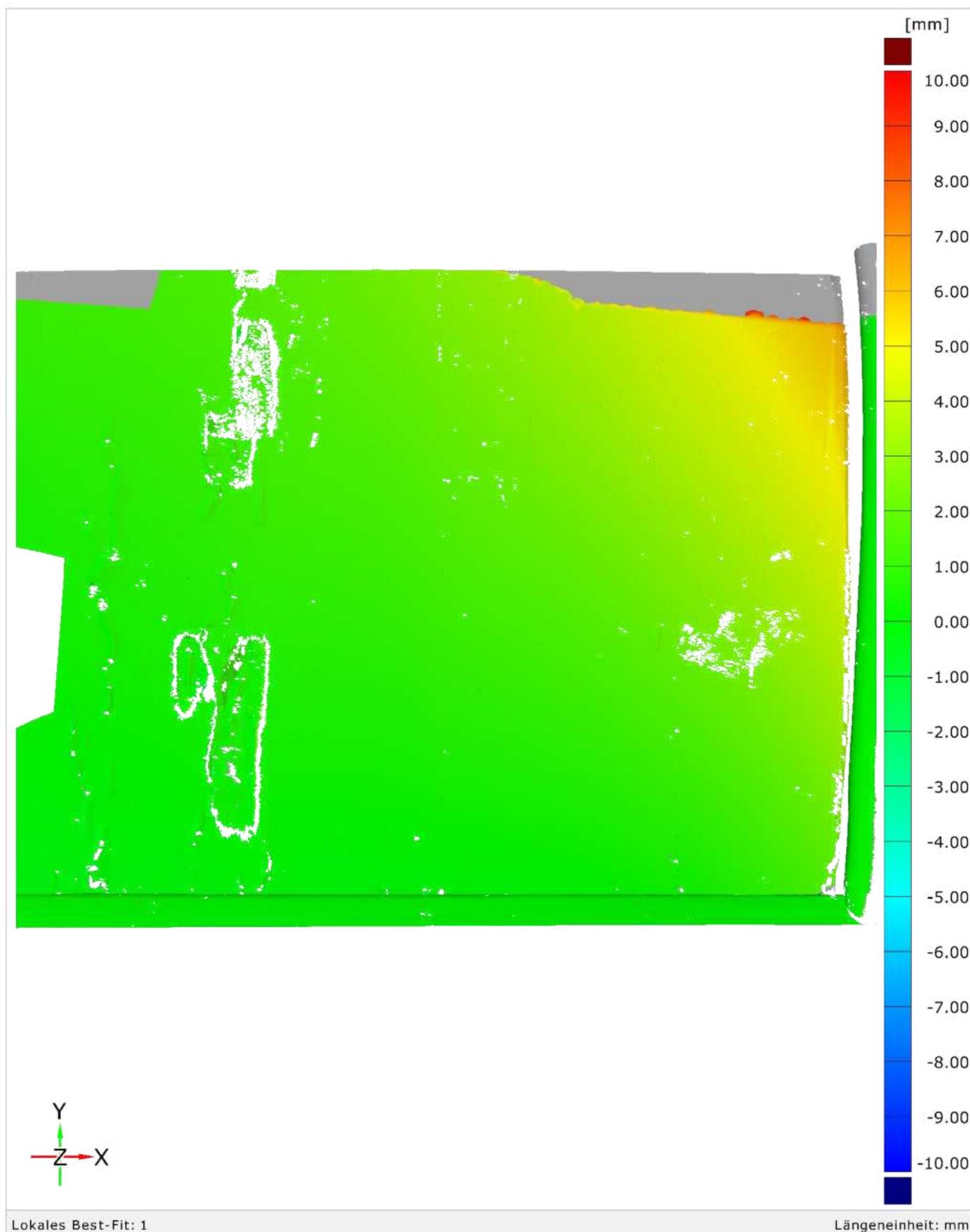
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 13.10.2020 (Soll), 10.12.2020 (Ist)



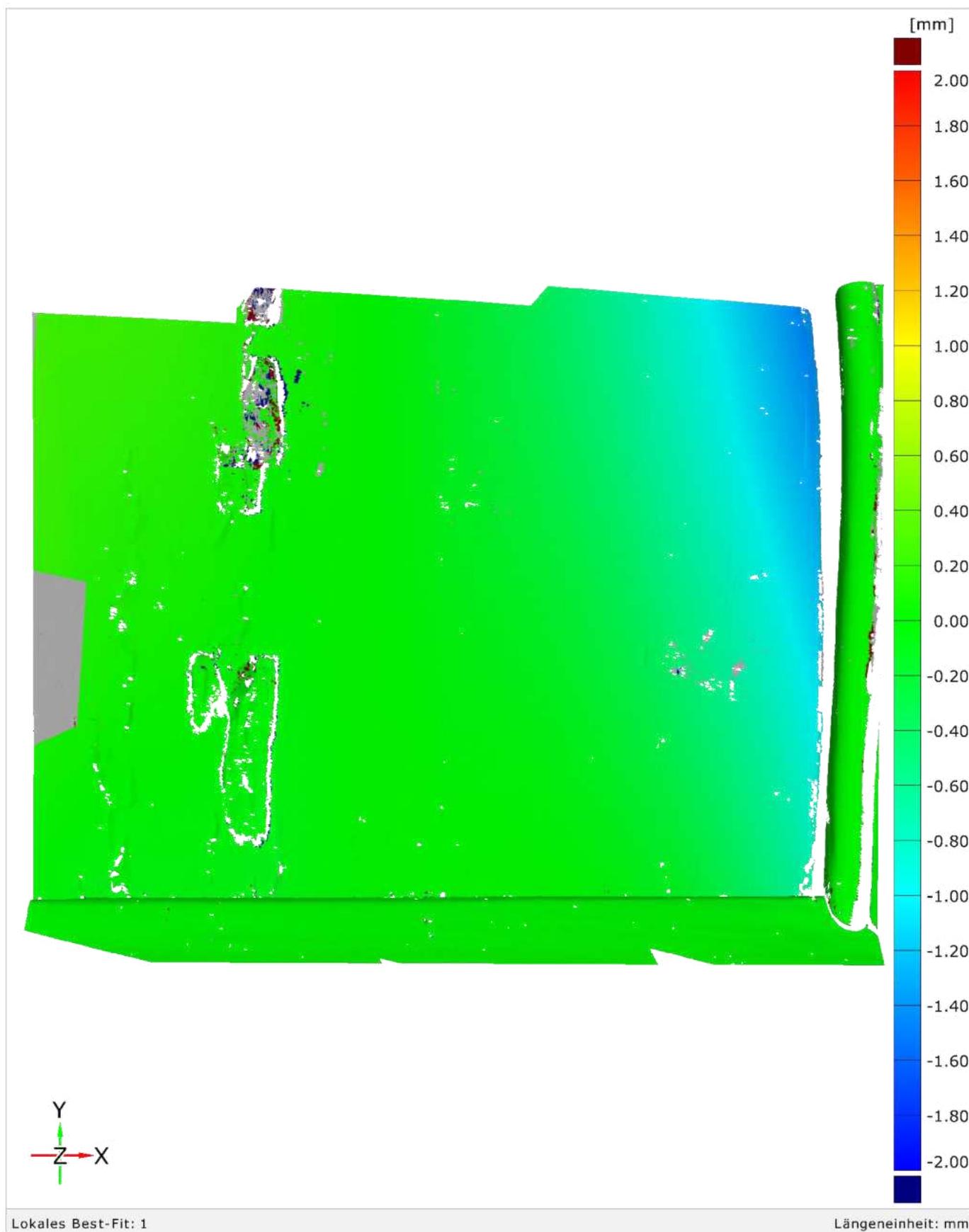
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 10.12.2020 (Soll), 25.03.2021 (Ist)



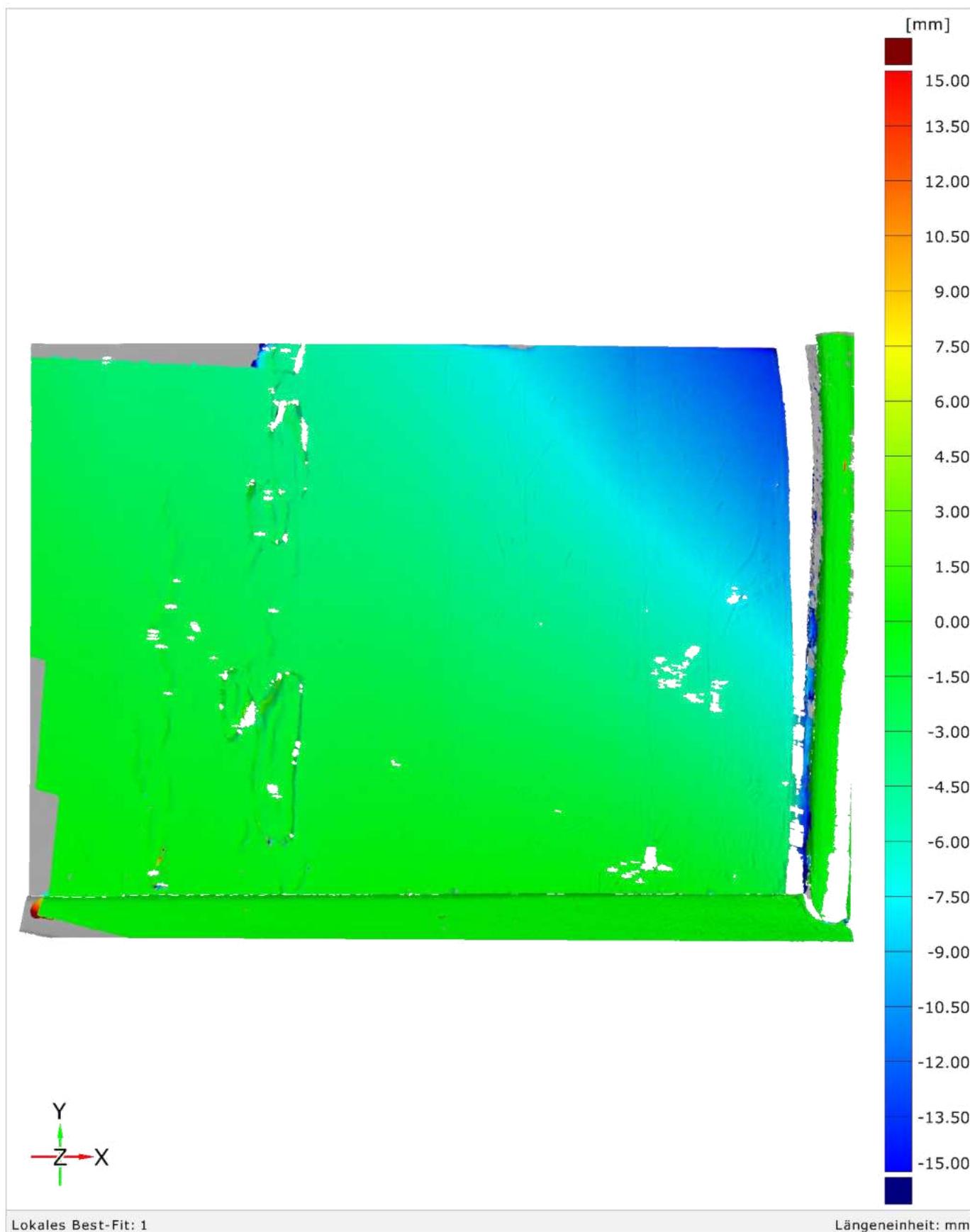
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 25.03.2021 (Soll), 08.07.2021 (Ist)



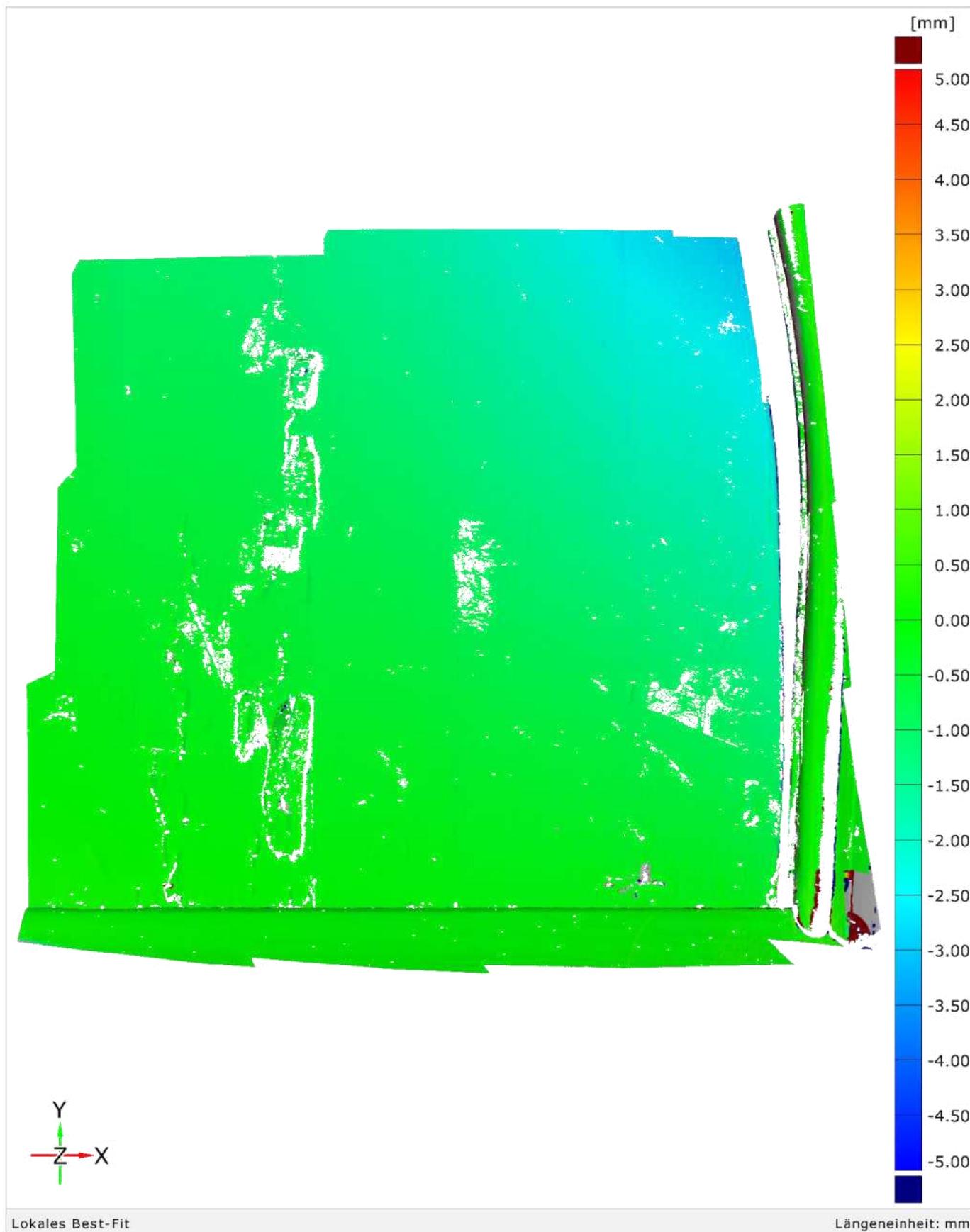
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 08.07.2021 (Soll), 24.09.2021 (Ist)



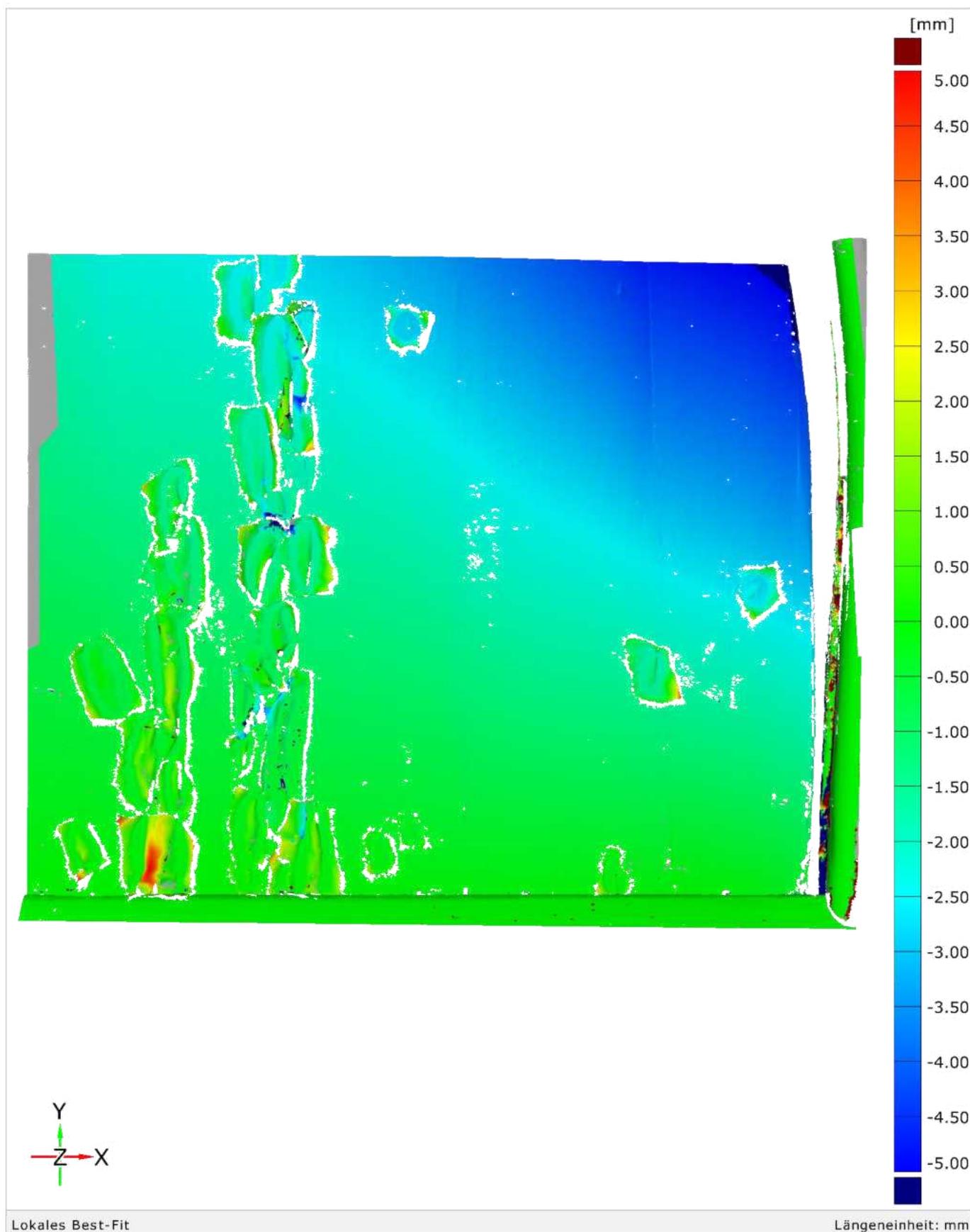
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 24.09.2021 (Soll), 27.01.2022 (Ist)



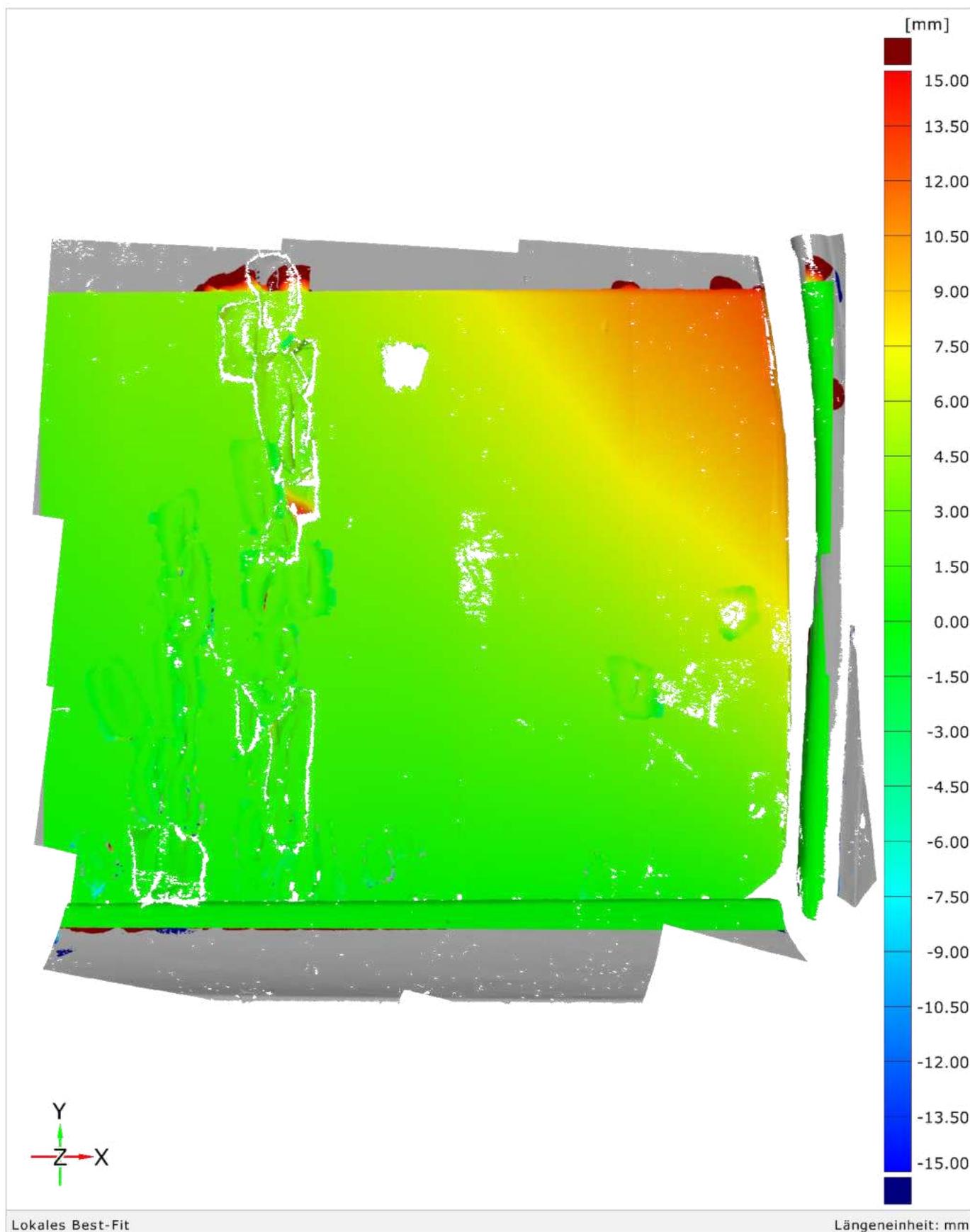
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 27.01.2022 (Soll), 16.02.2022 (Ist)



Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 16.02.2022 (Soll), 24.03.2022 (Ist)



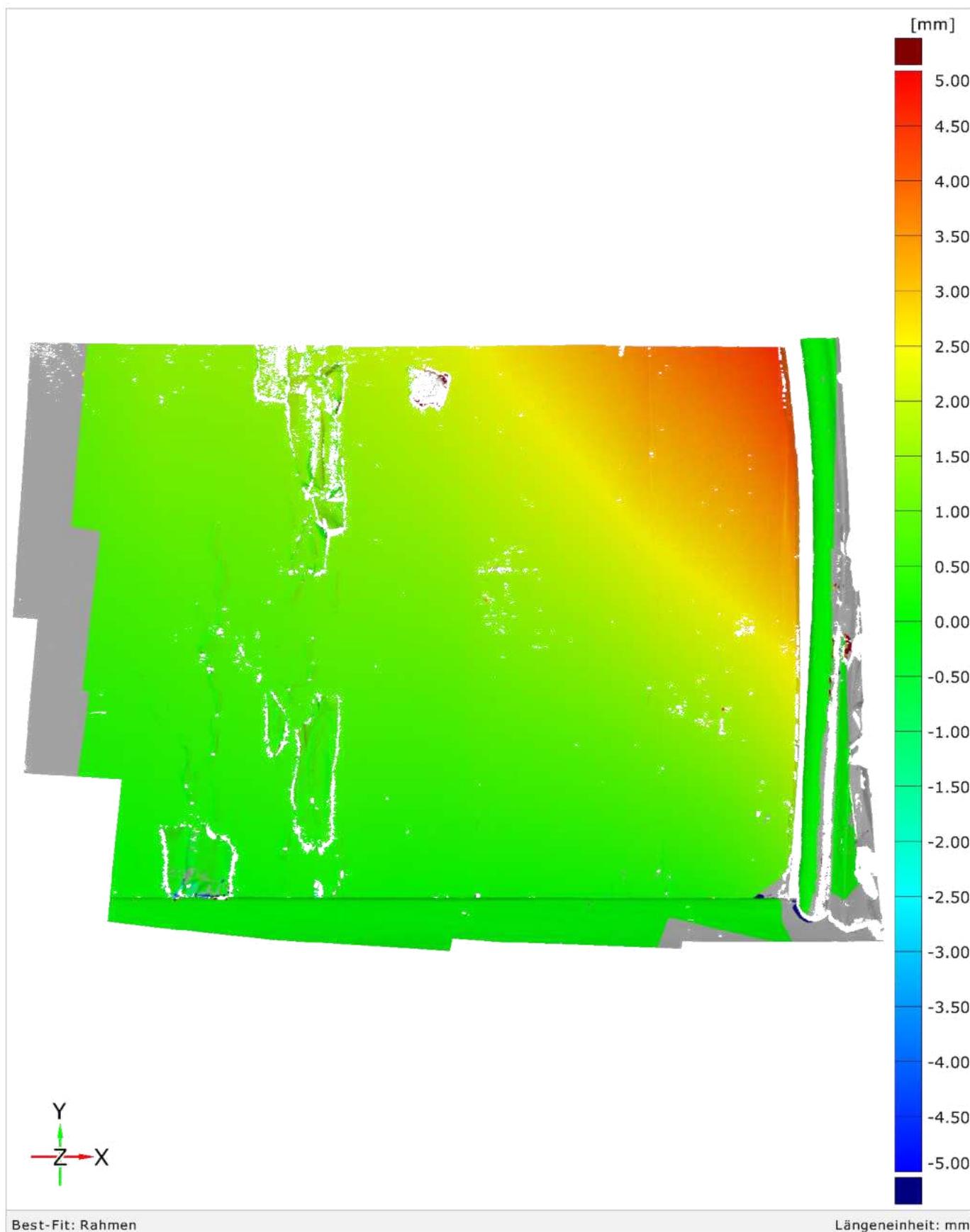
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 24.03.2022 (Soll), 19.05.2022 (Ist)



Lokales Best-Fit

Längeneinheit: mm

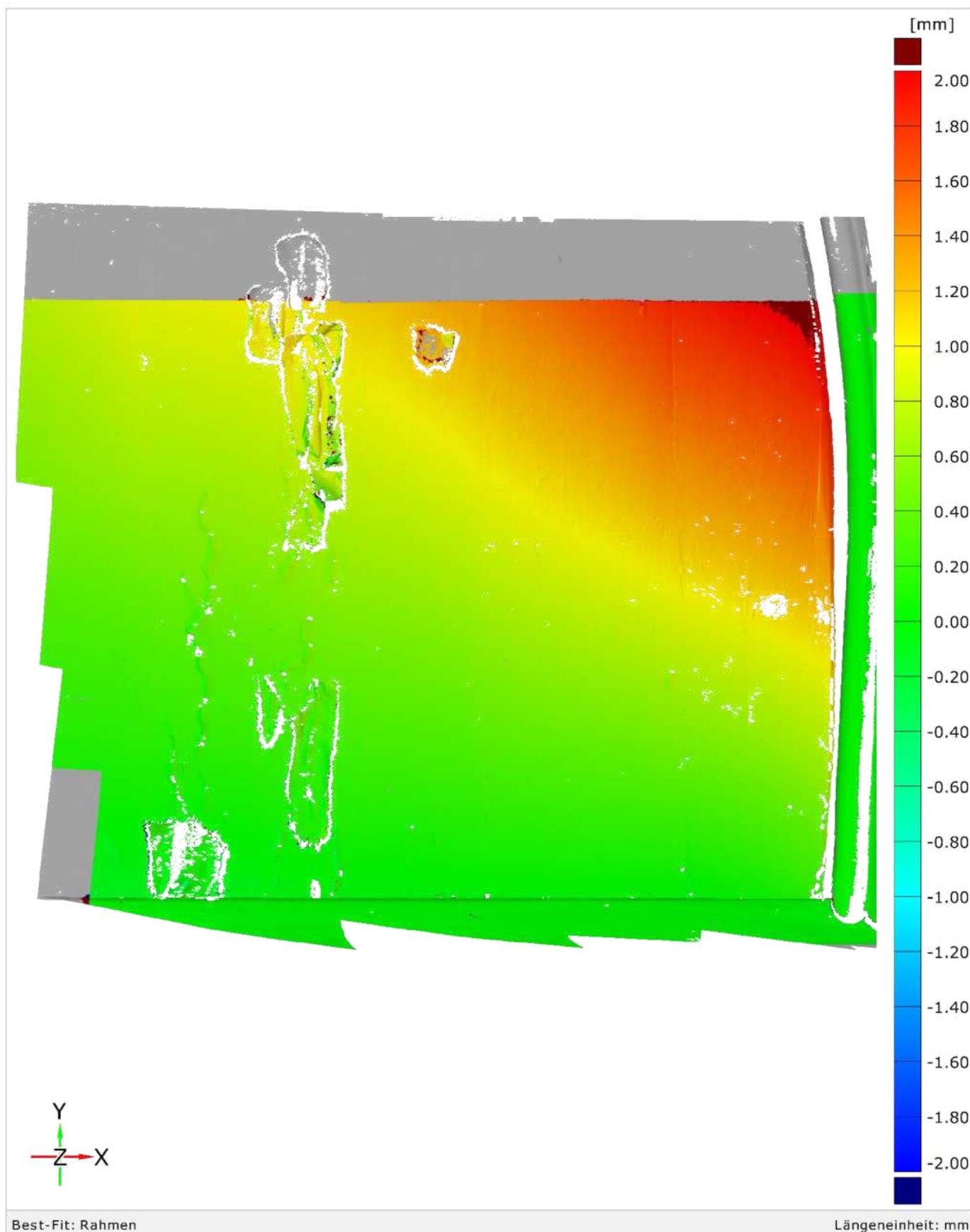
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 19.05.2022 (Soll), 13.06.2022 (Ist)



Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

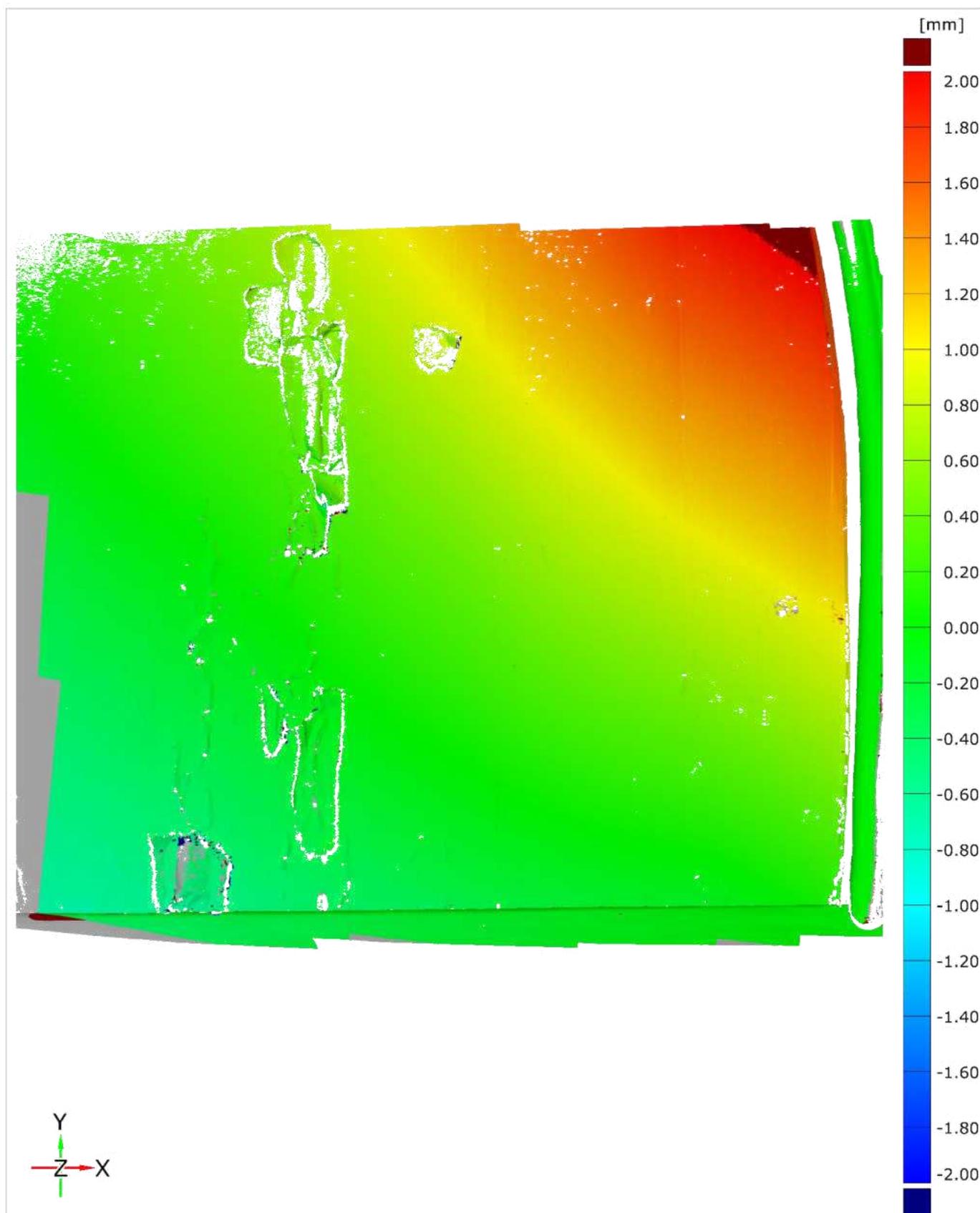
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 13.06.2022 (Soll), 24.08.2022 (Ist)



Best-Fit: Rahmen

Längeneinheit: mm

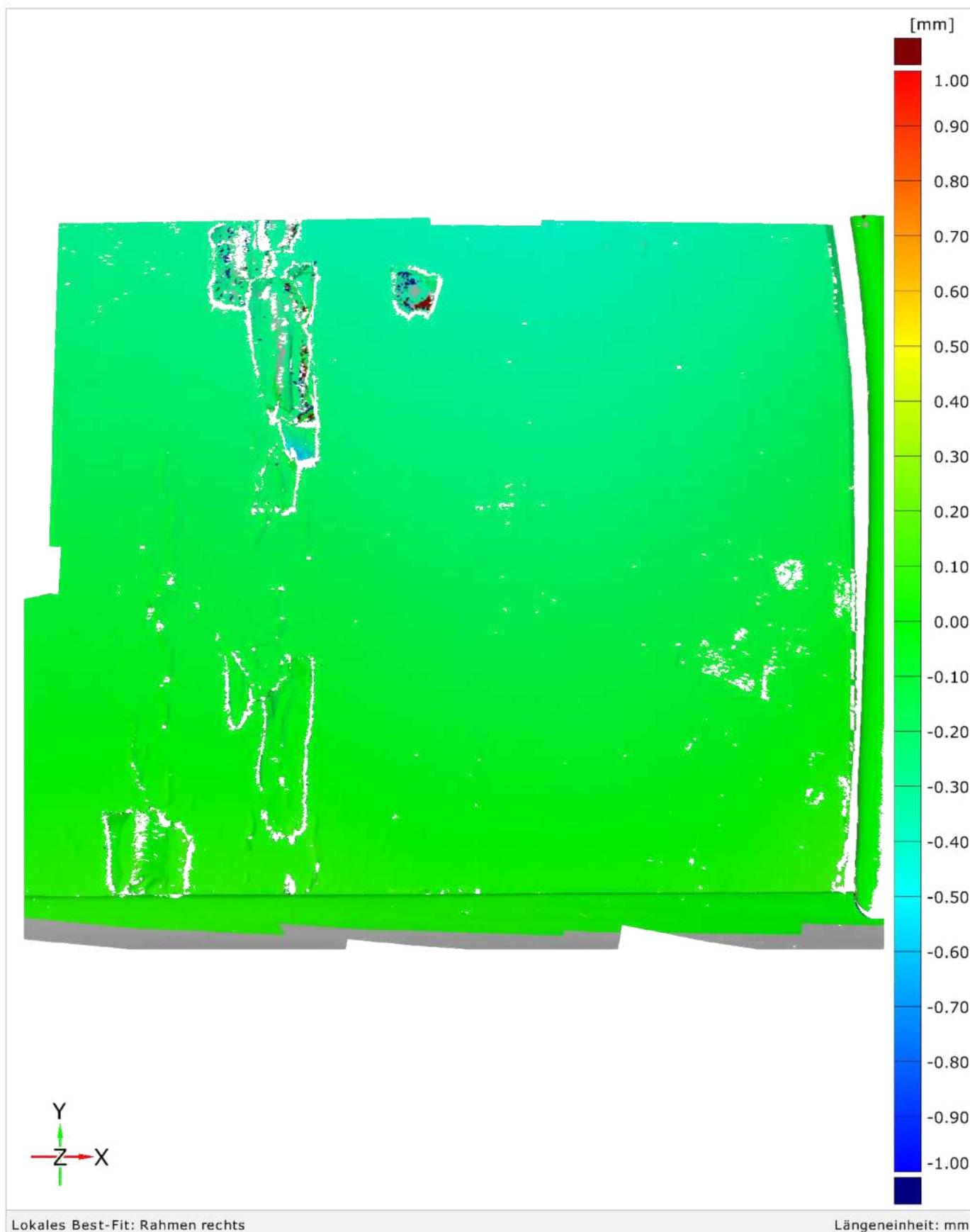
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 28.08.2022 (Soll), 12.12.2022 (Ist)



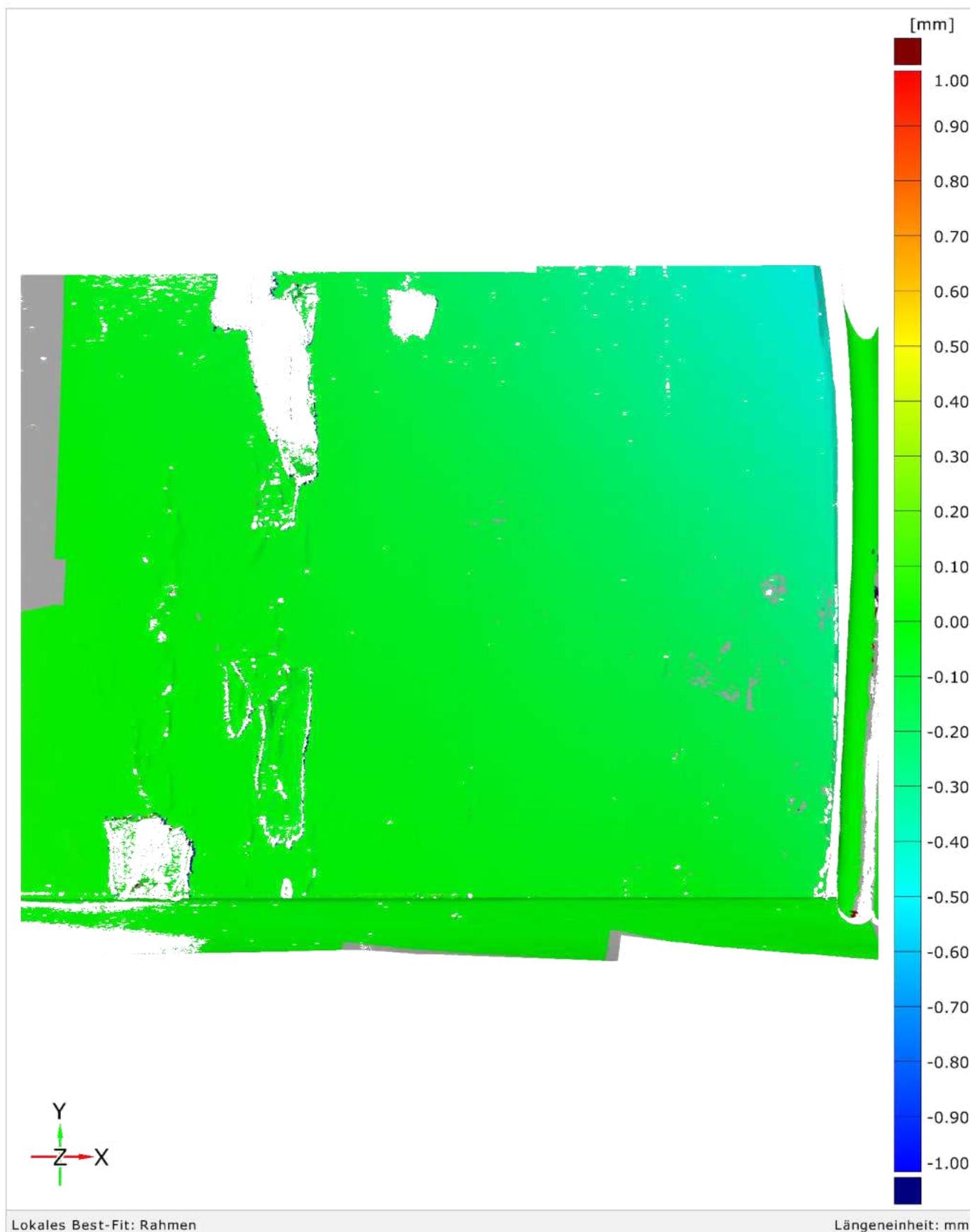
Lokales Best-Fit: Rahmen rechts

Längeneinheit: mm

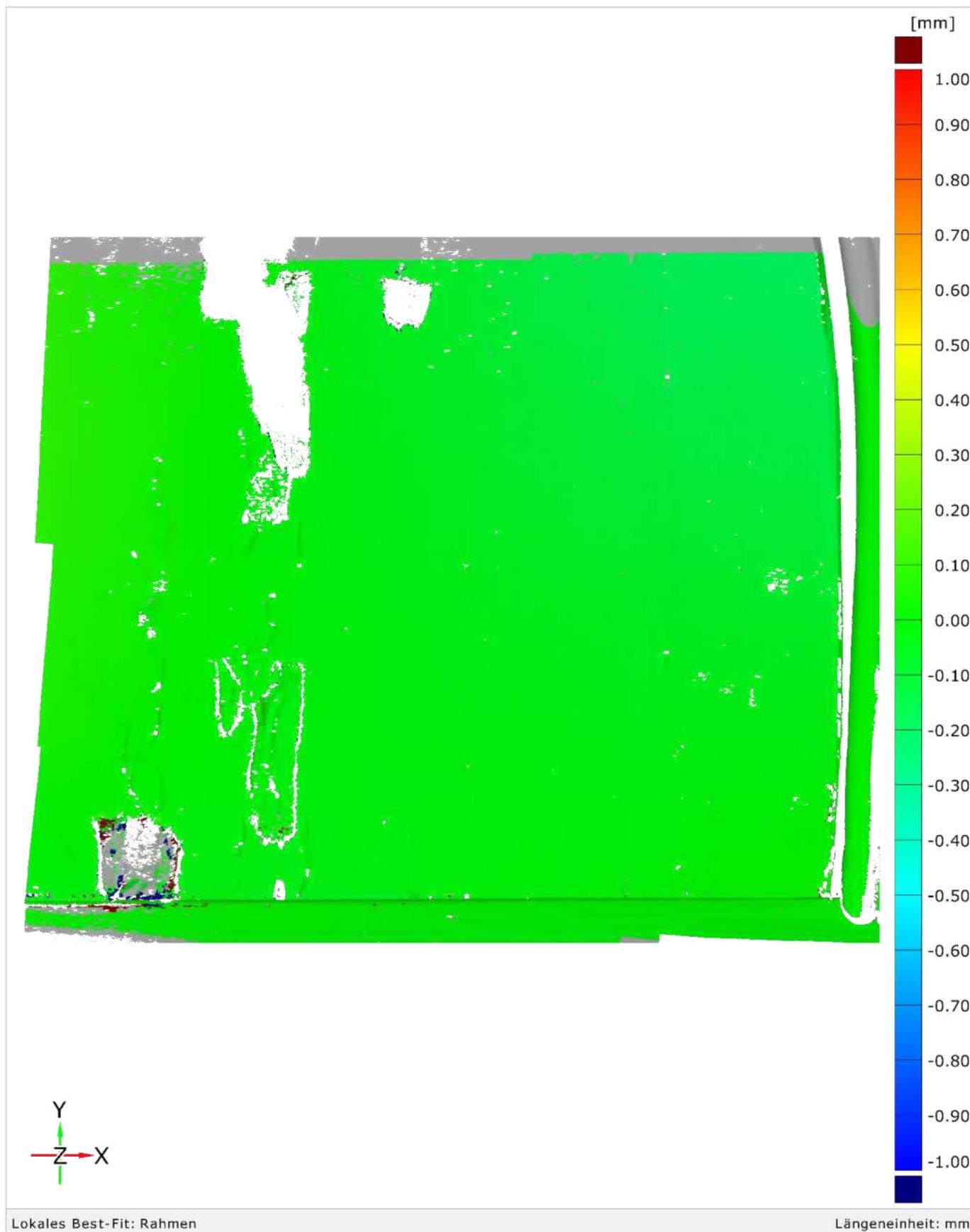
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 12.12.2022 (Soll), 20.02.2023 (Ist)



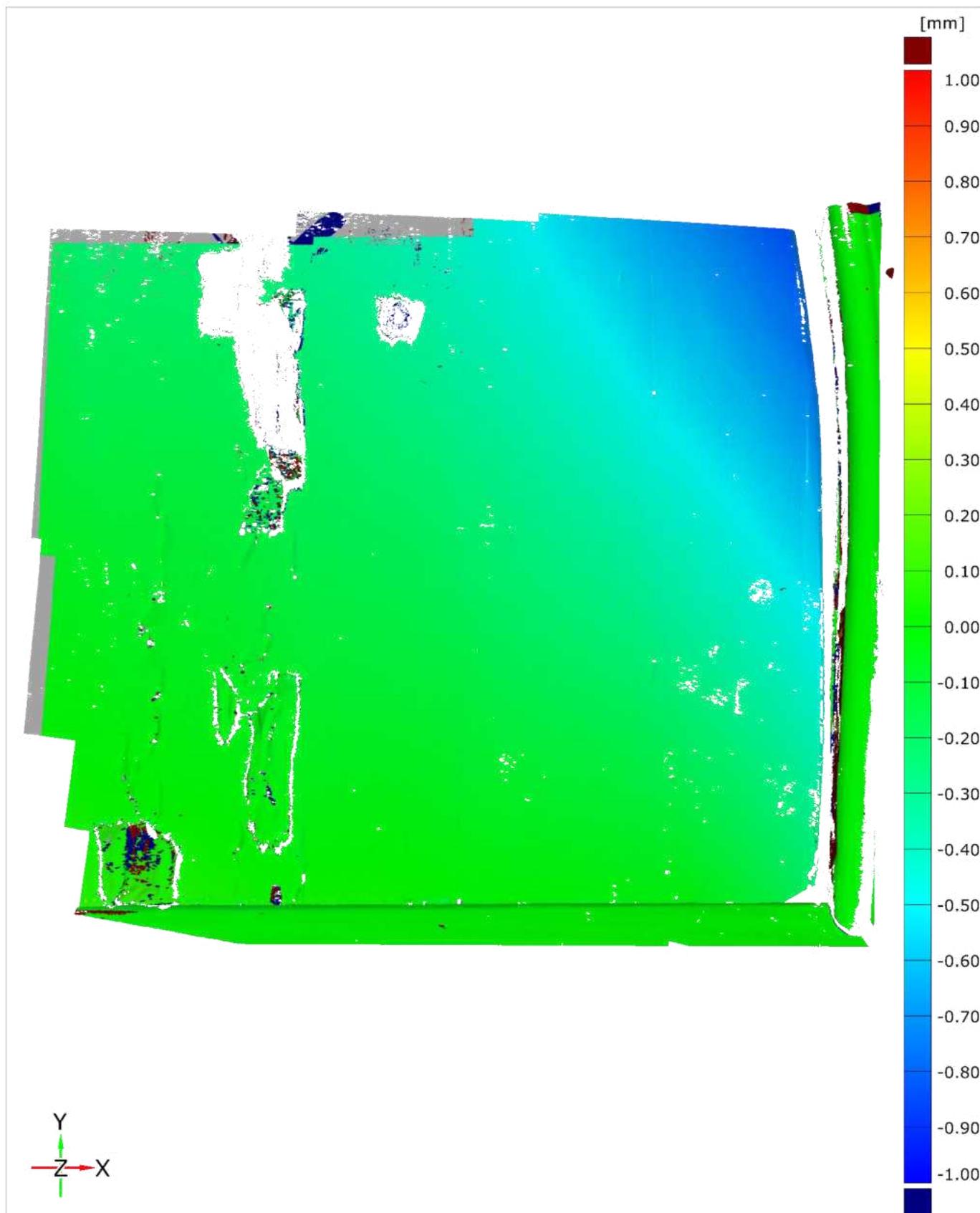
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 20.02.2023 (Soll), 13.03.2023 (Ist)



Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 13.03.2023 (Soll), 30.05.2023



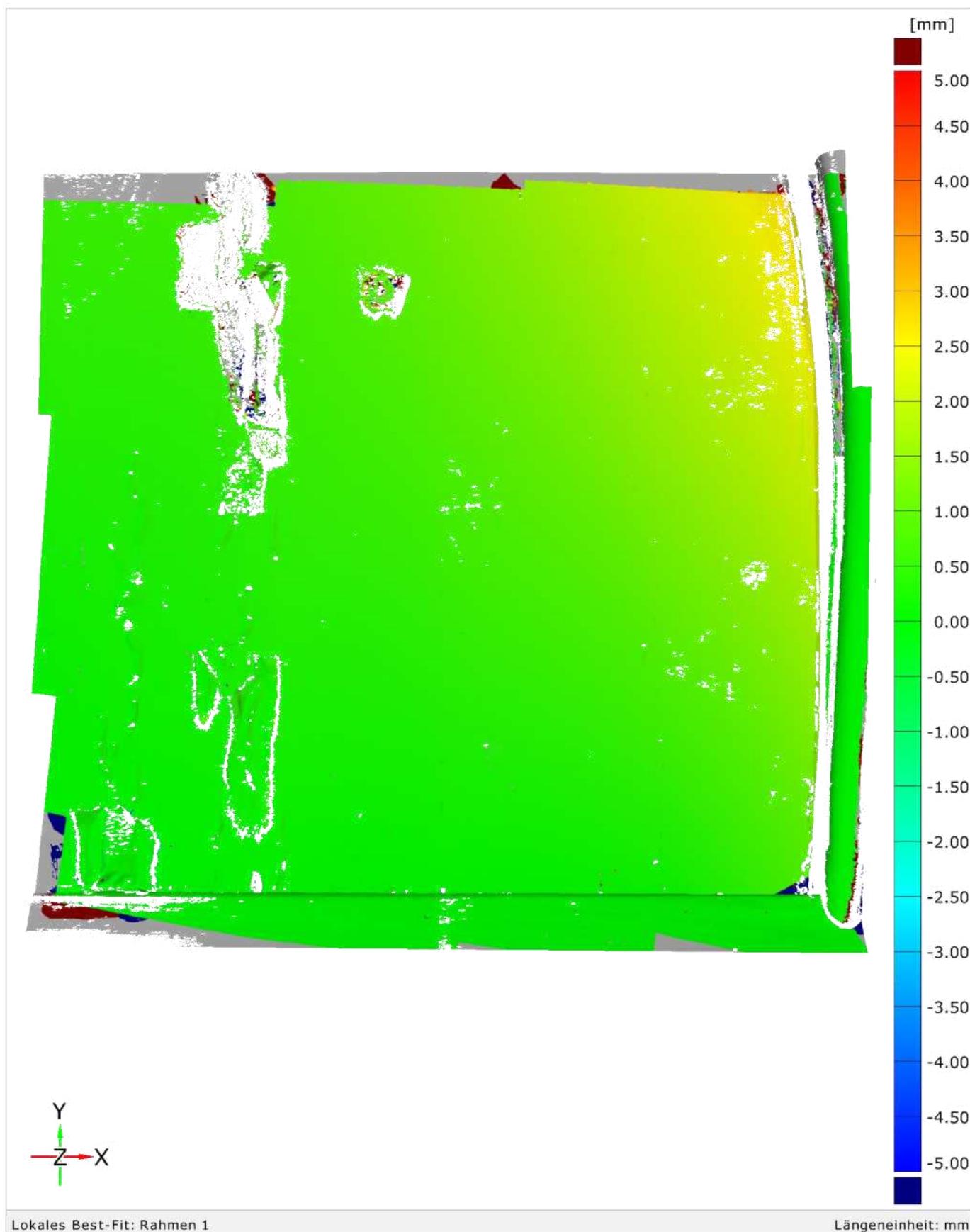
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 30.05.2023 (Soll), 20.06.2023 (Ist)



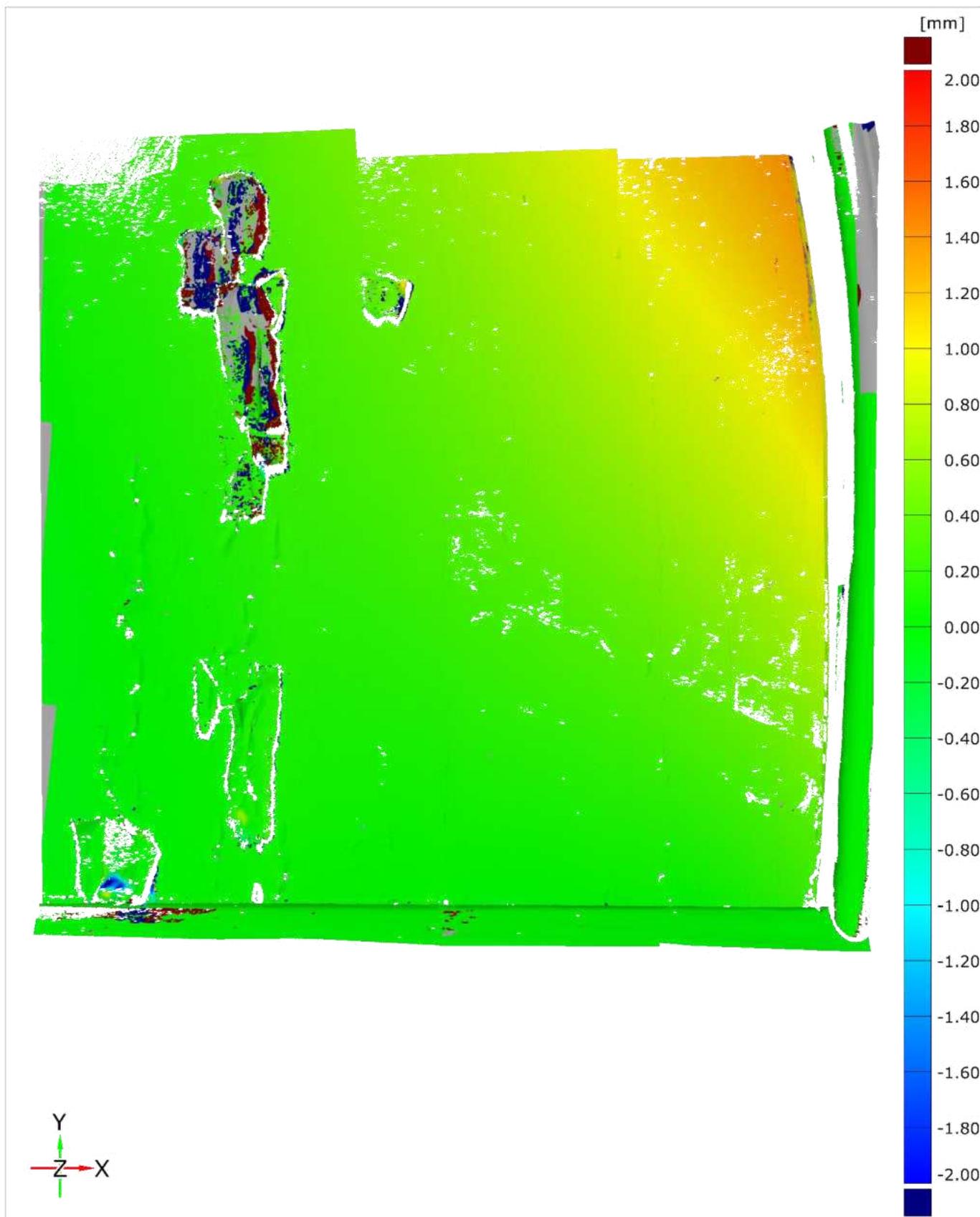
Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 20.06.2023 (Soll), 22.08.2023 (Ist)



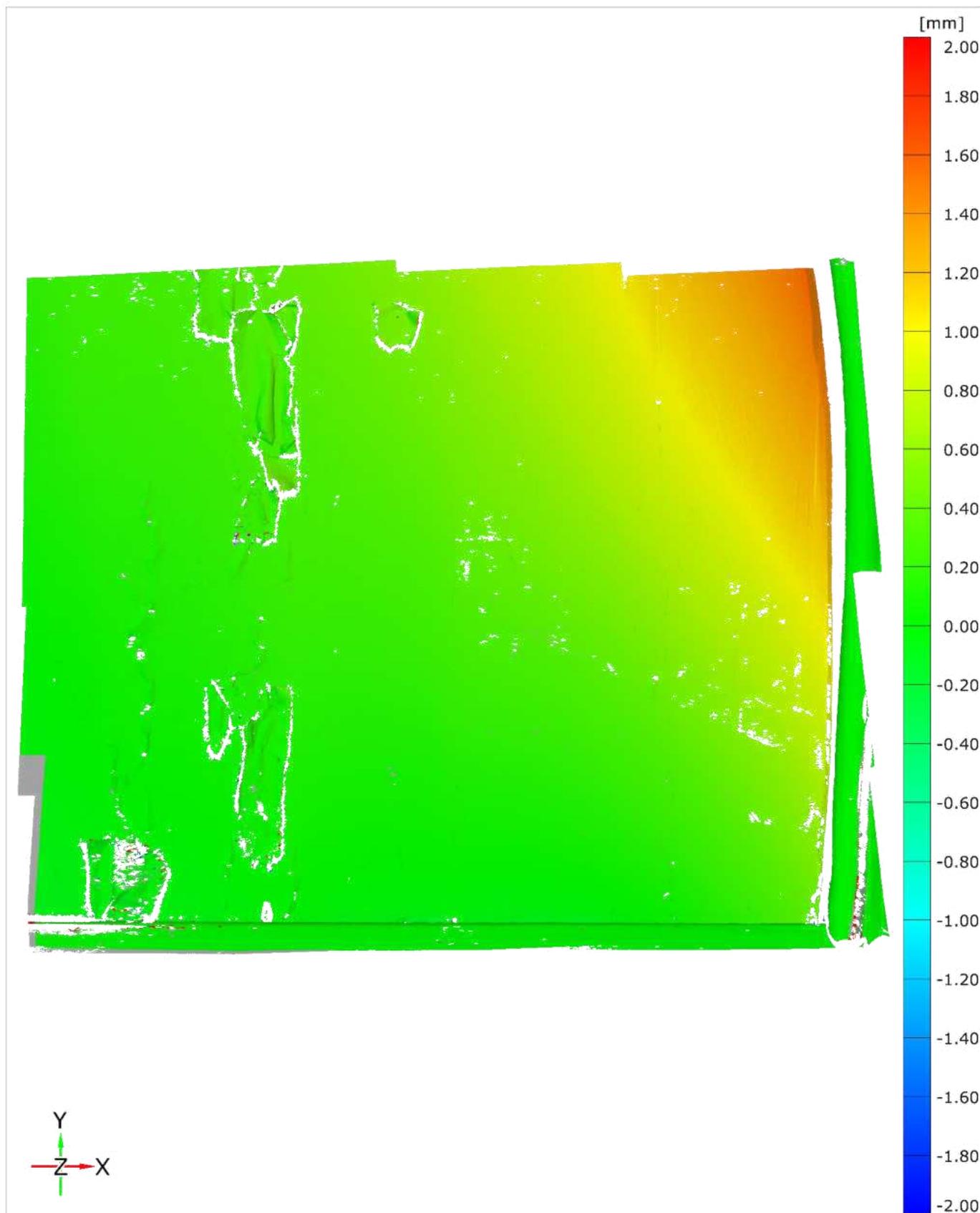
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 22.08.2023 (Soll), 24.01.2024 (Ist)



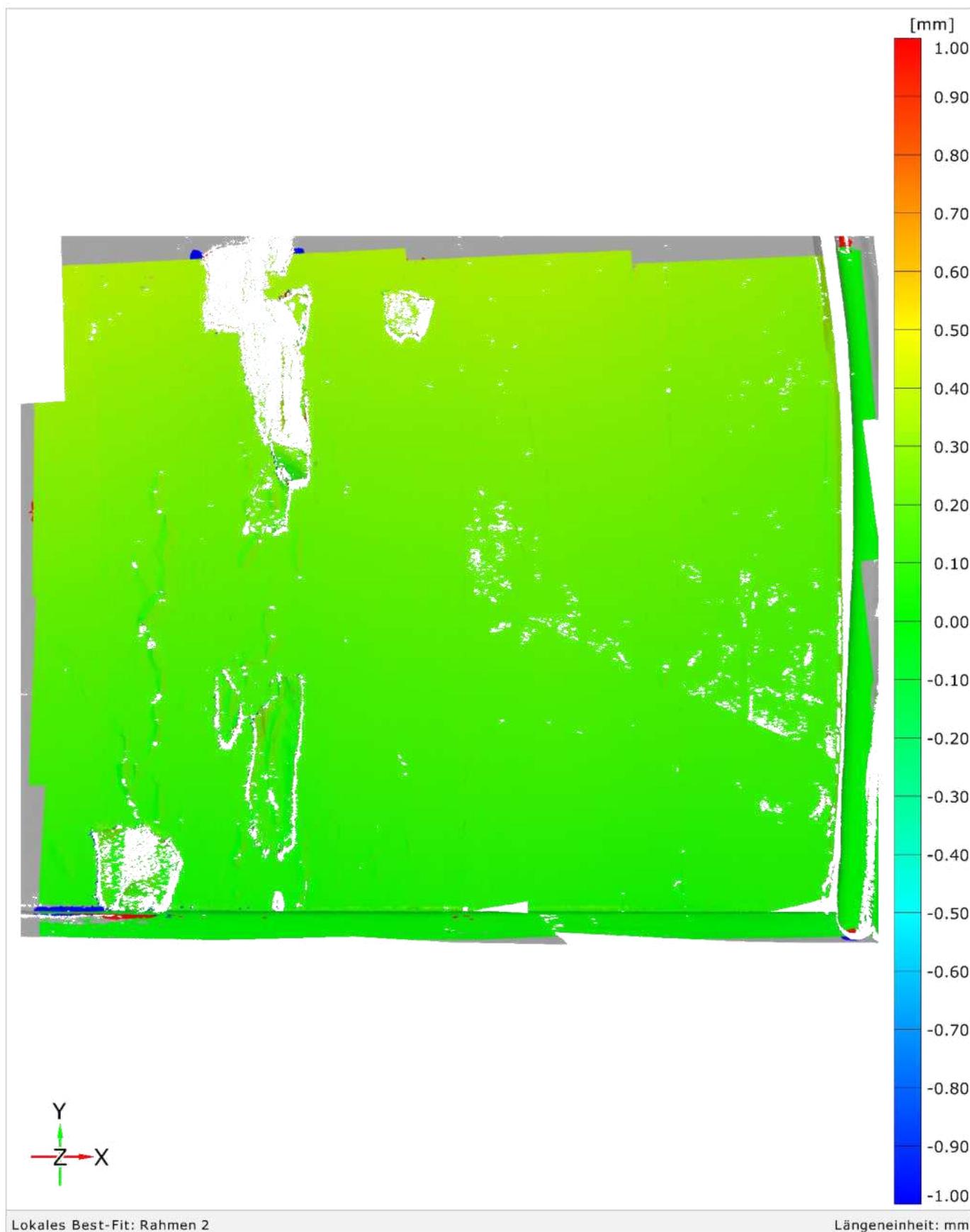
Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

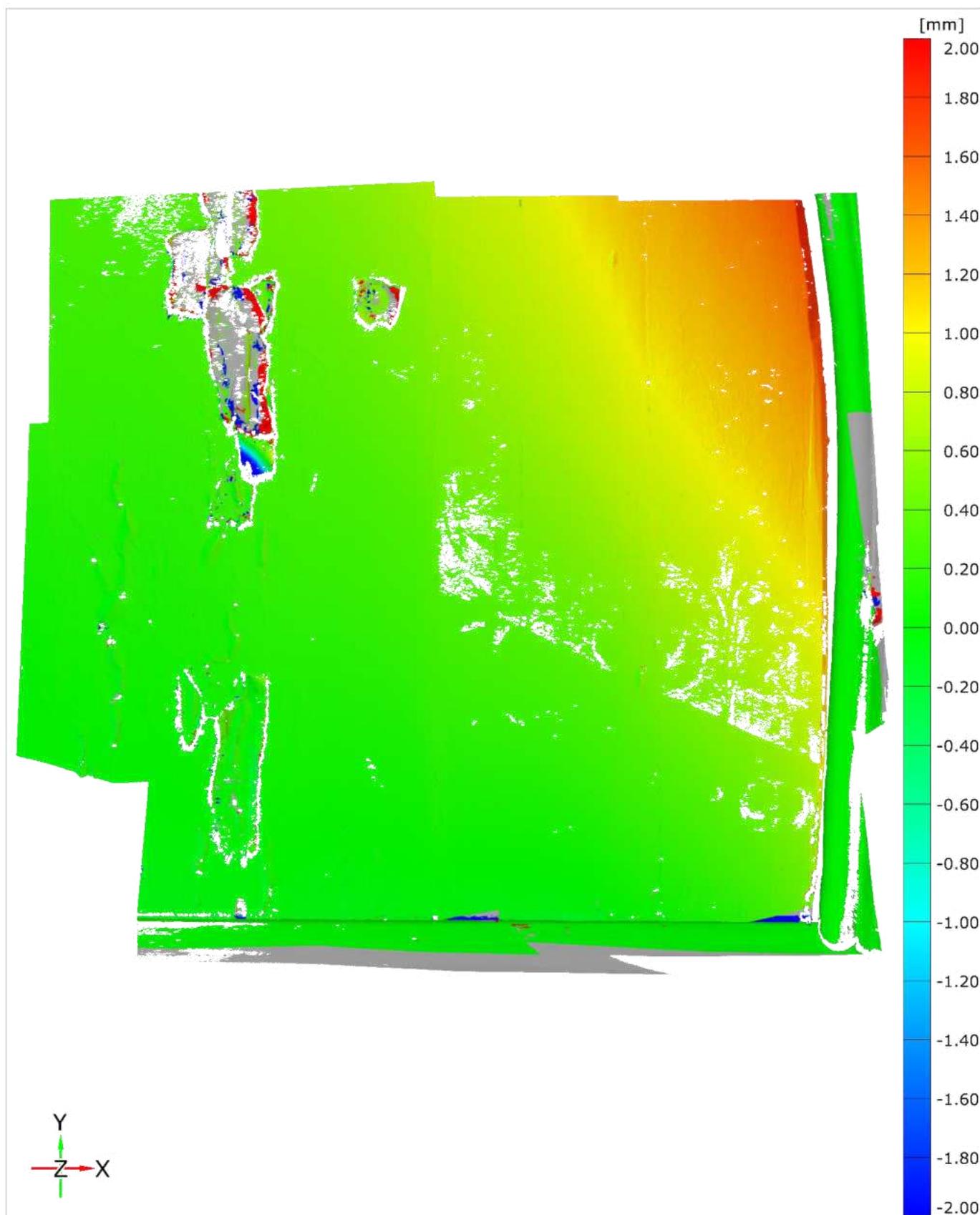
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



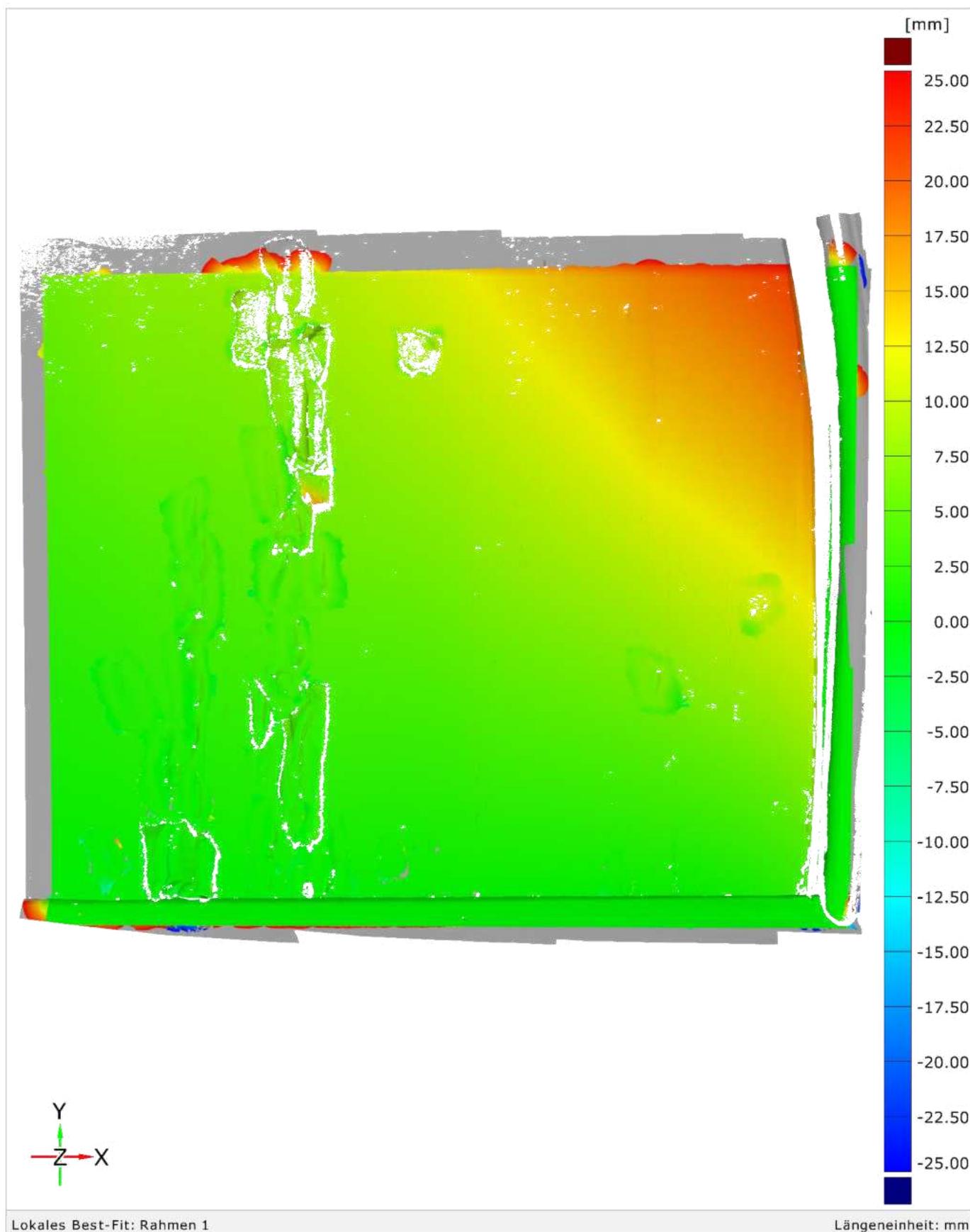
Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

Freising | Tafelgemälde Rechts unten | 24.03.2022 (Soll), 12.12.2022 (Ist)



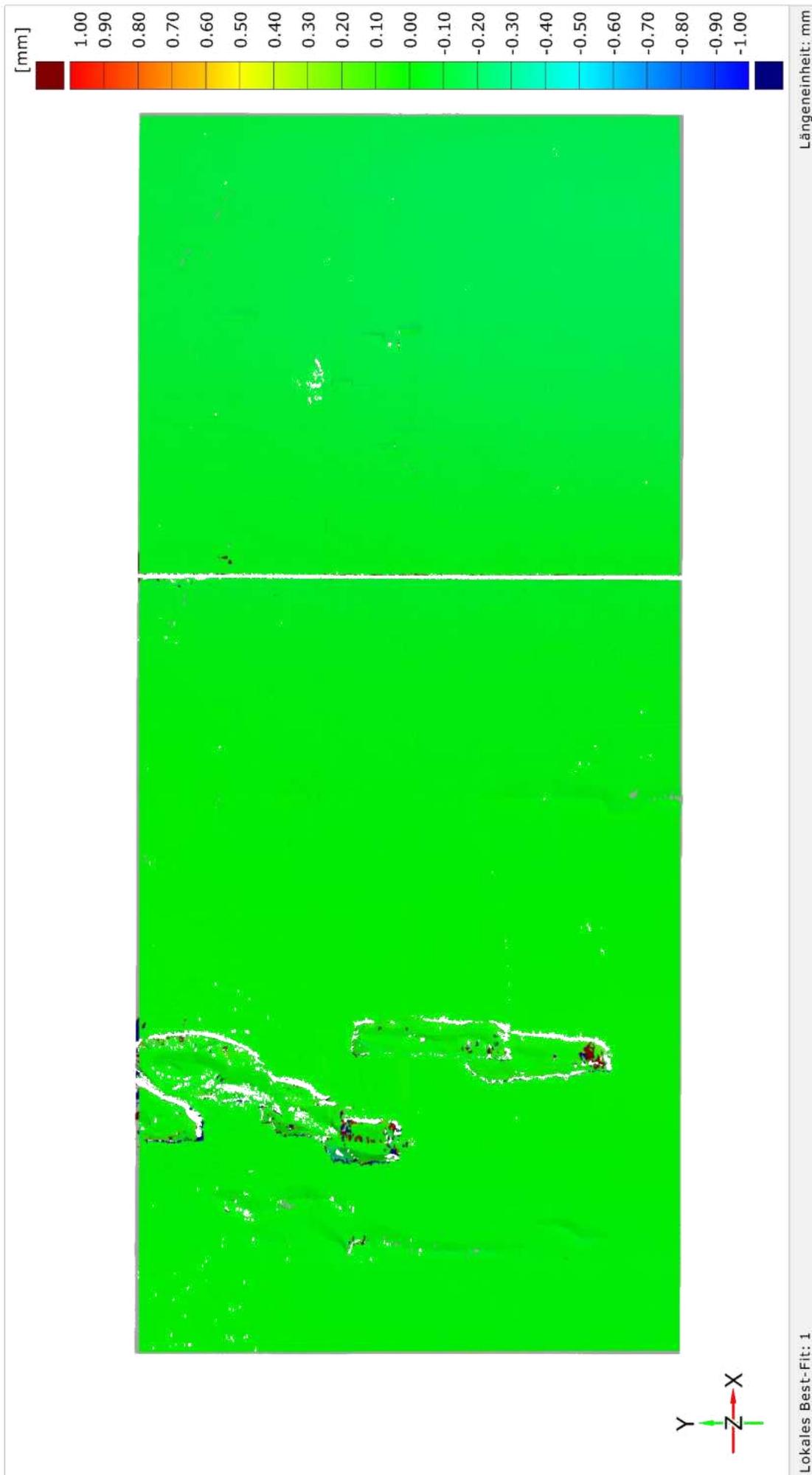
Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

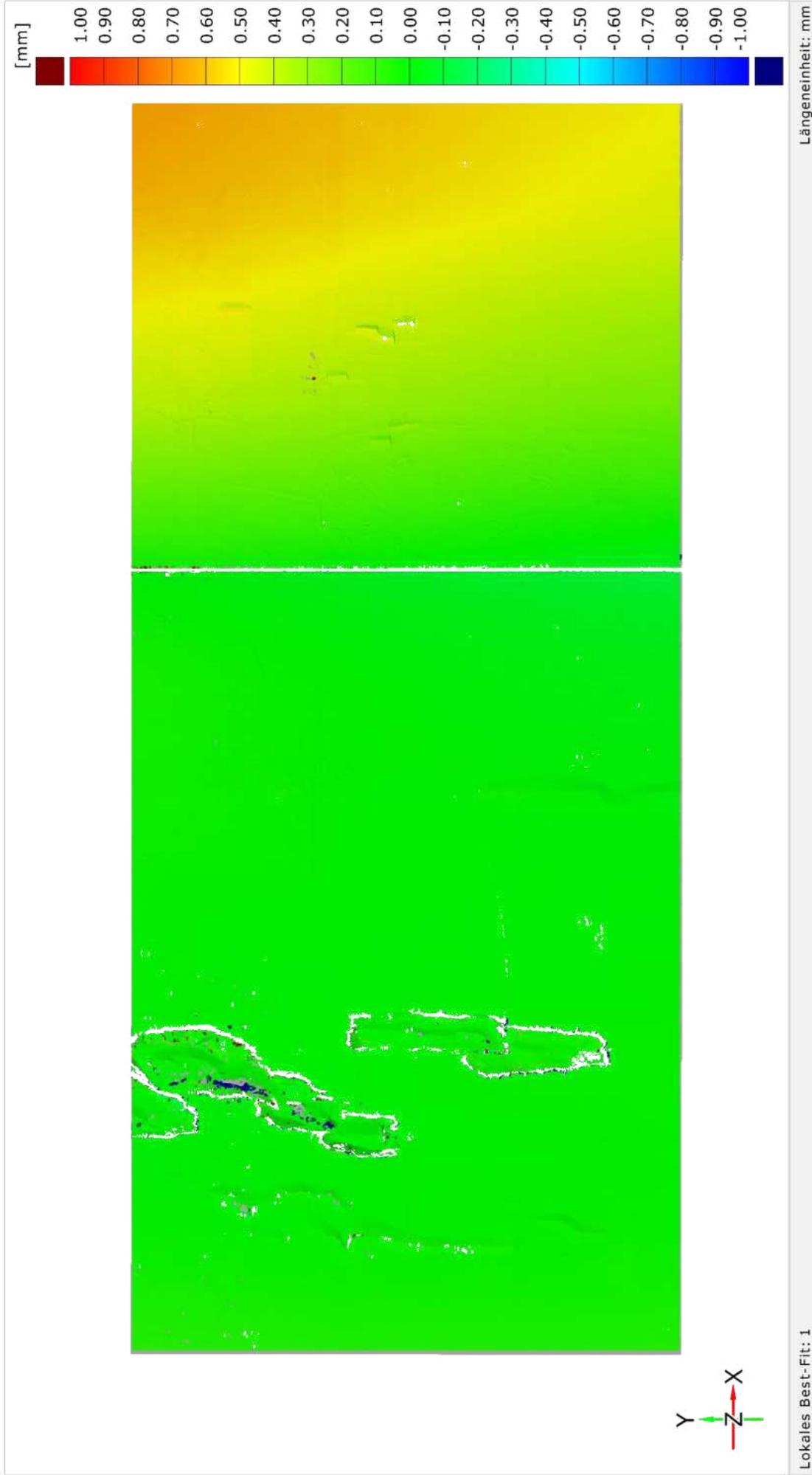
Freising | Tafelgemälde Mitte |



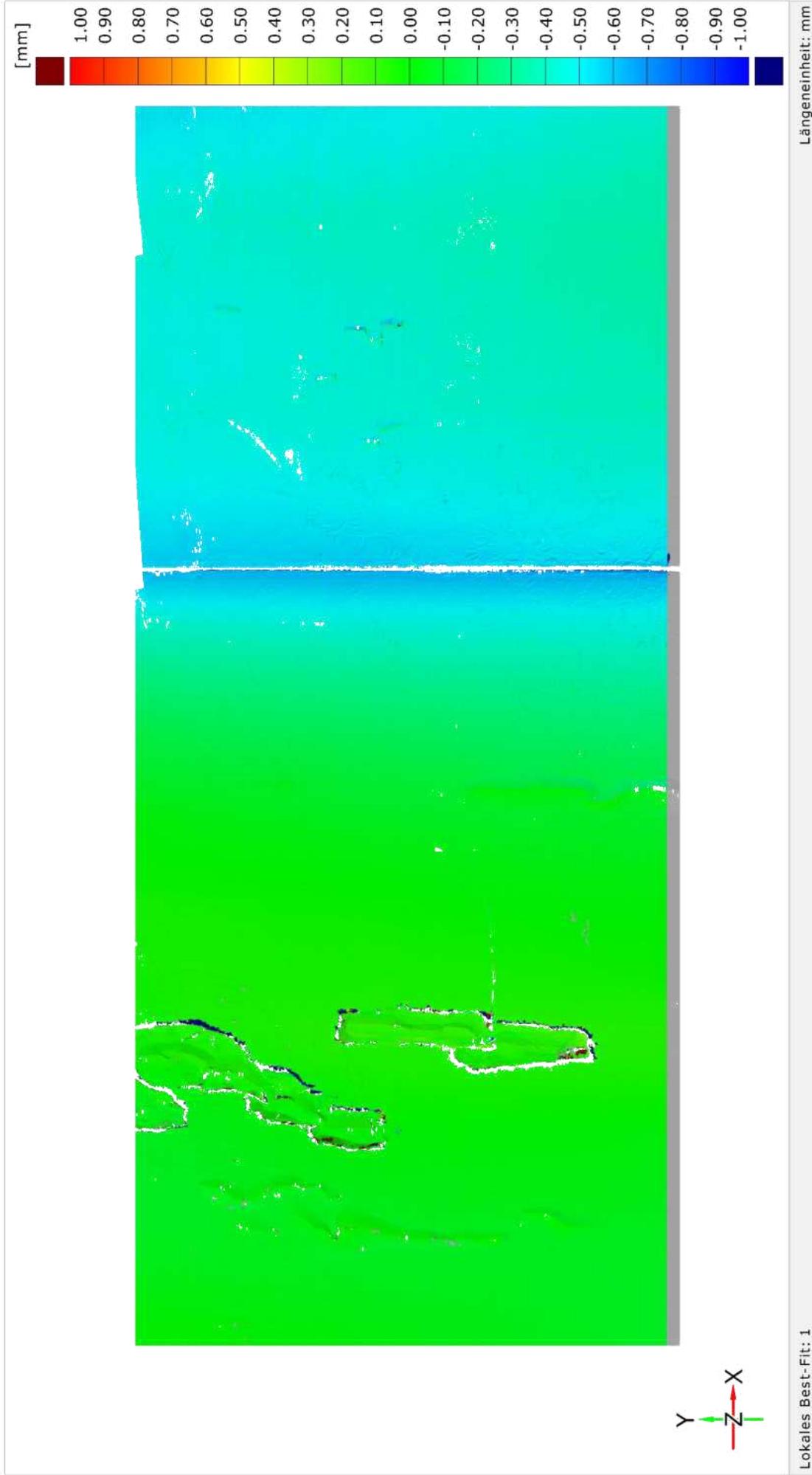
Freising | Tafelgemälde Mitte | 14.07.2020 (Soll), 13.10.2020 (Ist)



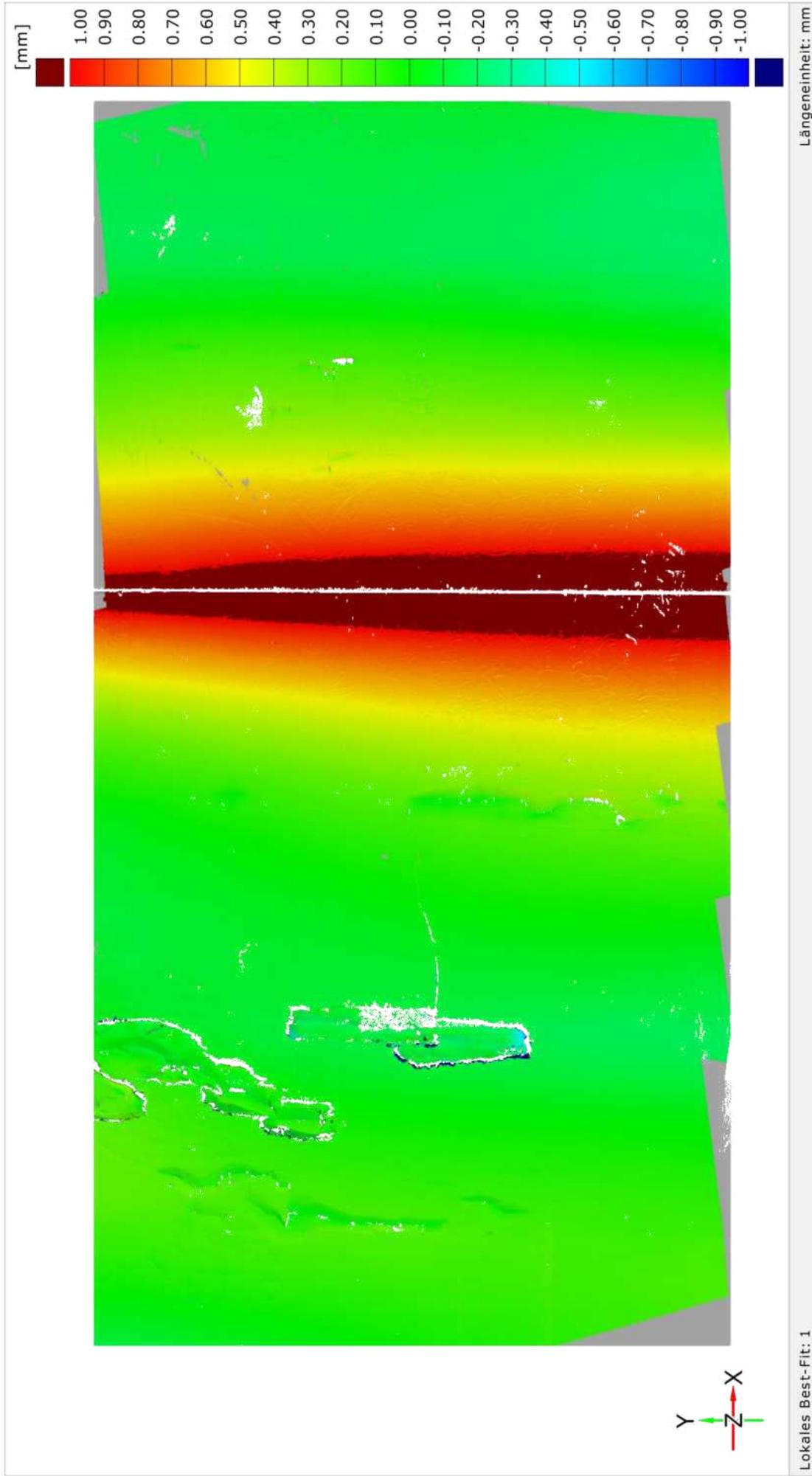
Freising | Tafelgemälde Mitte | 13.10.2020 (Soll), 10.12.2020 (Ist)



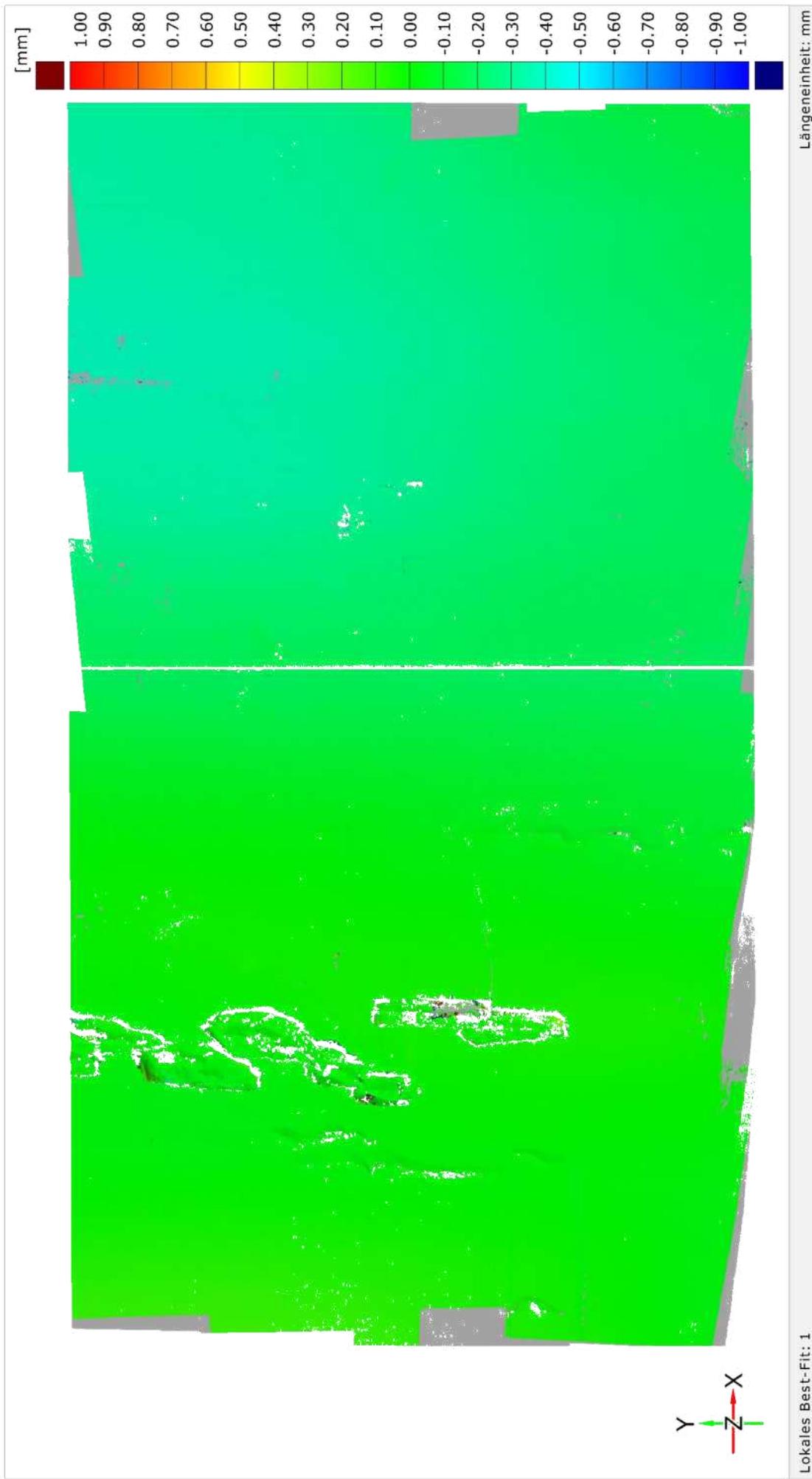
Freising | Tafelgemälde Mitte | 10.12.2020 (Soll), 25.03.2021 (Ist)



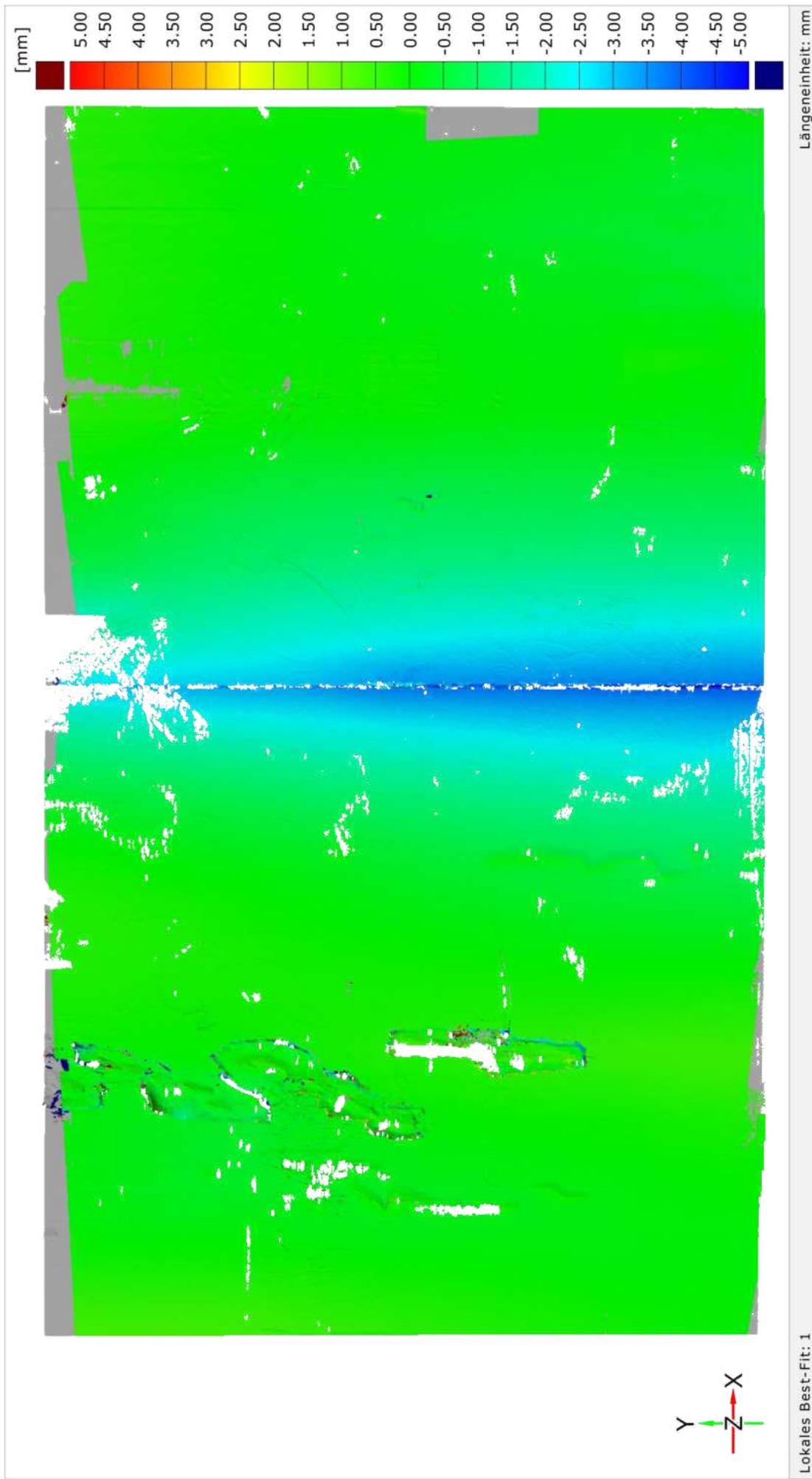
Freising | Tafelgemälde Mitte | 25.03.2021 (Soll), 08.07.2021 (Ist)



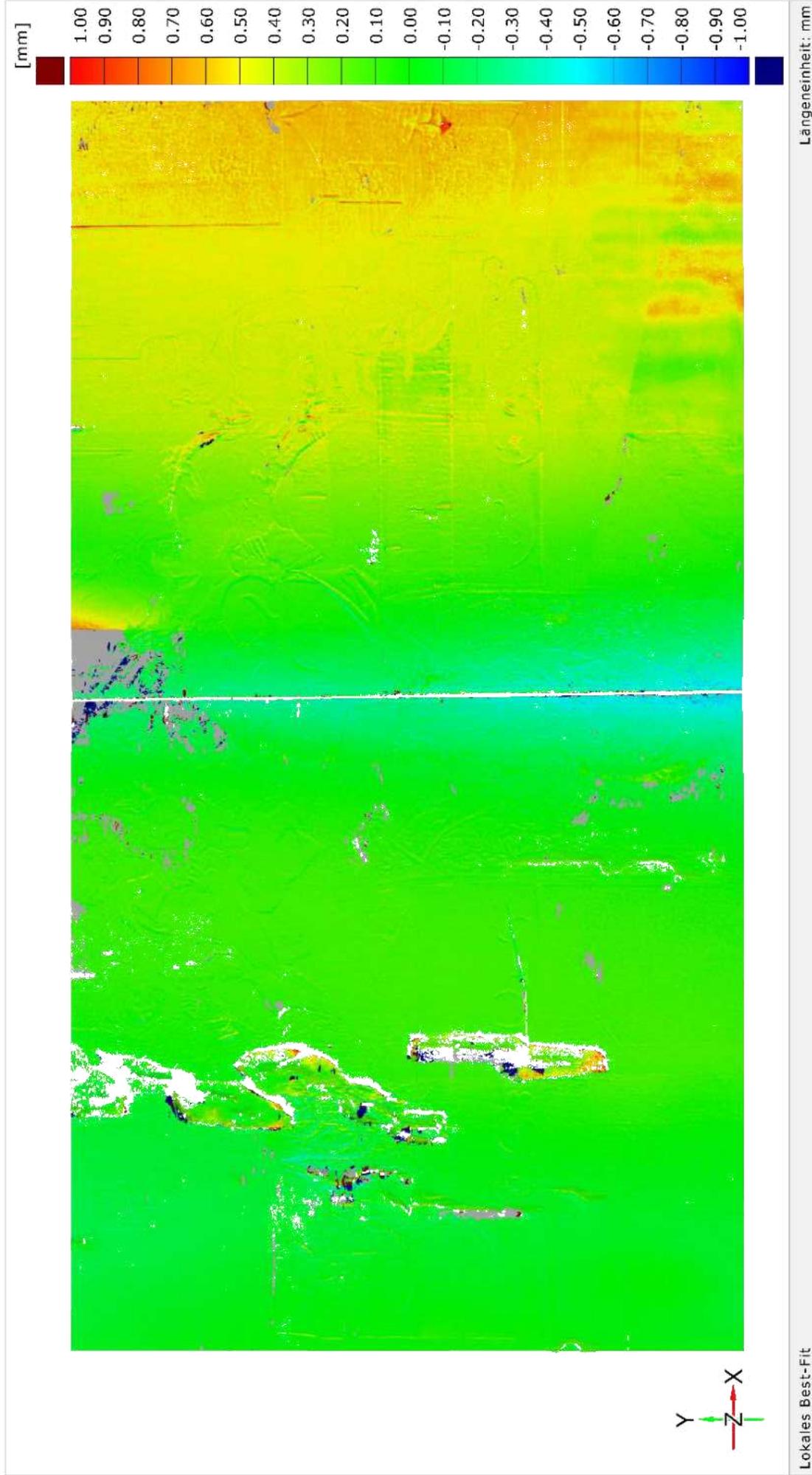
Freising | Tafelgemälde Mitte | 08.07.2021 (Soll), 24.09.2021 (Ist)



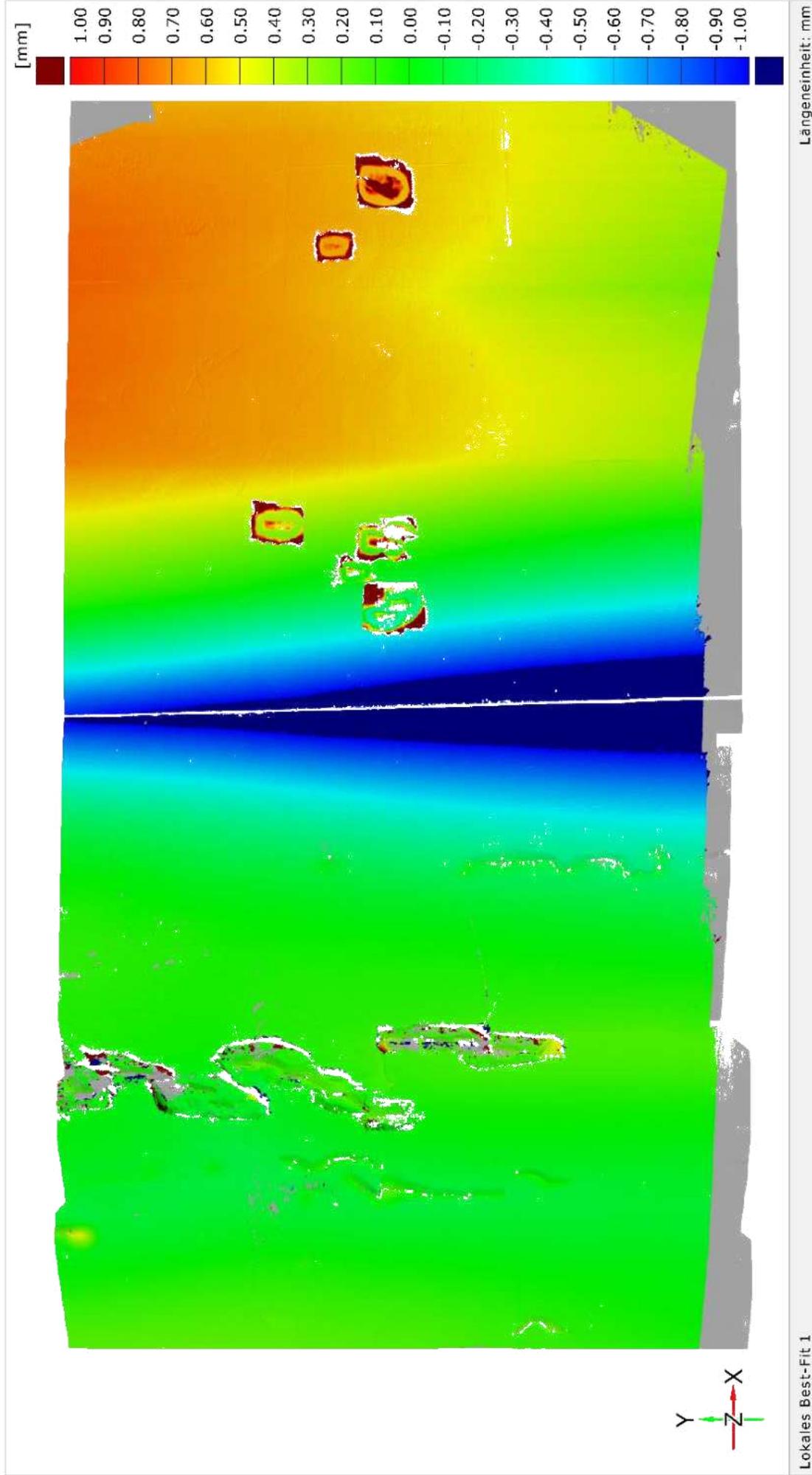
Freising | Tafelgemälde Mitte | 24.09.2021 (Soll), 27.01.2022 (Ist)



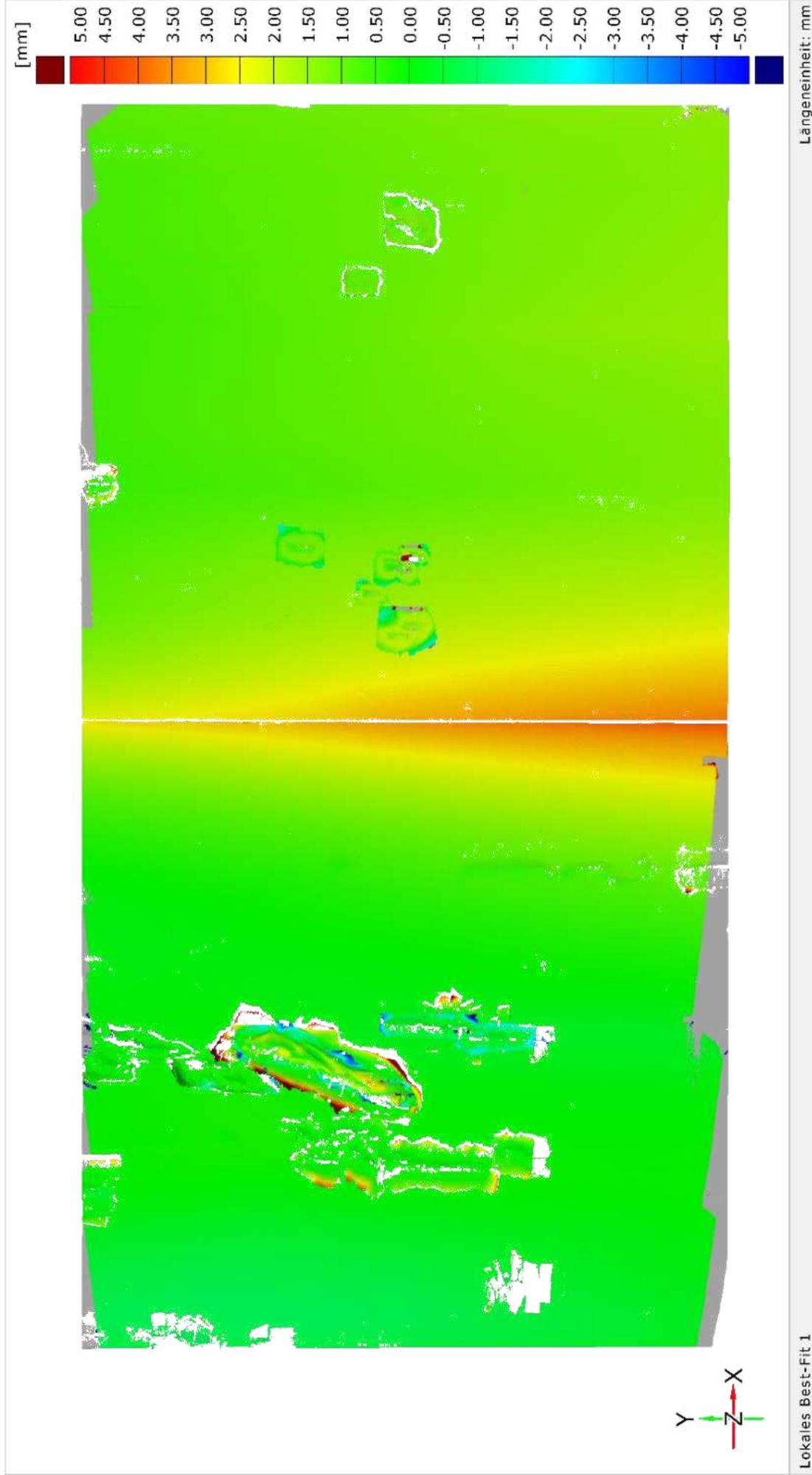
Freising | Tafelgemälde Mitte | 27.01.2022 (Soll), 16.02.2022 (Ist)



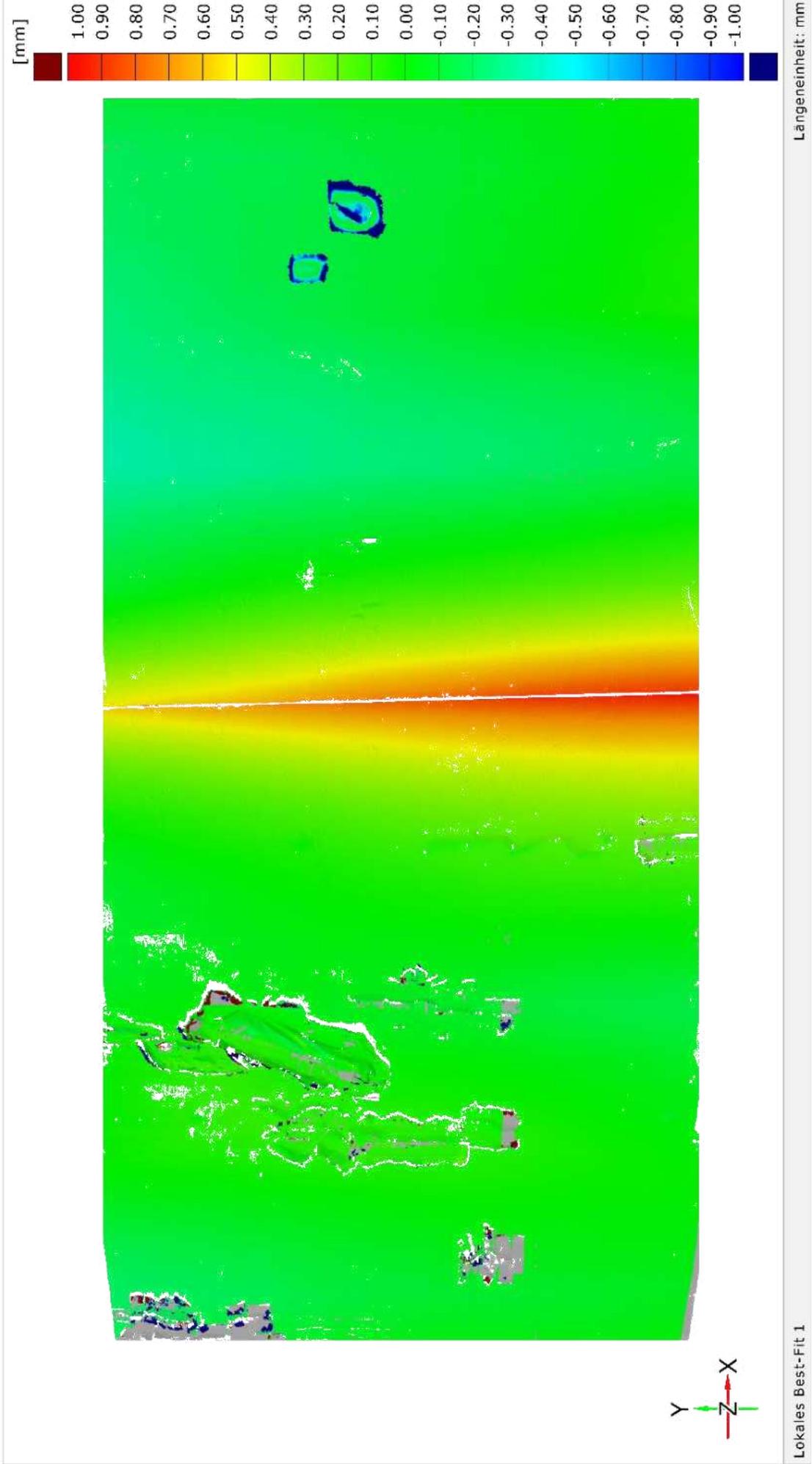
Freising | Tafelgemälde Mitte | 16.02.2022 (Soll), 24.03.2022 (Ist)



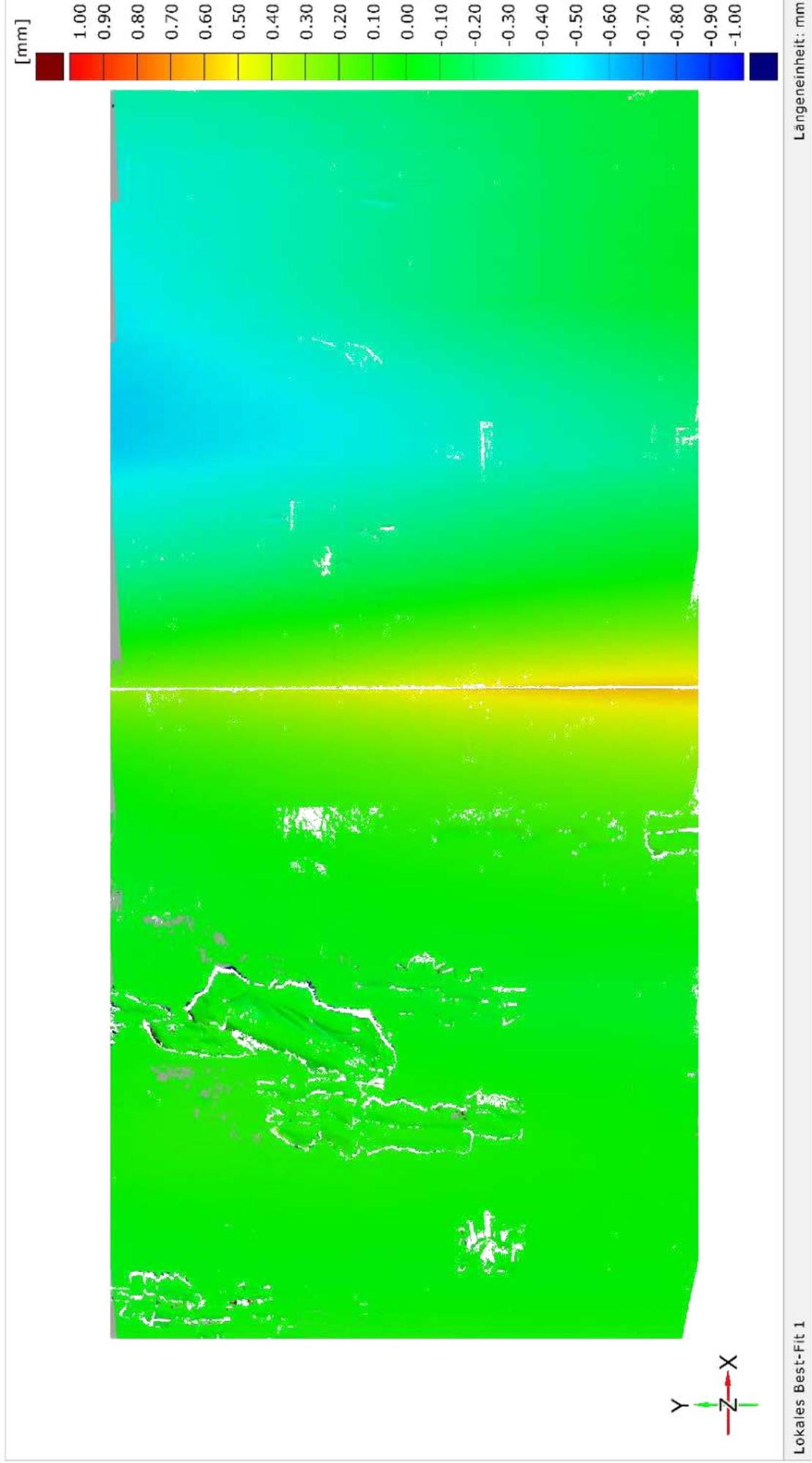
Freising | Tafelgemälde Mitte | 24.03.2022 (Soll), 19.05.2022 (Ist)



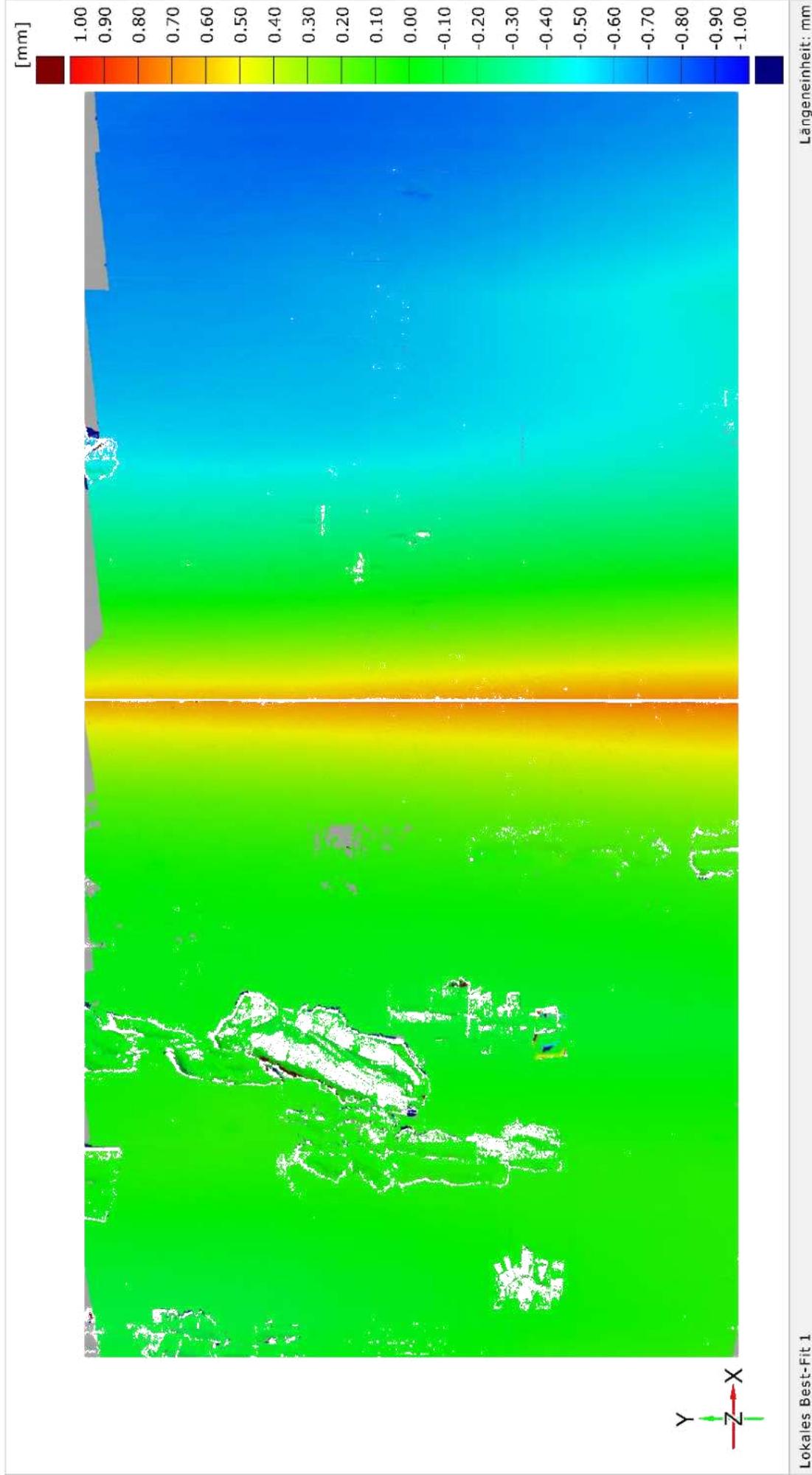
Freising | Tafelgemälde Mitte | 19.05.2022 (Soll), 13.06.2022 (Ist)



Freising | Tafelgemälde Mitte | 13.06.2022 (Soll), 24.08.2022 (Ist)



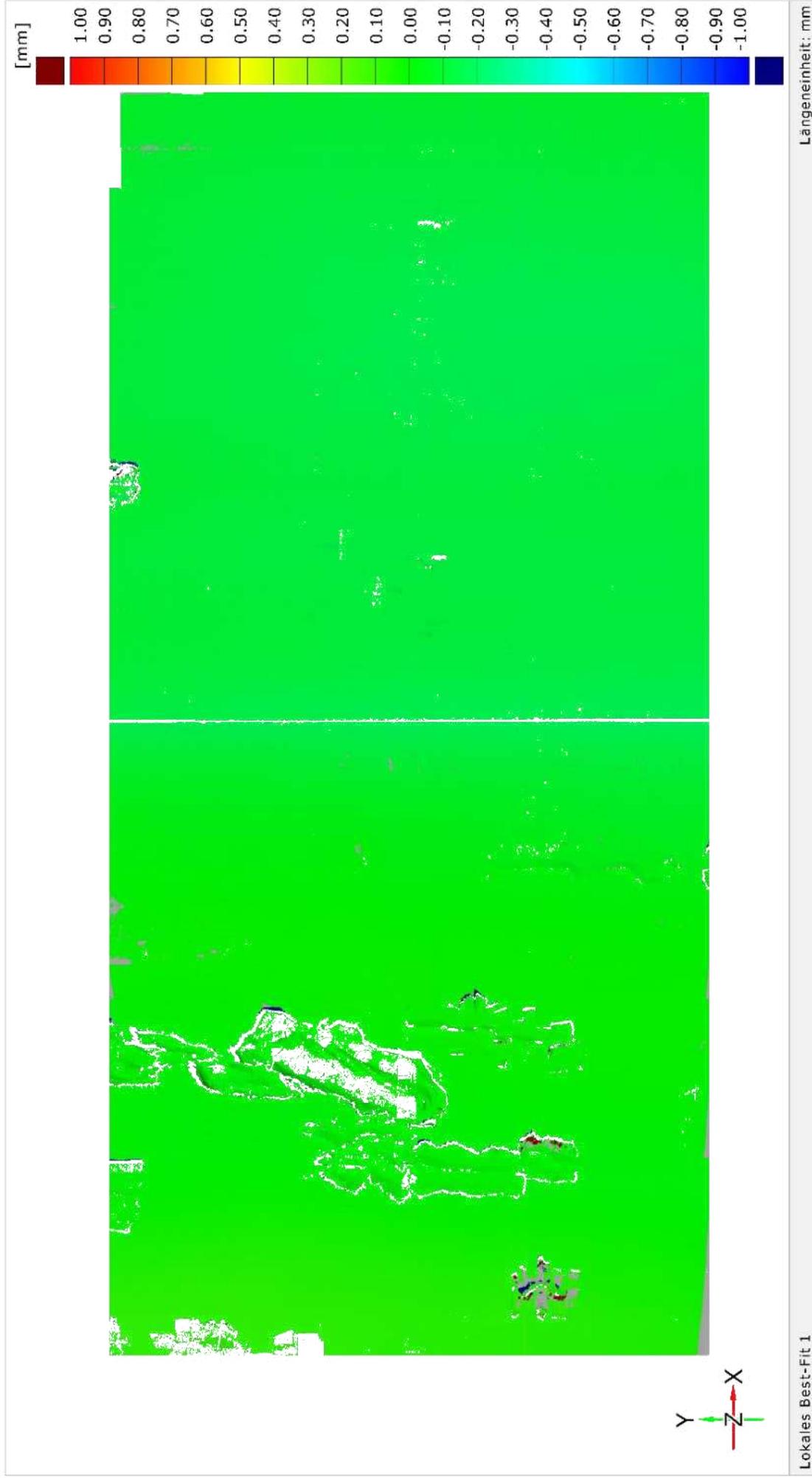
Freising | Tafelgemälde Mitte | 24.08.2022 (Soll), 12.12.2022 (Ist)



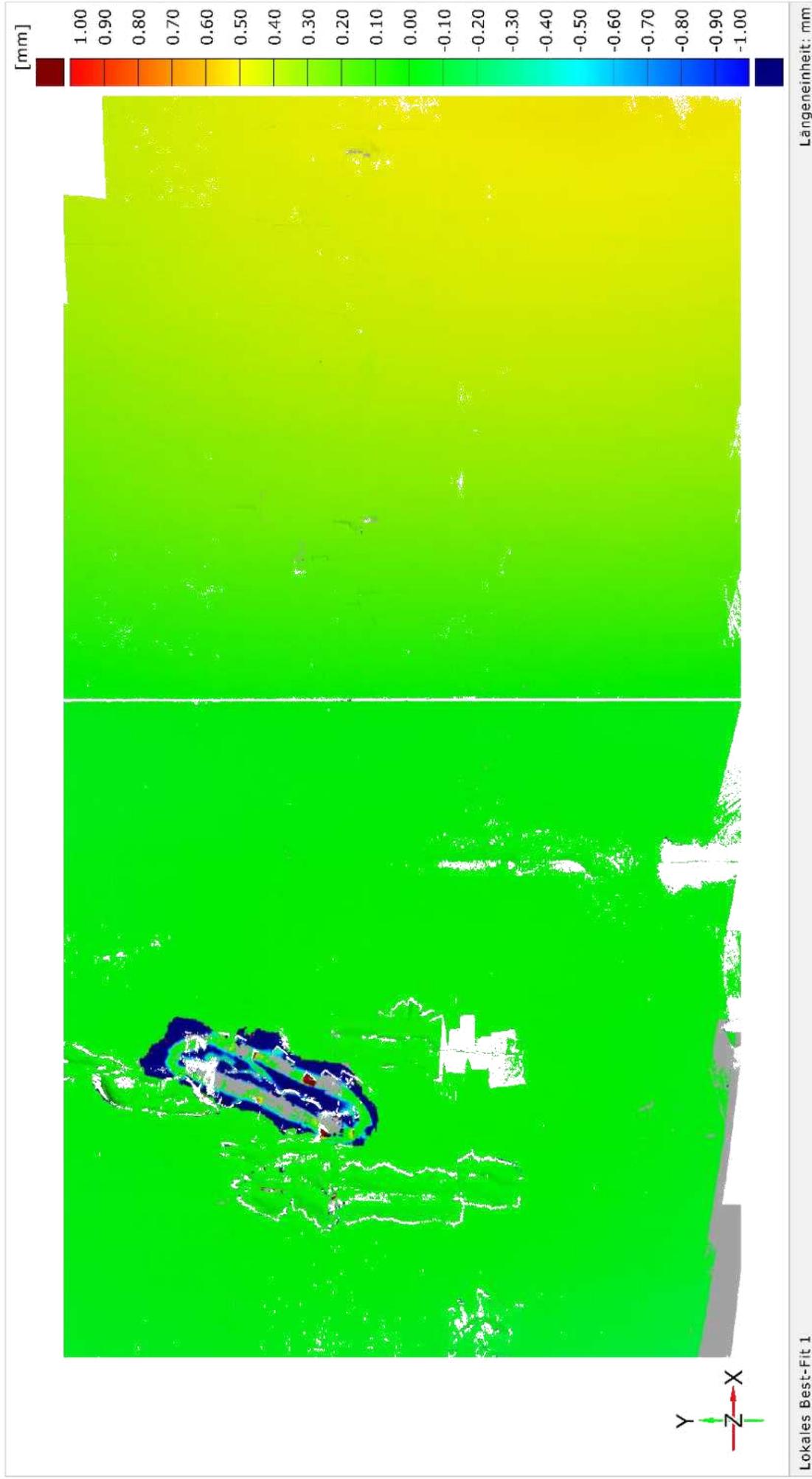
Freising | Tafelgemälde Mitte | 12.12.2022 (Soll), 20.02.2023 (Ist)



Freising | Tafelgemälde Mitte | 20.02.2023 (Soll), 13.03.2023 (Ist)



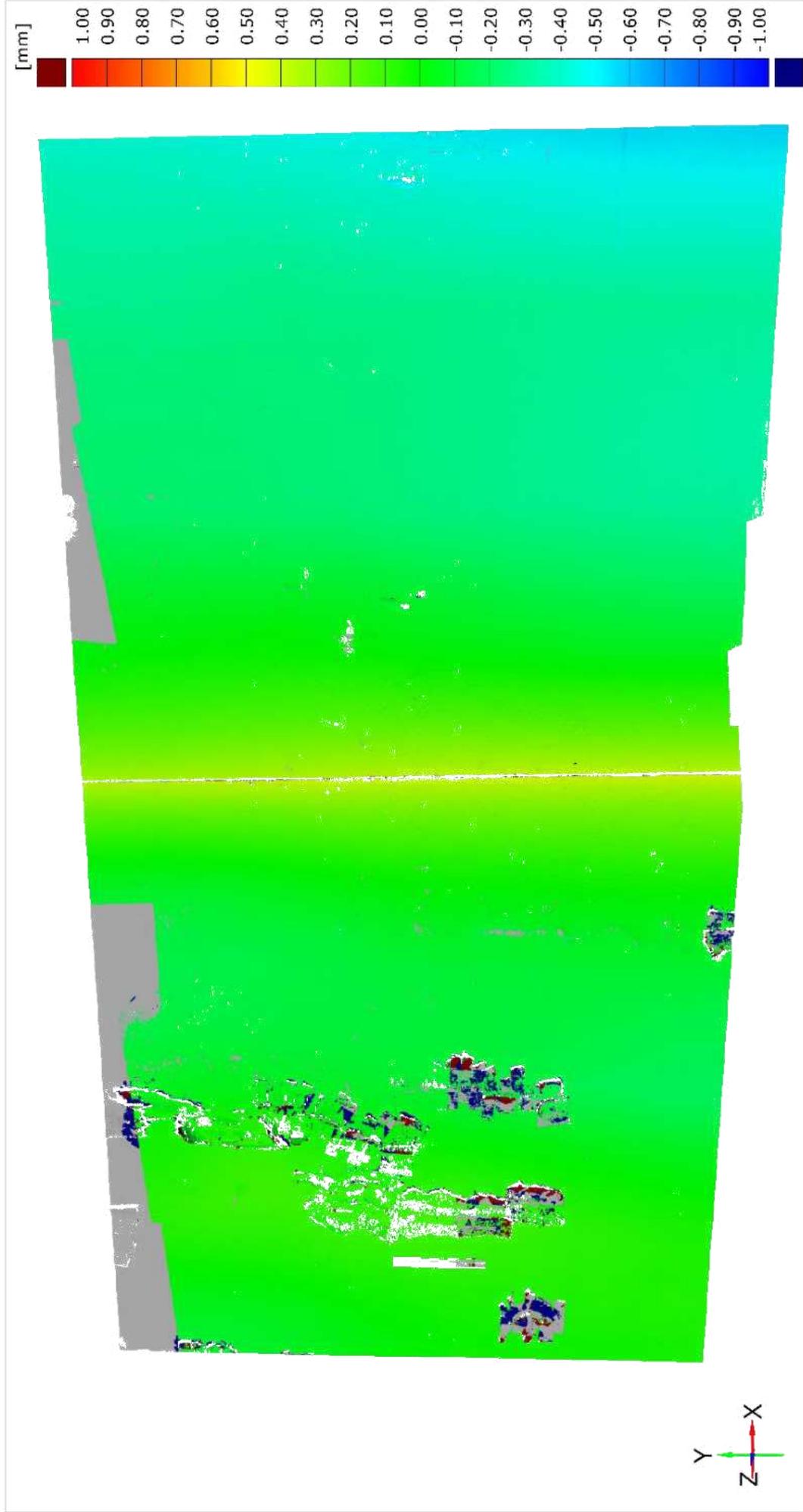
Freising | Tafelgemälde Mitte | 13.03.2023 (Soll), 30.05.2023 (Ist)



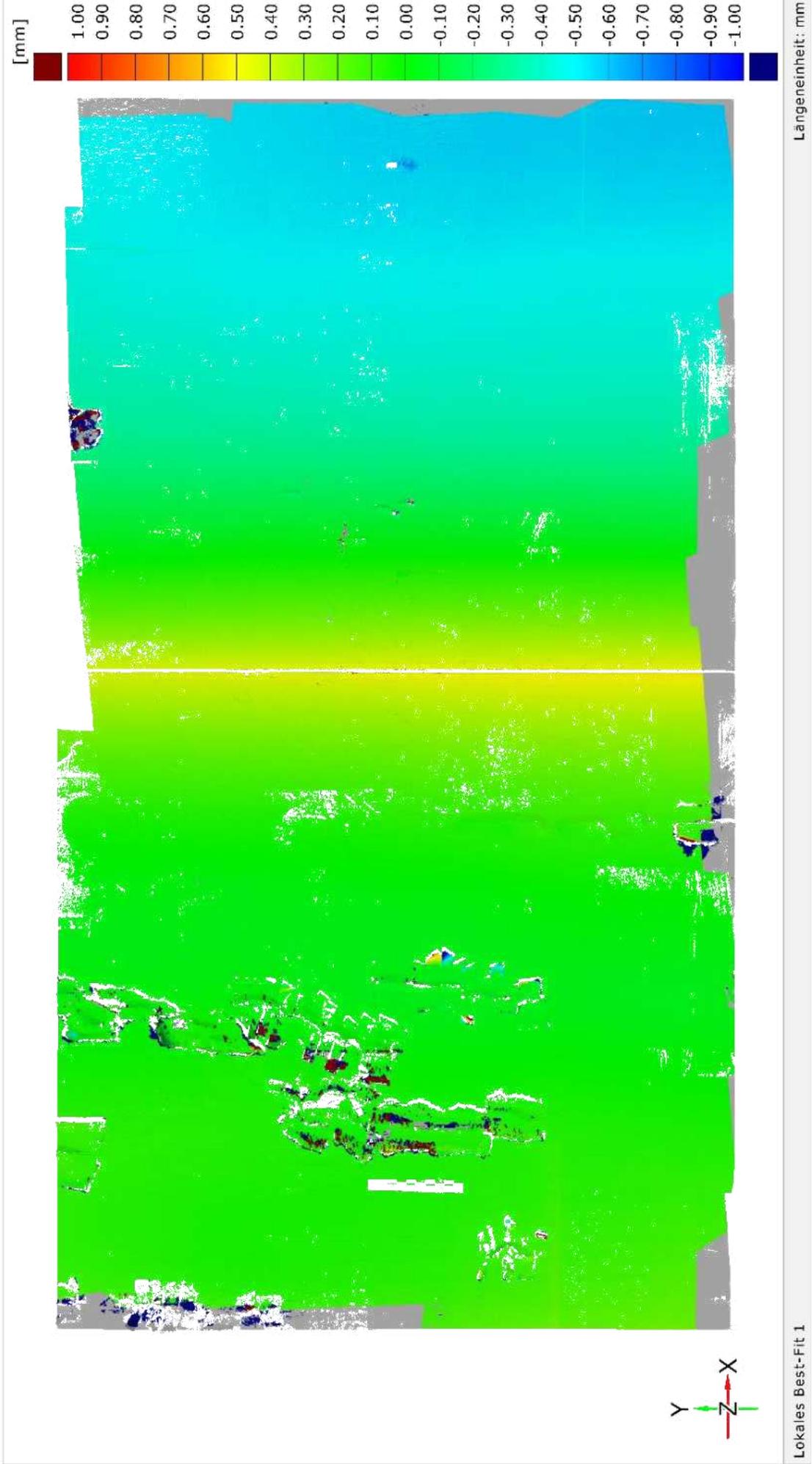
Freising | Tafelgemälde Mitte | 30.05.2023 (Soll), 20.06.2023 (Ist)



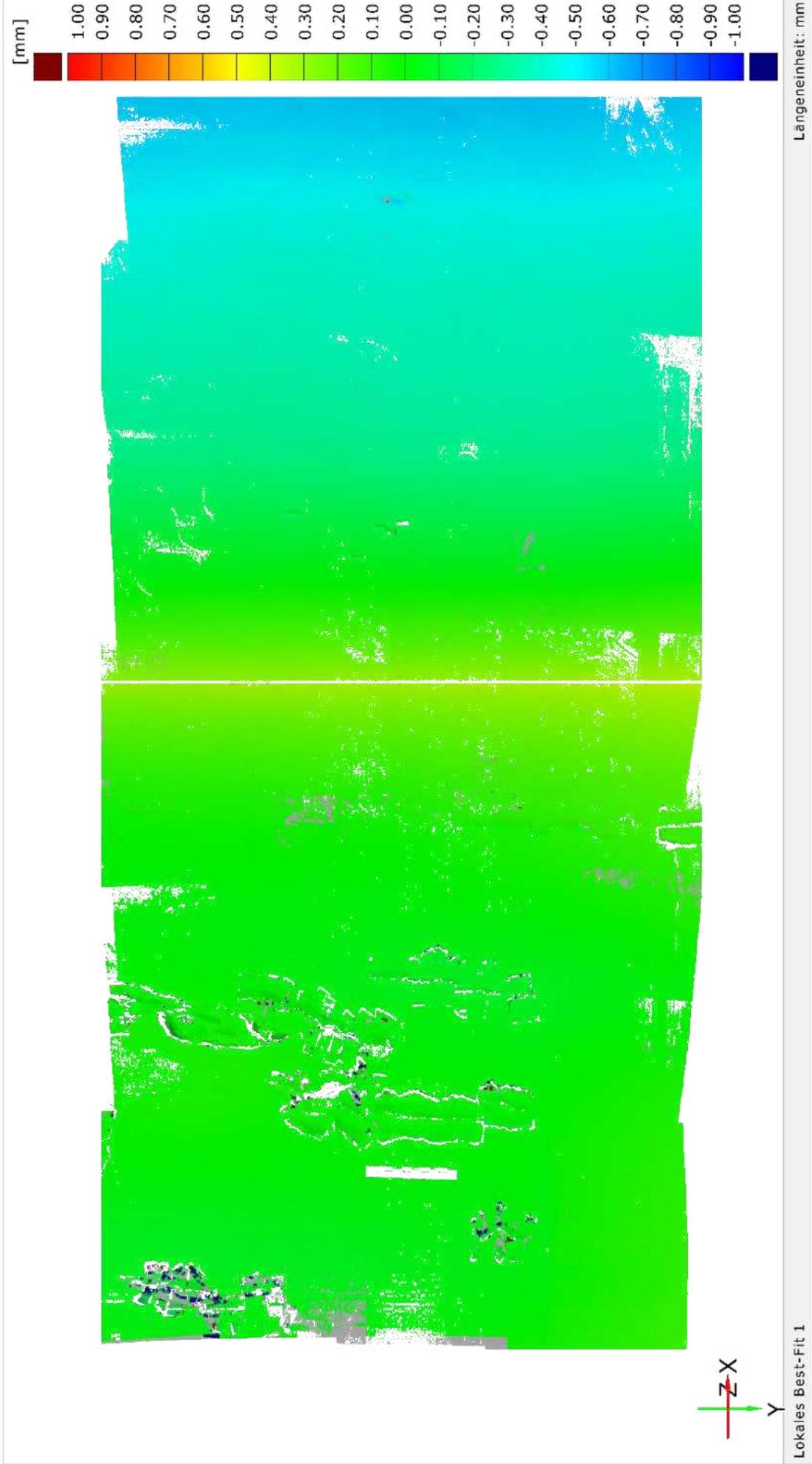
Freising | Tafelgemälde Mitte | 20.06.2023 (Soll), 22.08.2023 (Ist)



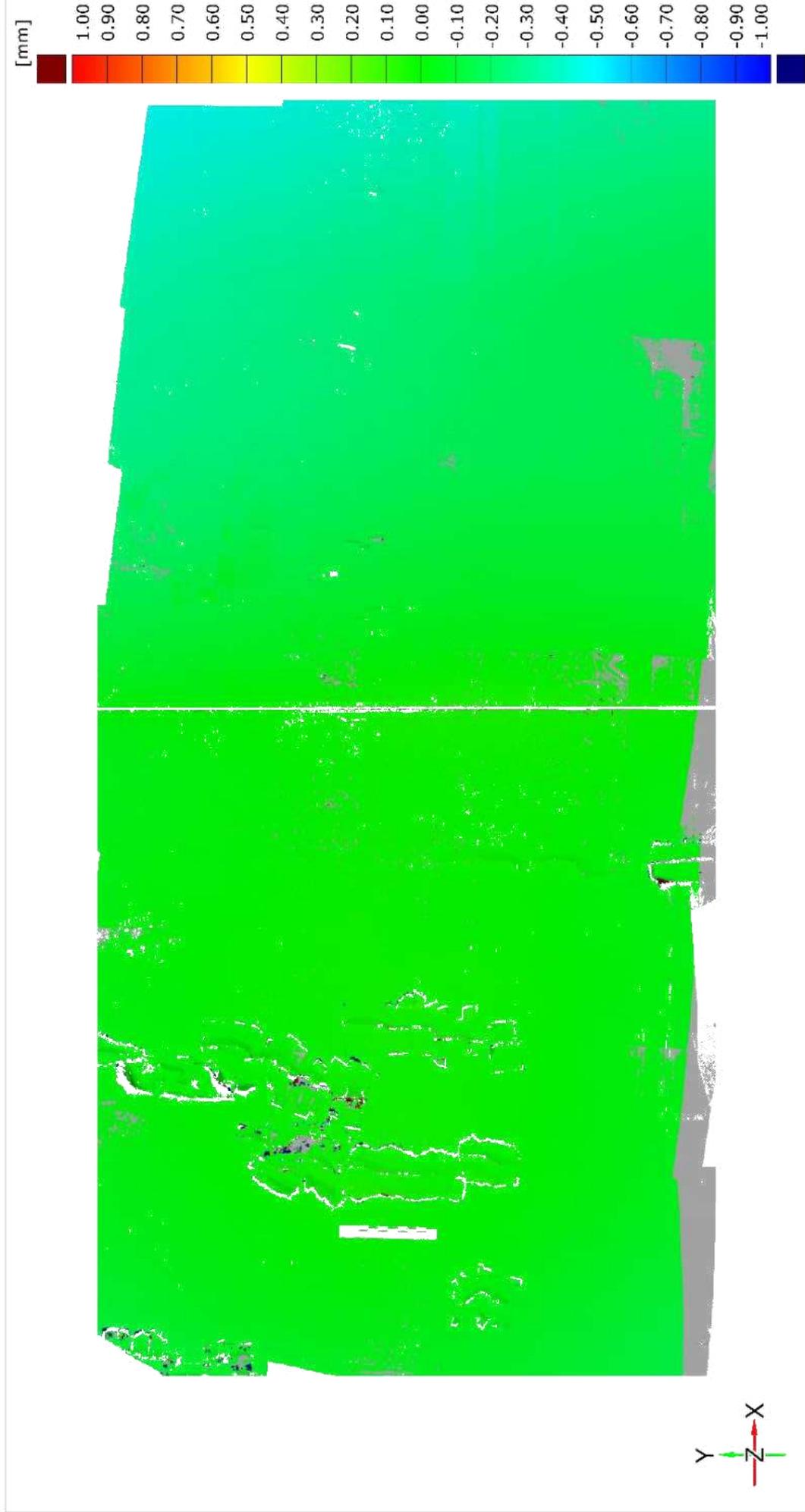
Freising | Tafelgemälde Mitte | 22.08.2023 (Soll), 24.01.2024 (Ist)



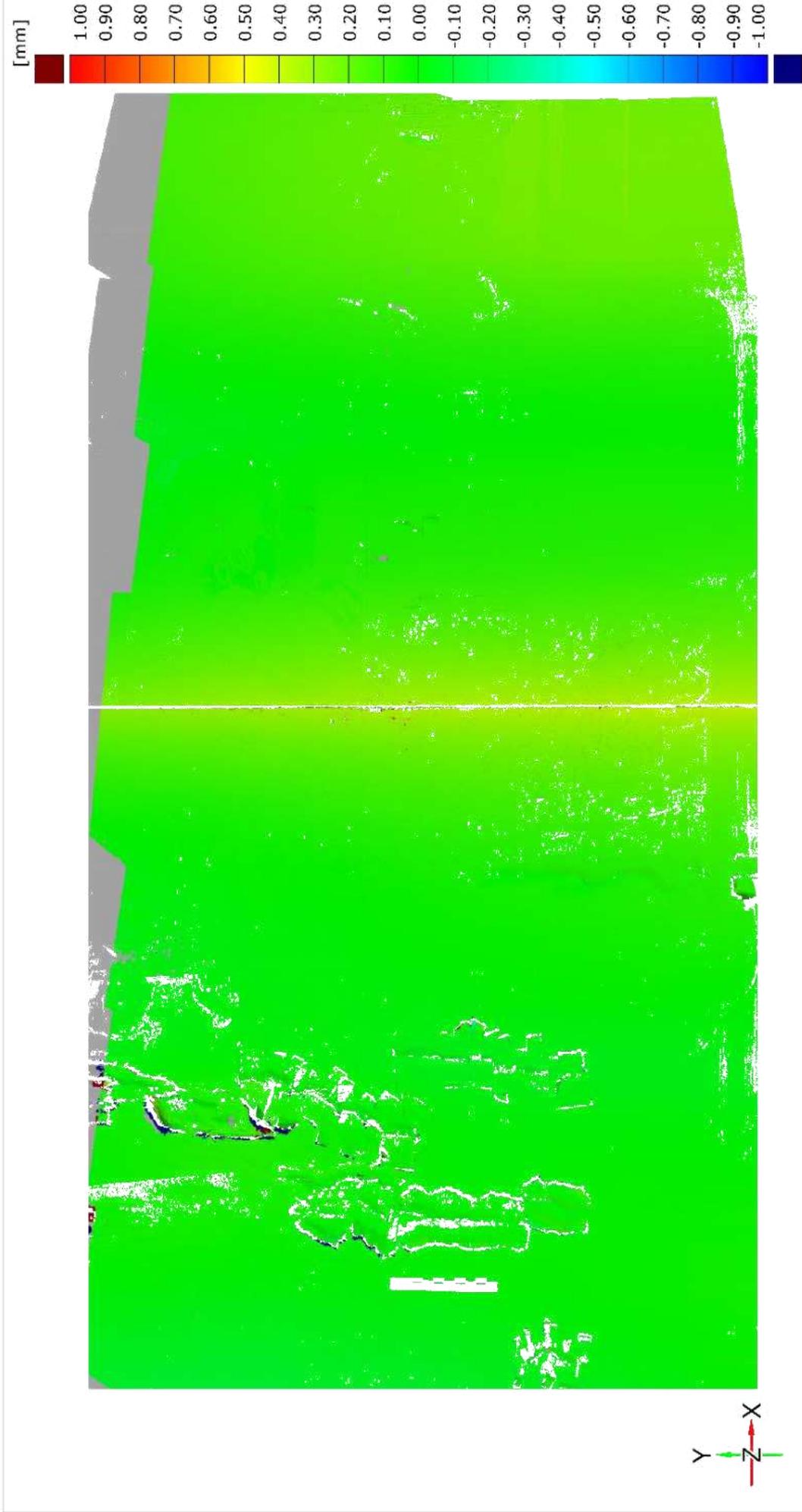
Freising | Tafelgemälde Mitte | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



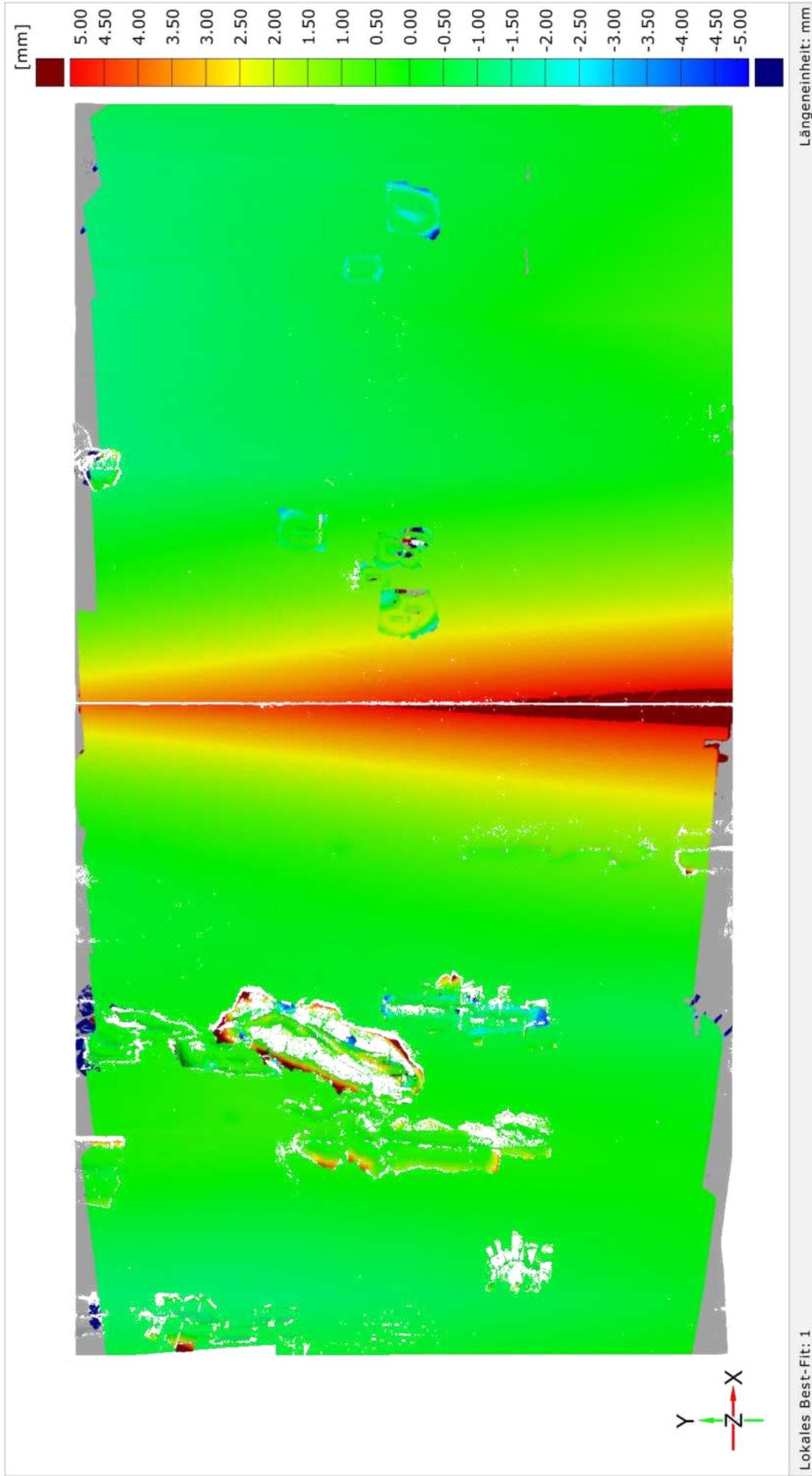
Freising | Tafelgemälde Mitte | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



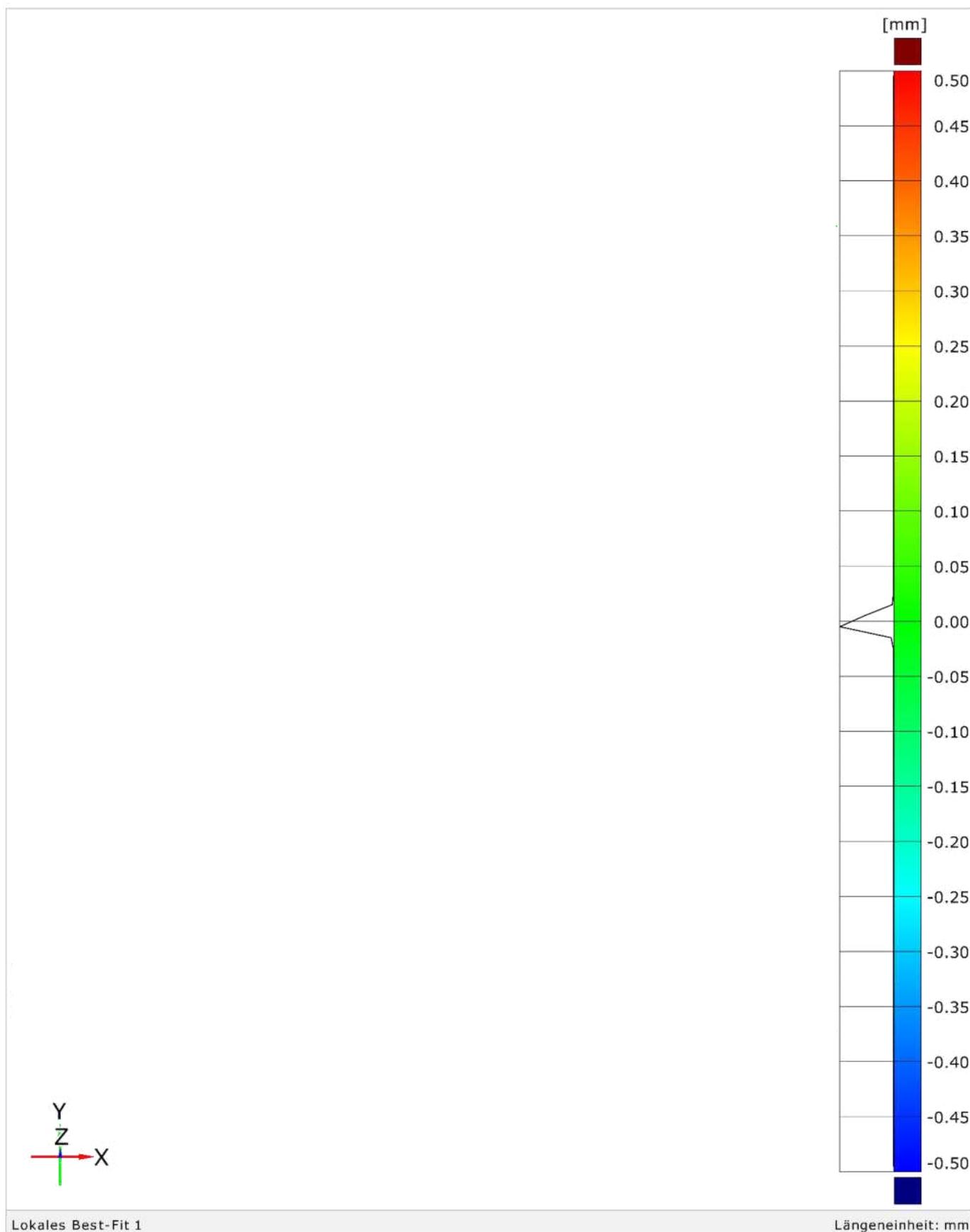
Freising | Tafelgemälde Mitte | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



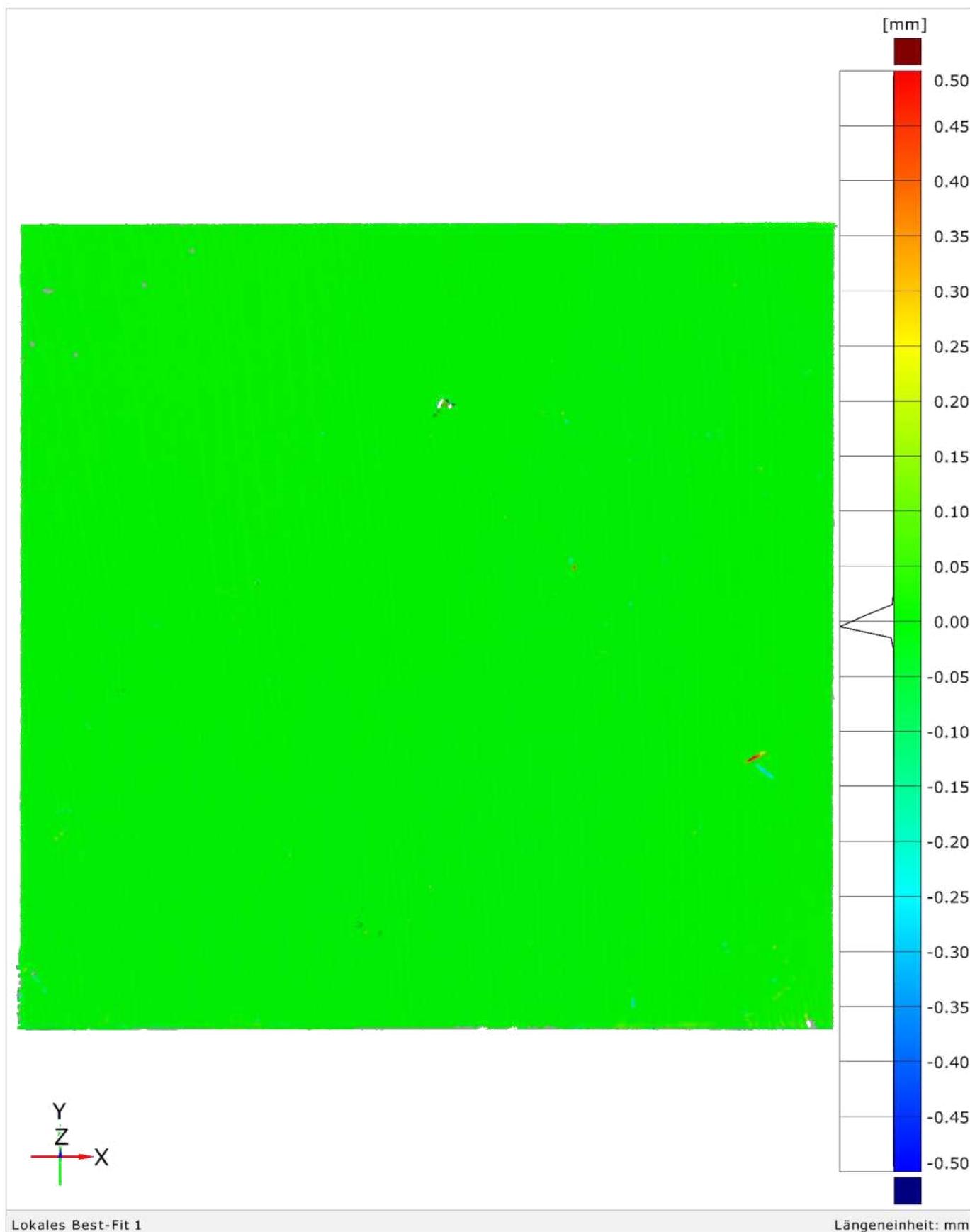
Freising | Tafelgemälde Mitte | 24.03.2022 (Soll), 12.12.2022 (Ist)



Freising | Probekörper B01 |



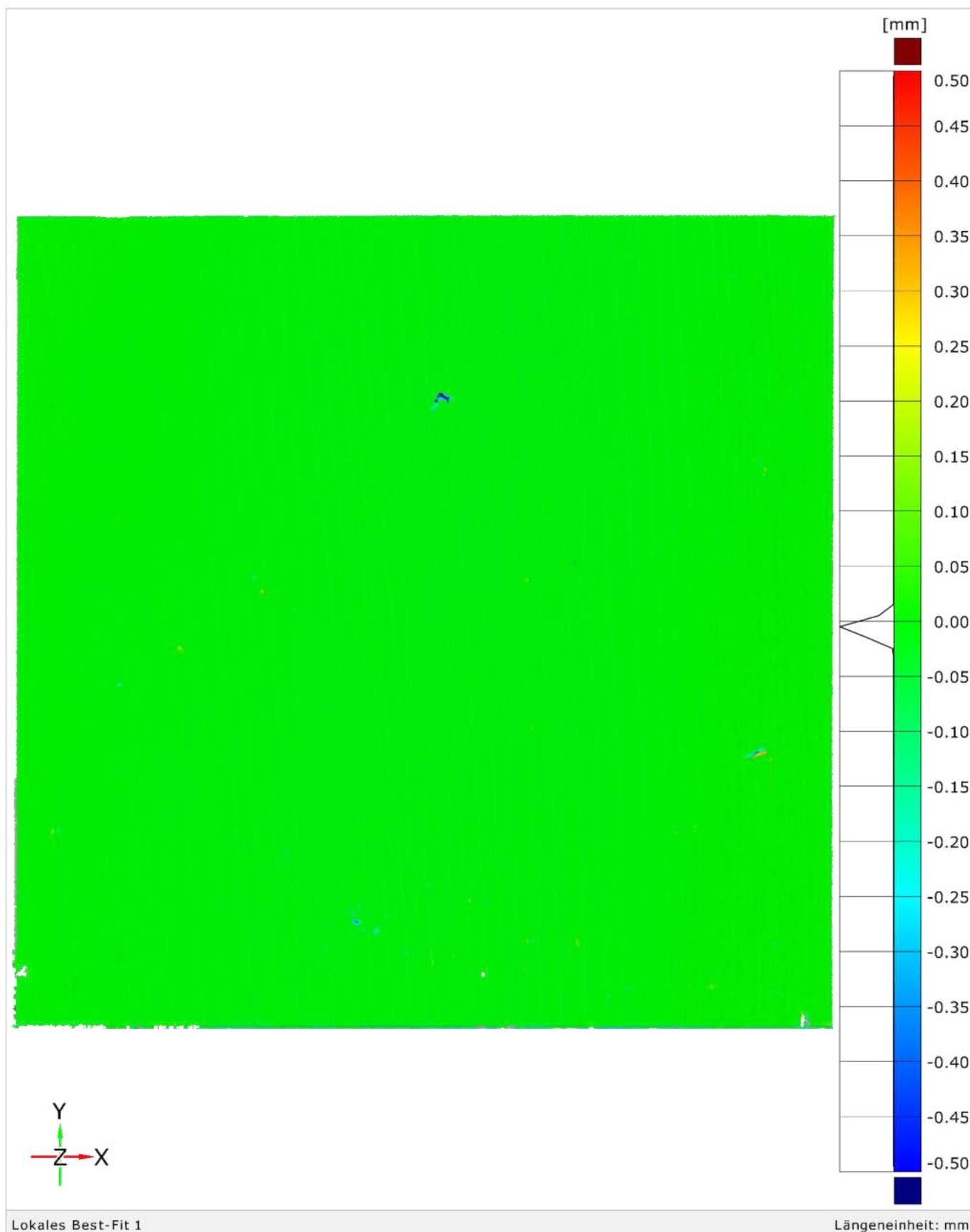
Freising | Probekörper B01 | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

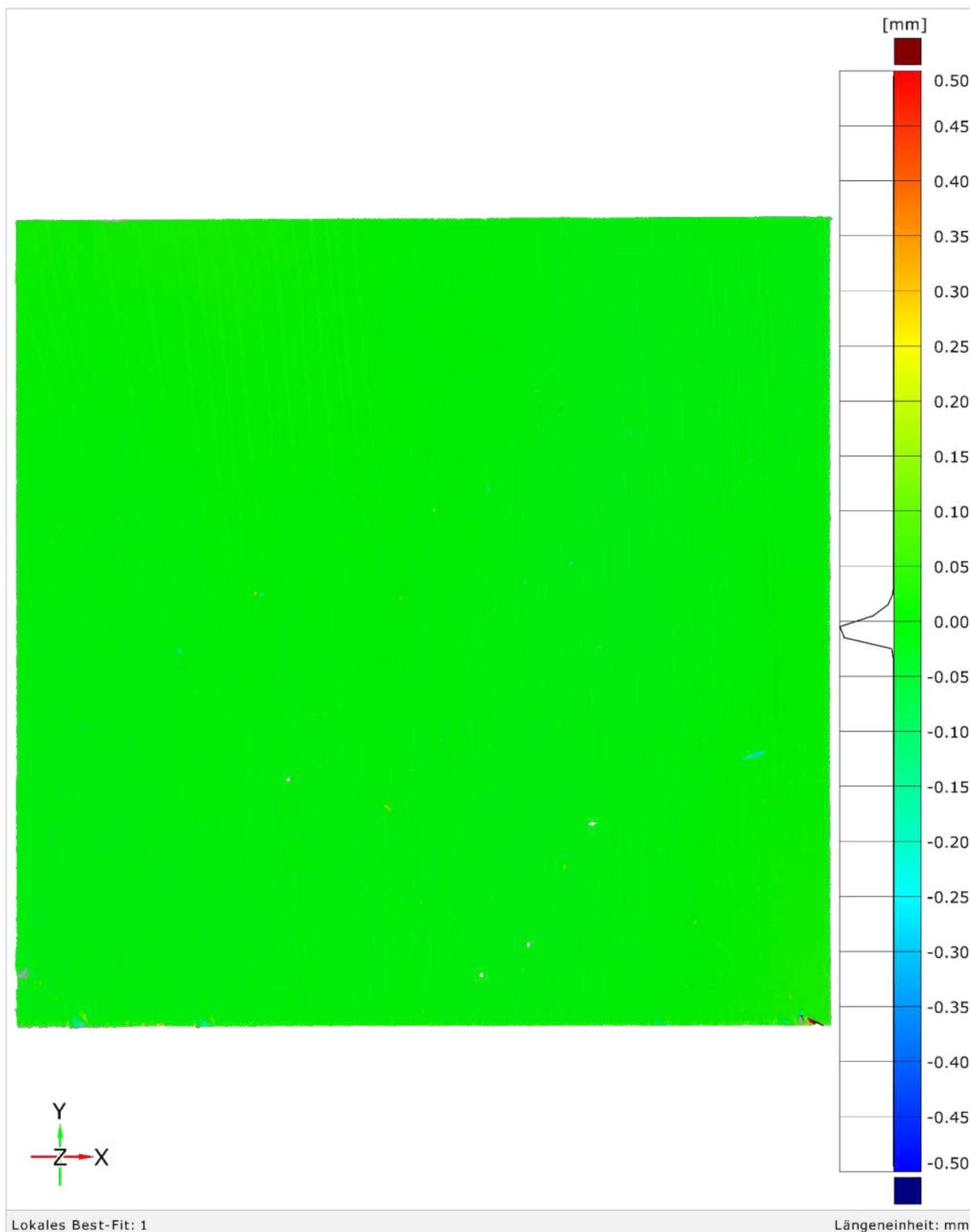
Freising | Probekörper B01 | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



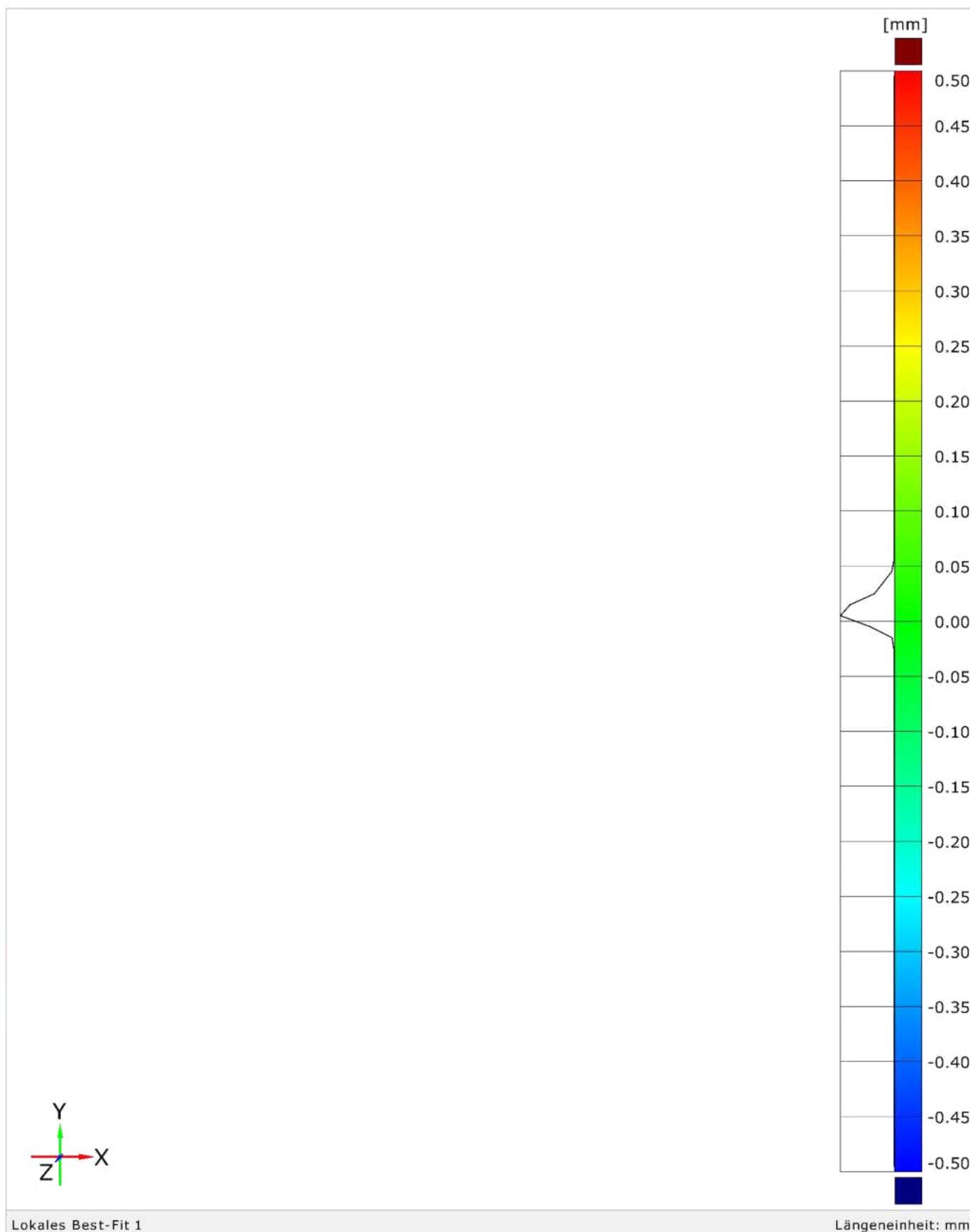
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

Freising | Probekörper B01 | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



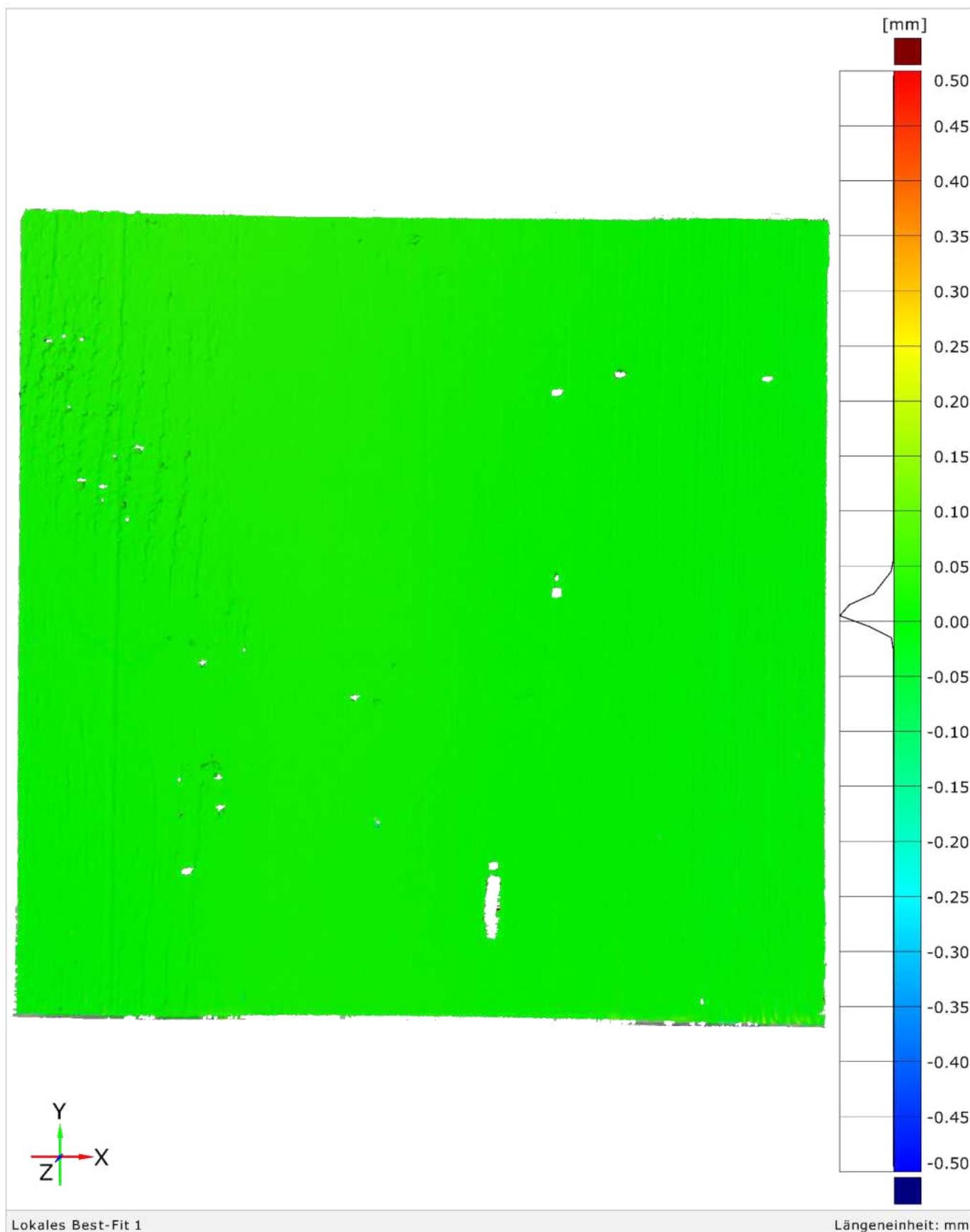
Freising | Probekörper BA01 |



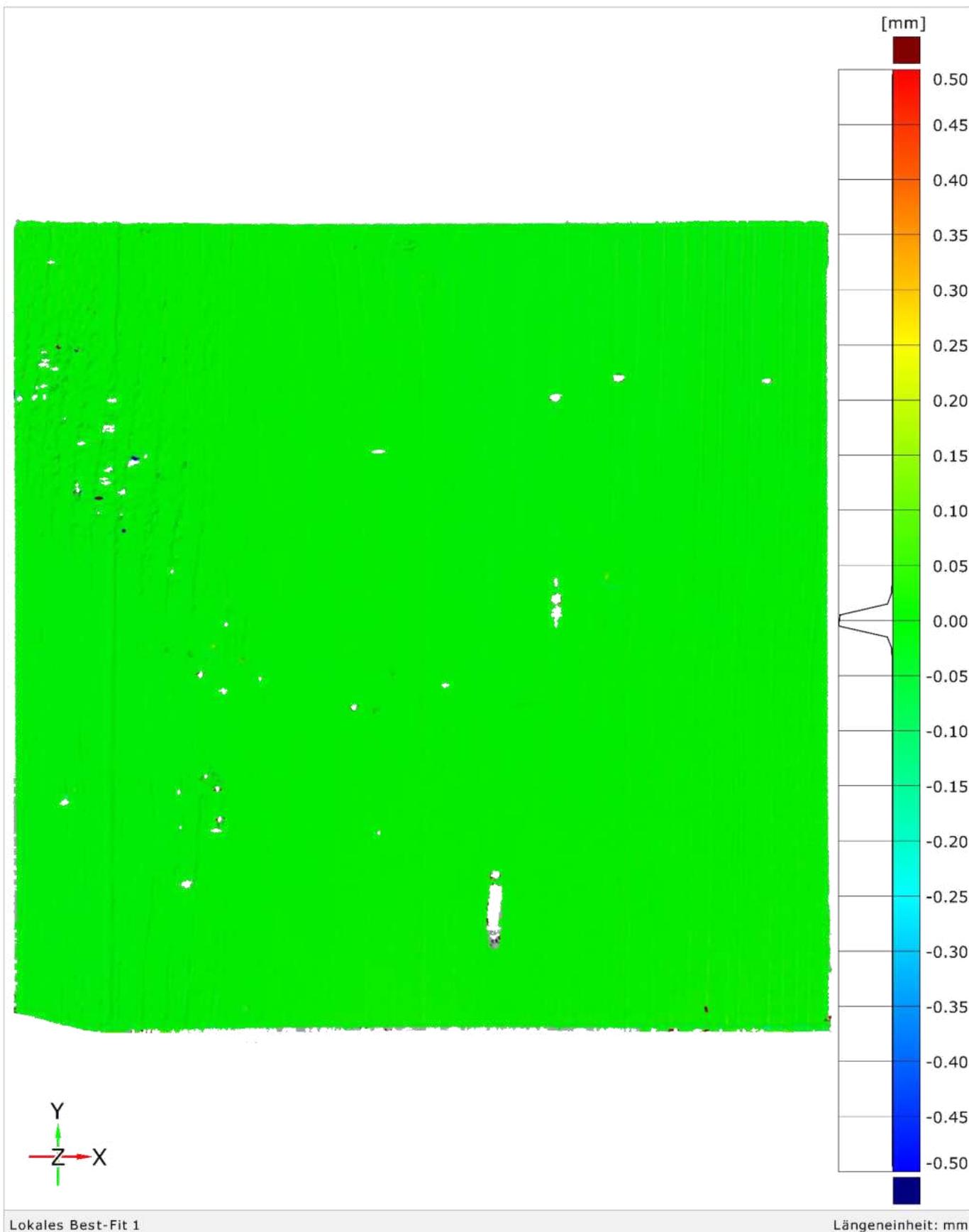
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

Freising | Probekörper BA01 | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



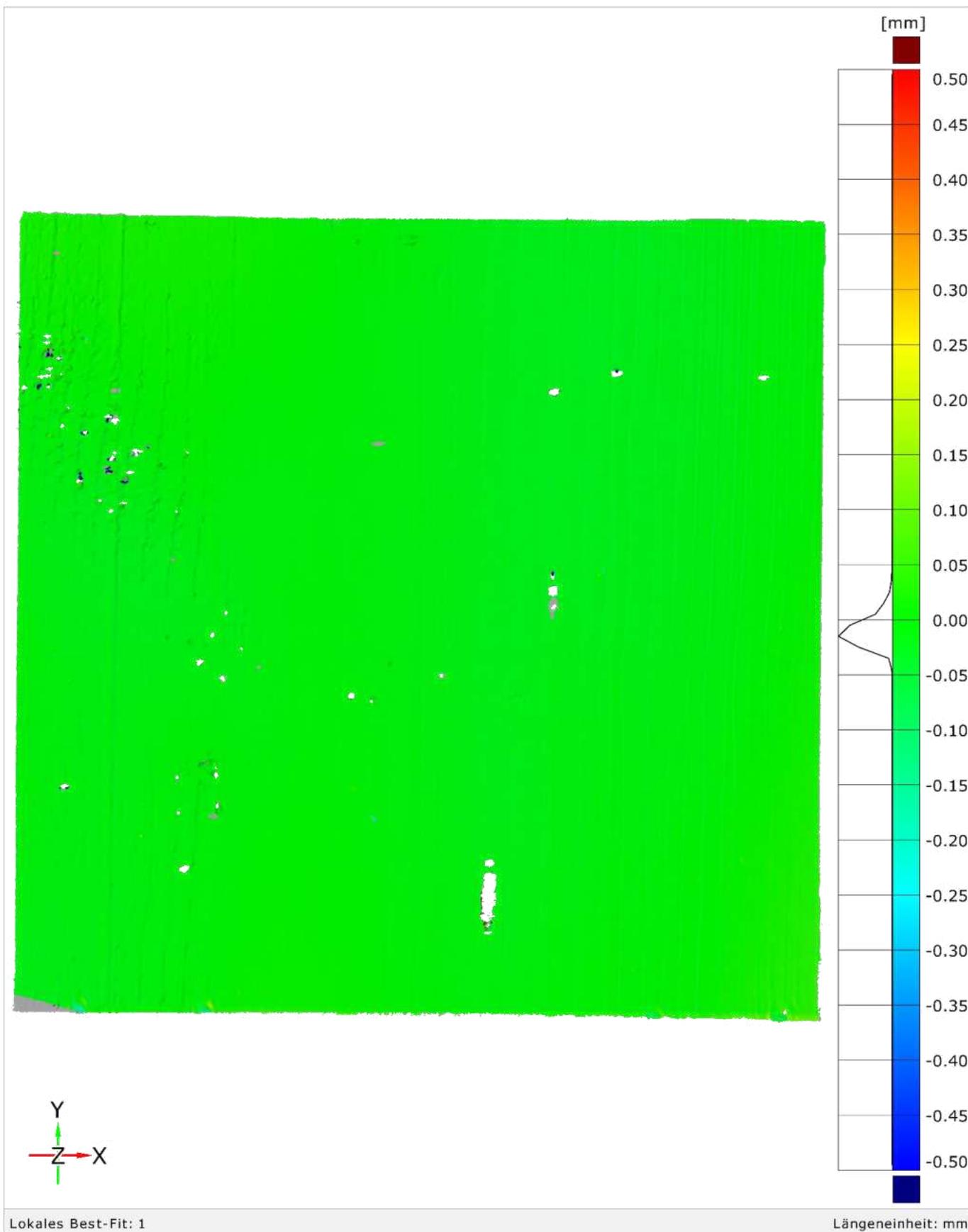
Freising | Probekörper BA01 | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



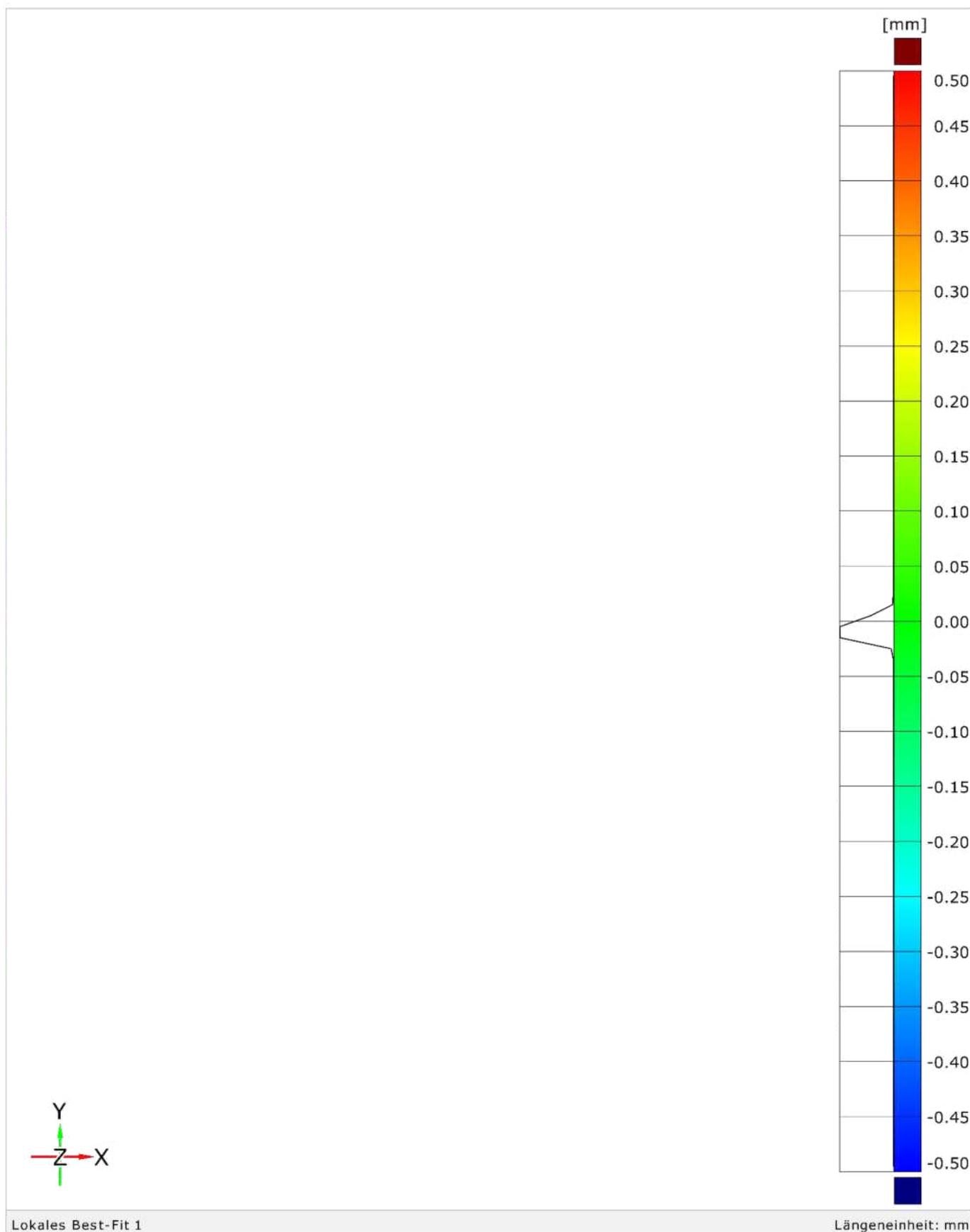
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

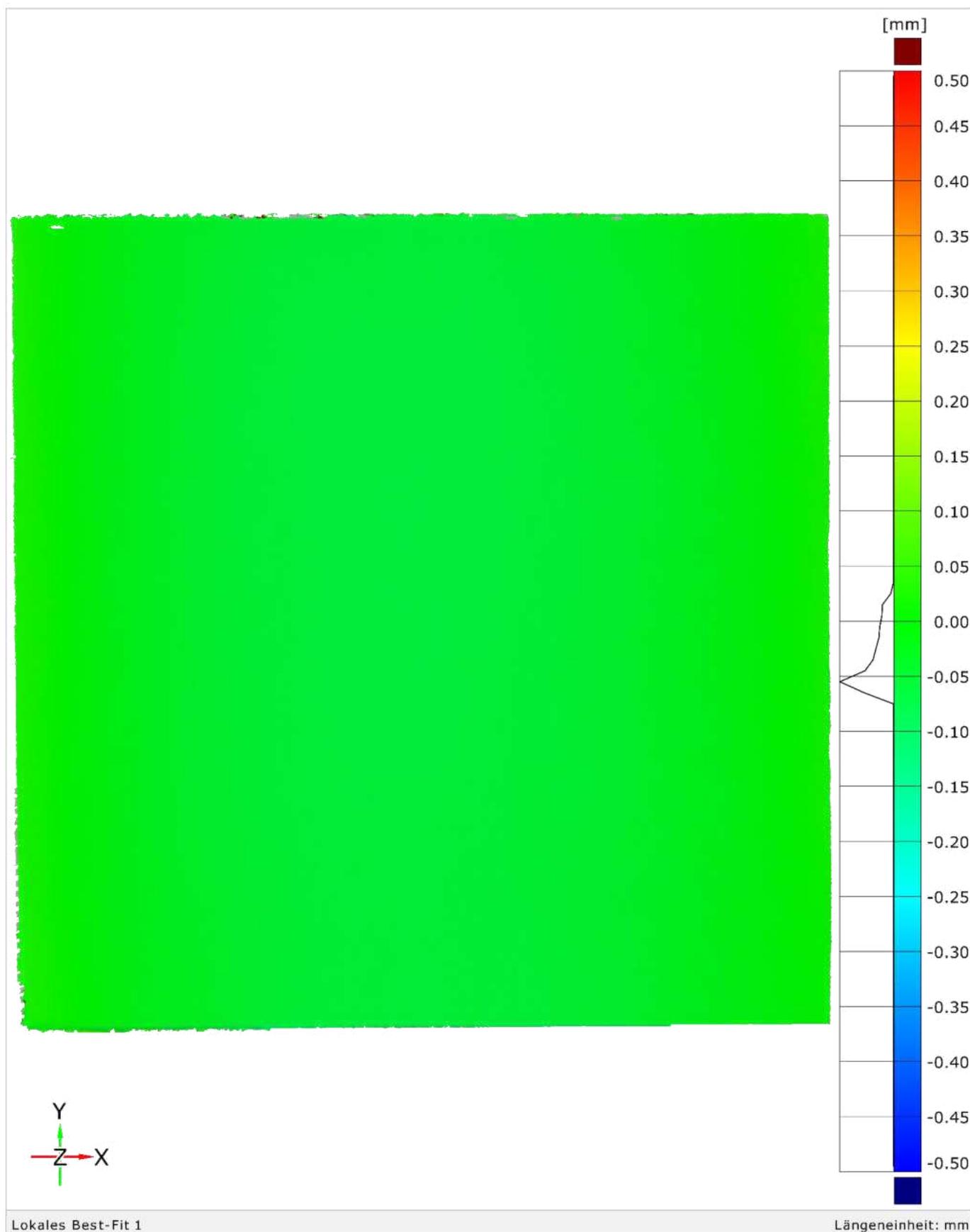
Freising | Probekörper BA01 | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



Freising | Probekörper BM1 |



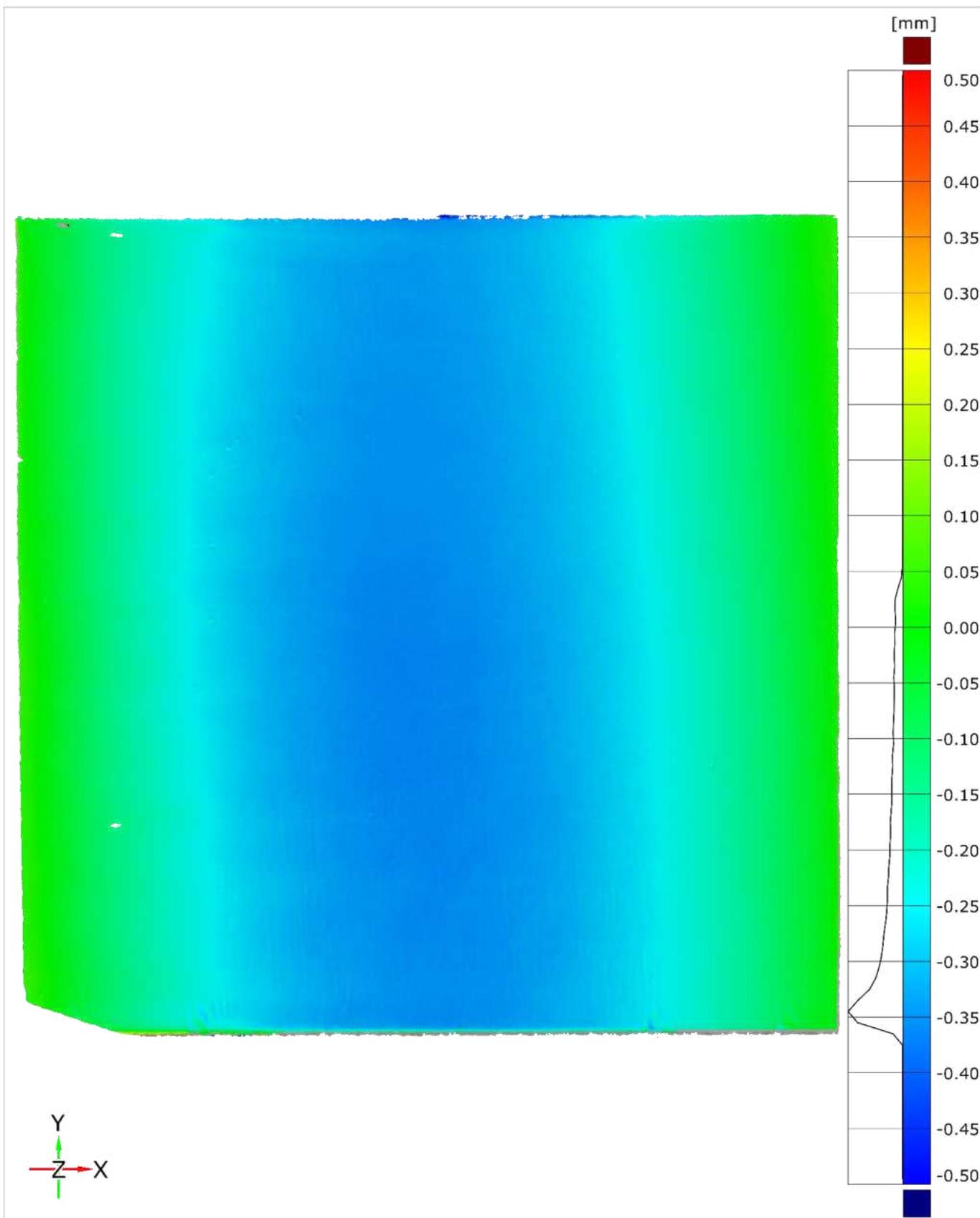
Freising | Probekörper BM1 | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

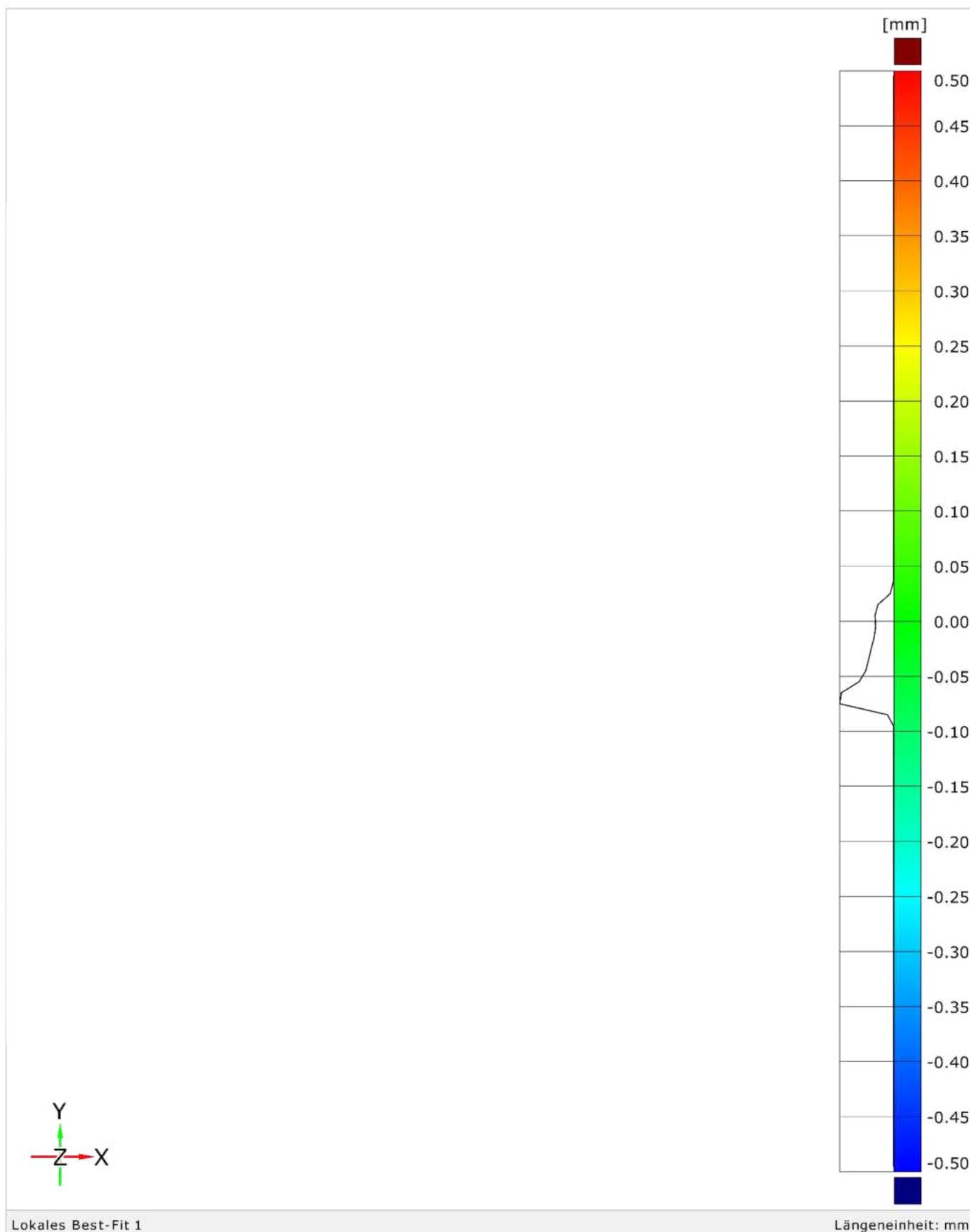
Freising | Probekörper BM1 | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



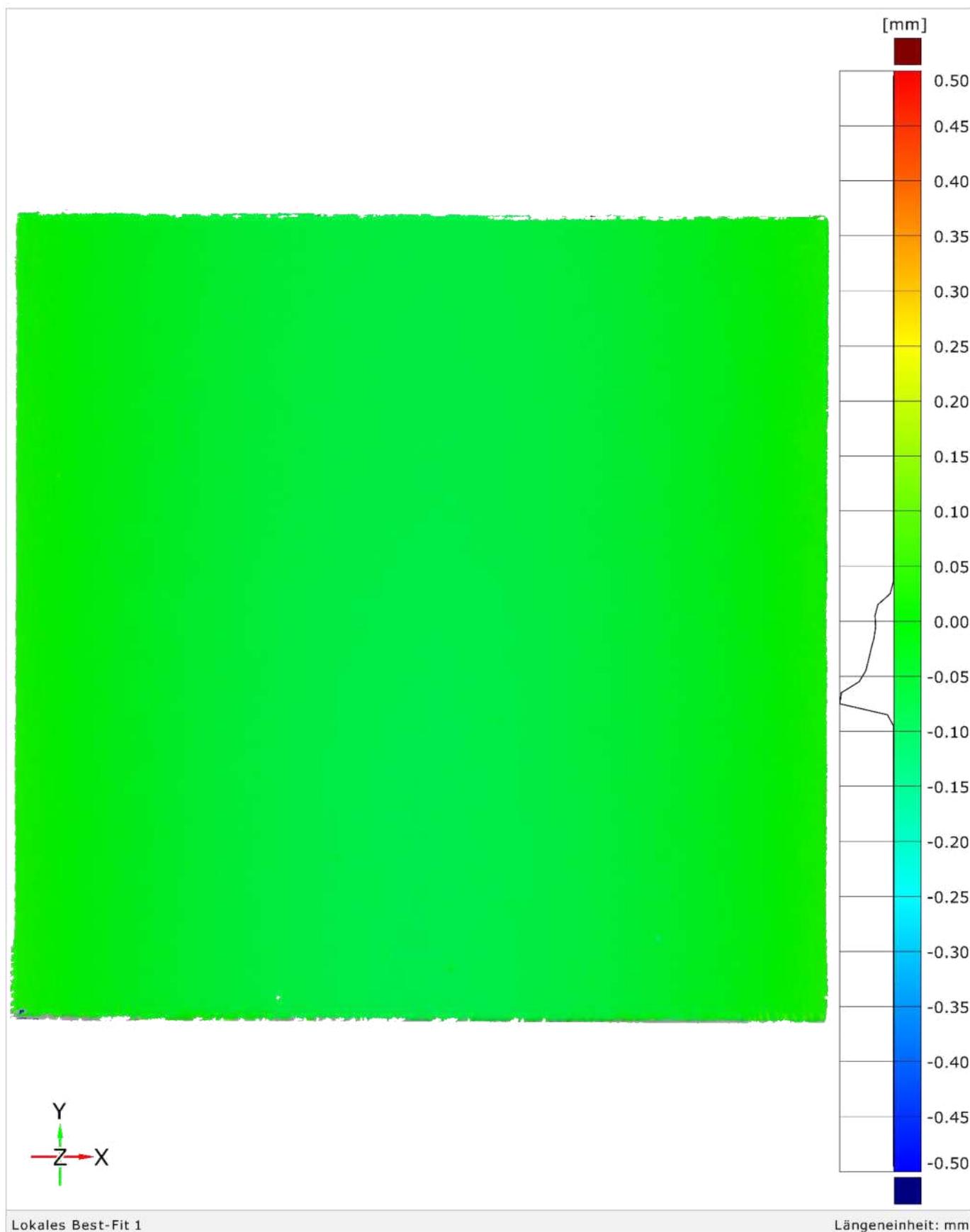
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

Freising | Probekörper SM1 |



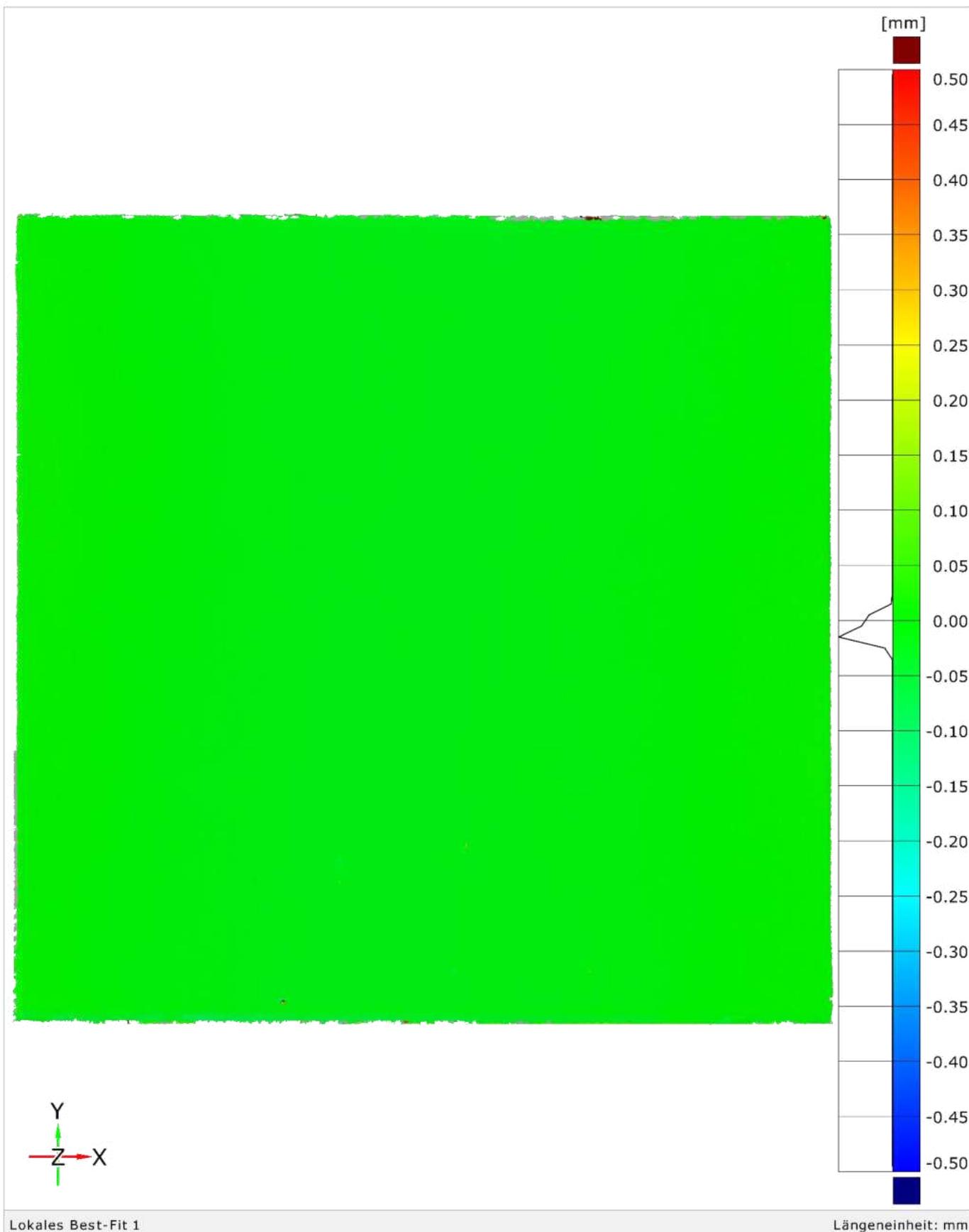
Freising | Probekörper SM1 | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

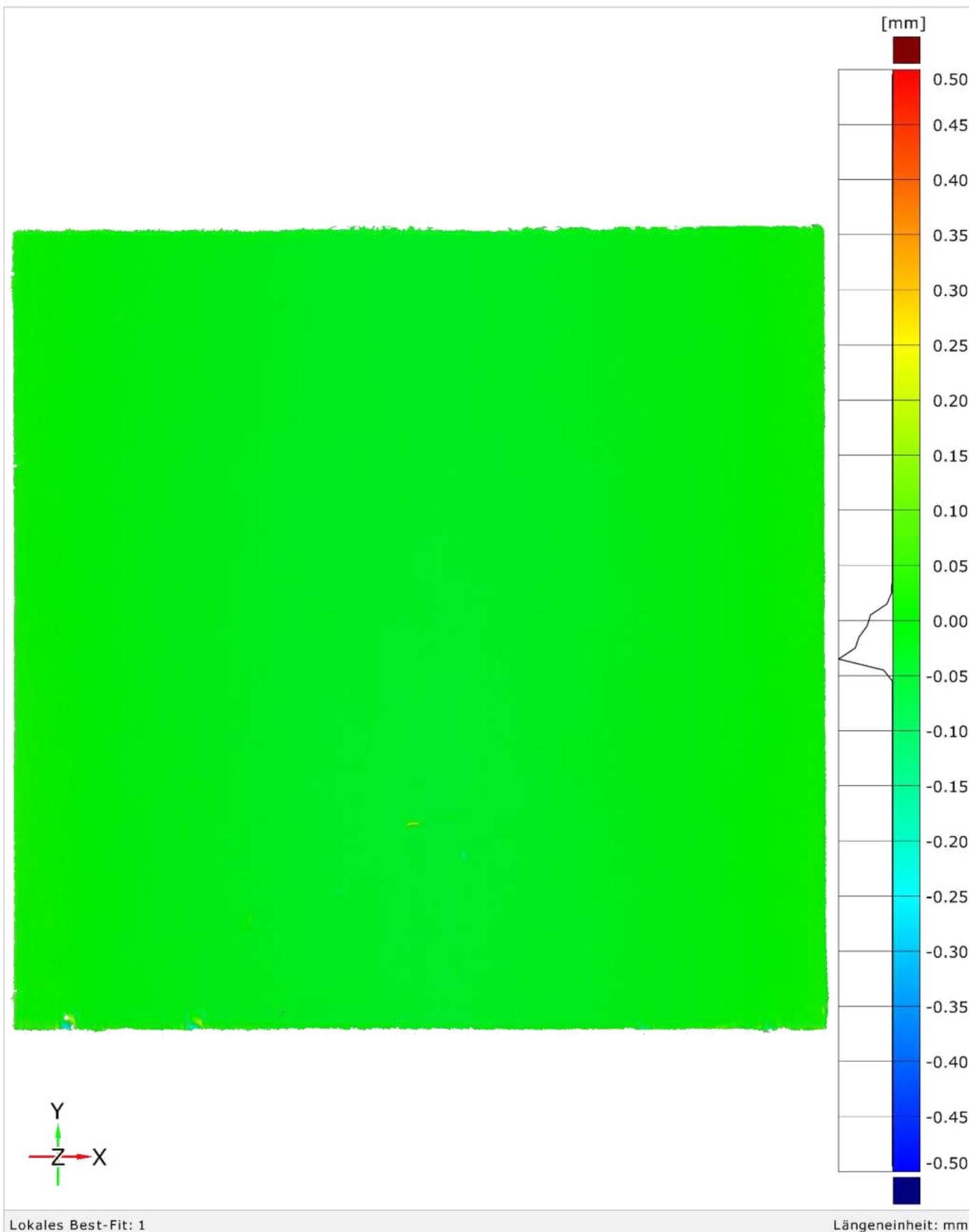
Freising | Probekörper SM1 | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



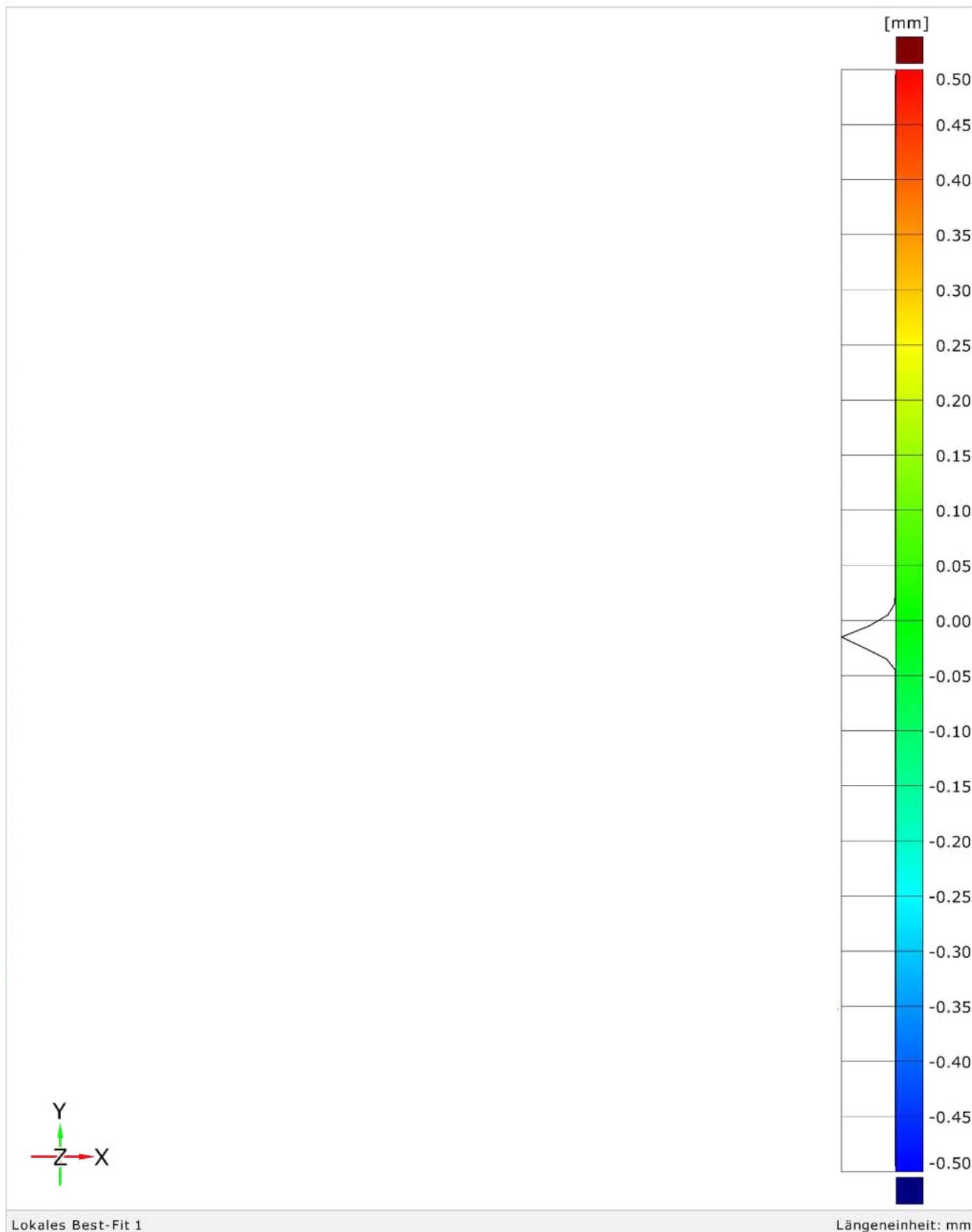
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

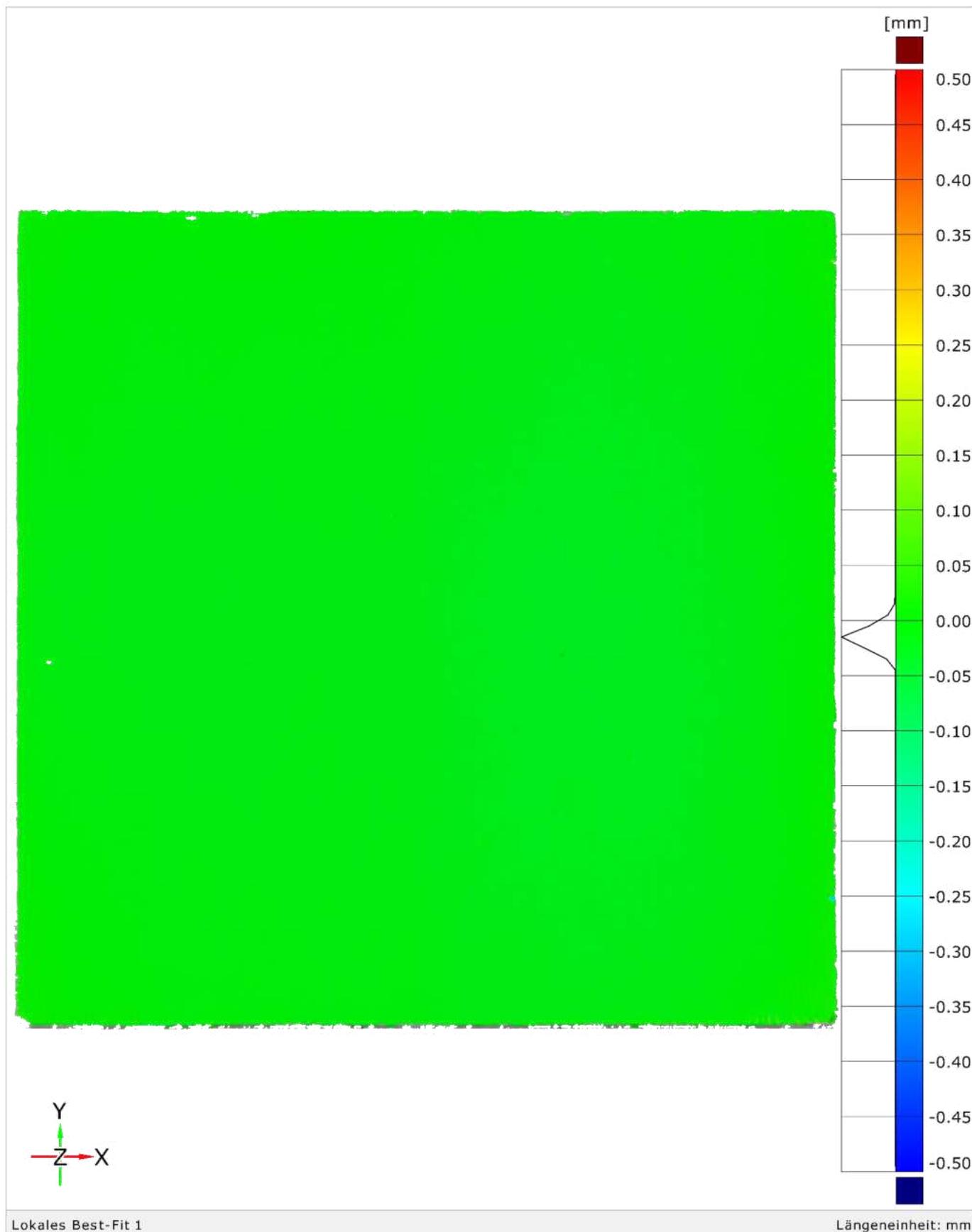
Freising | Probekörper SM1 | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



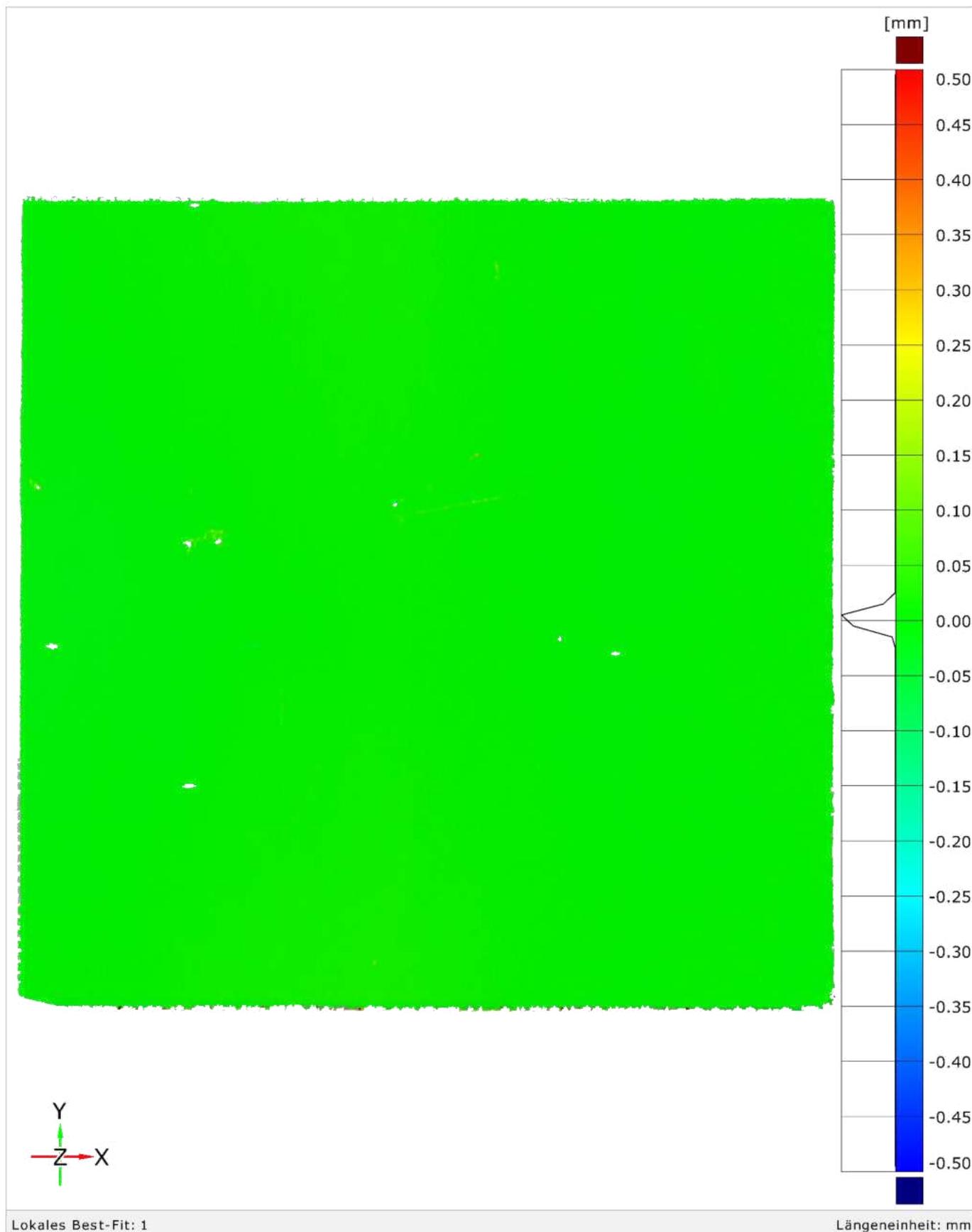
Freising | Probekörper VGM1 |



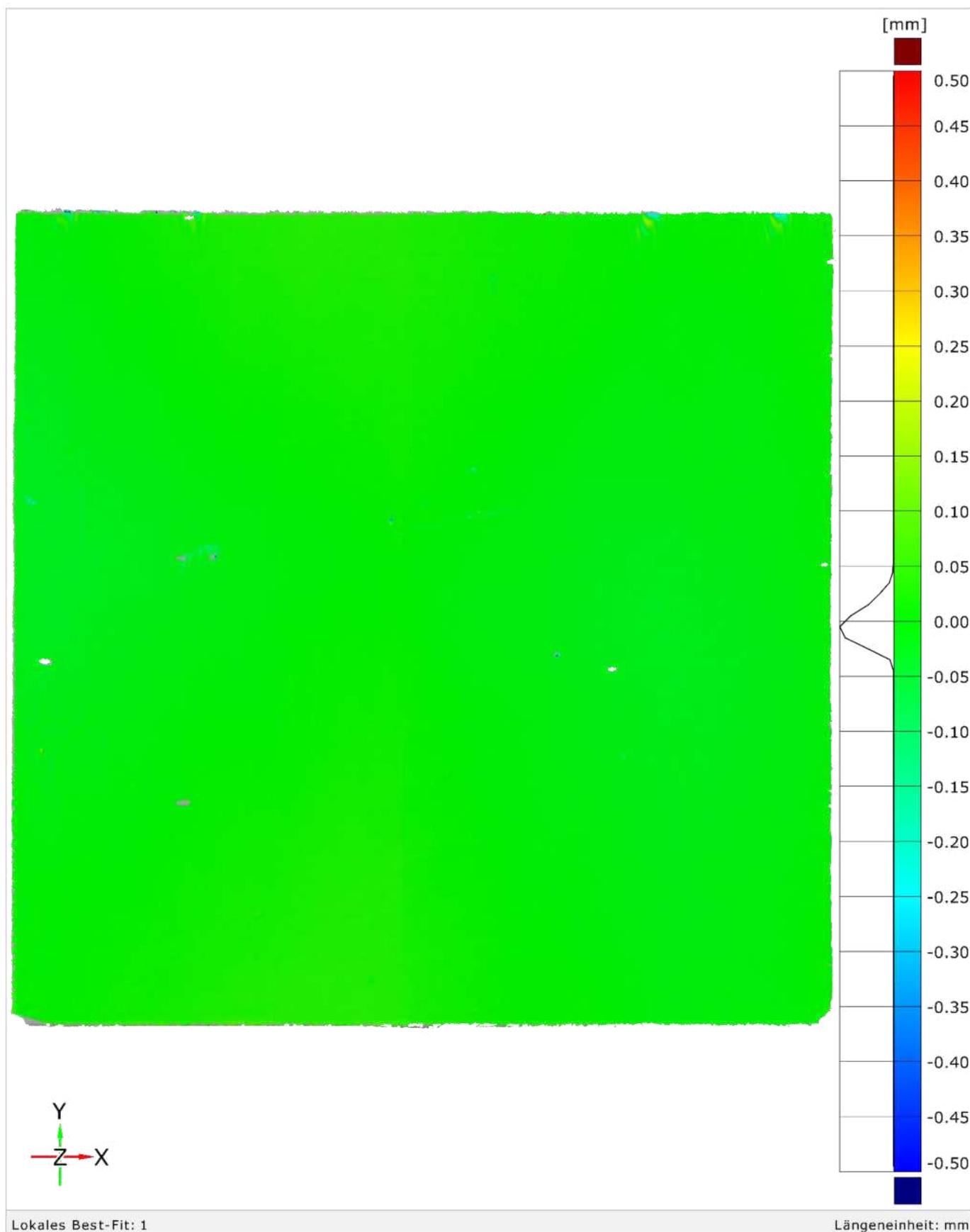
Freising | Probekörper VGM1 | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



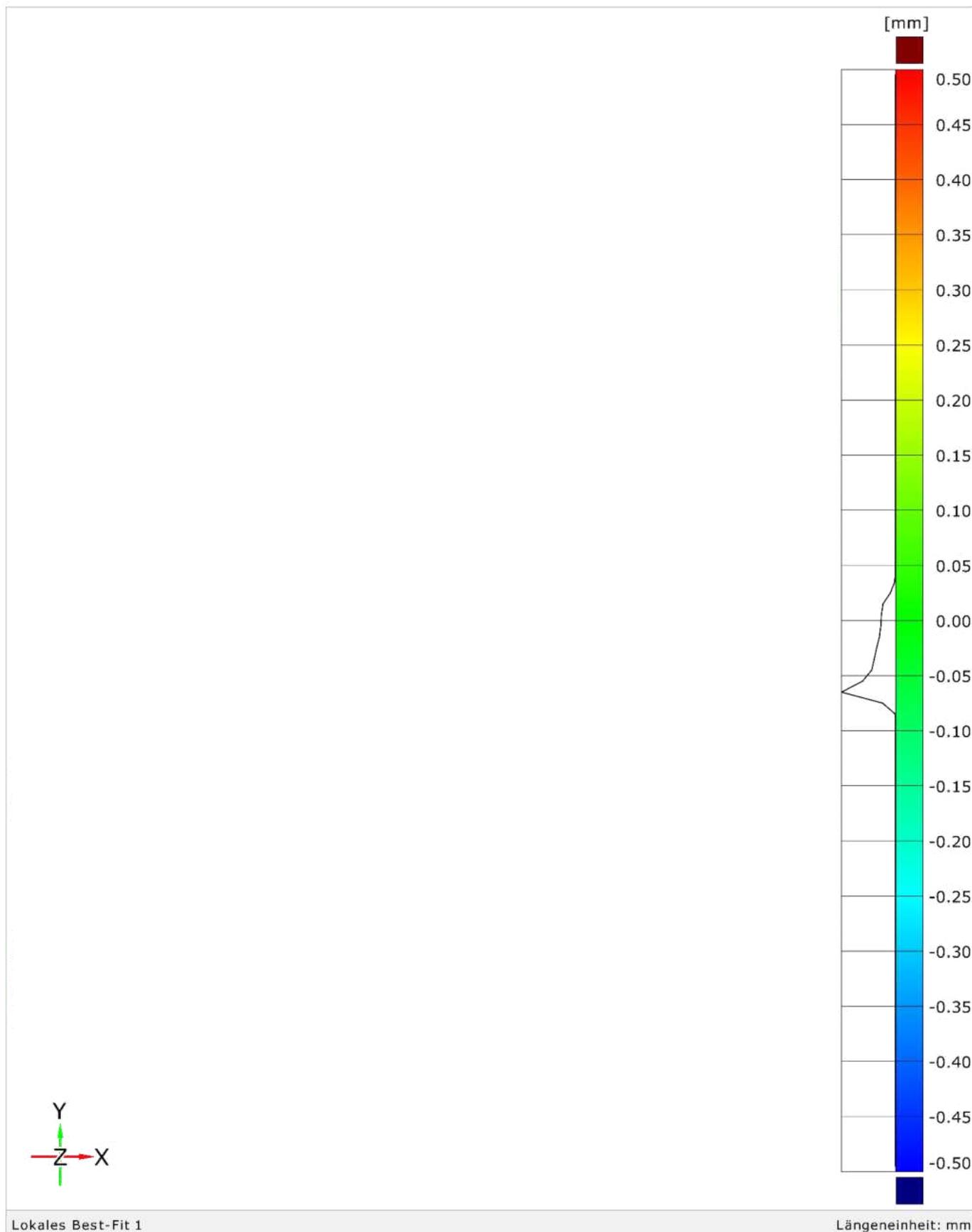
Freising | Probekörper VGM1 | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



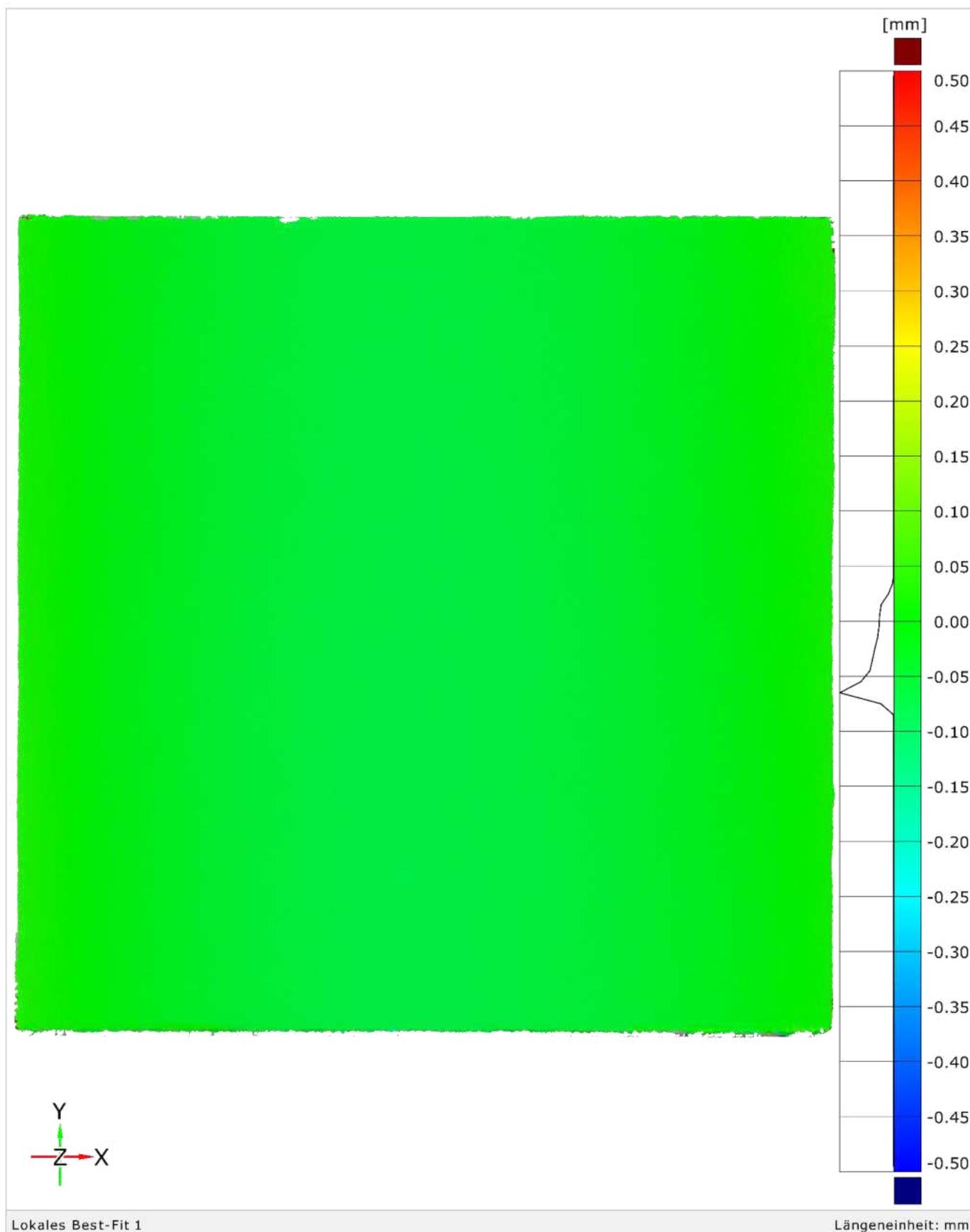
Freising | Probekörper VGM1 | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



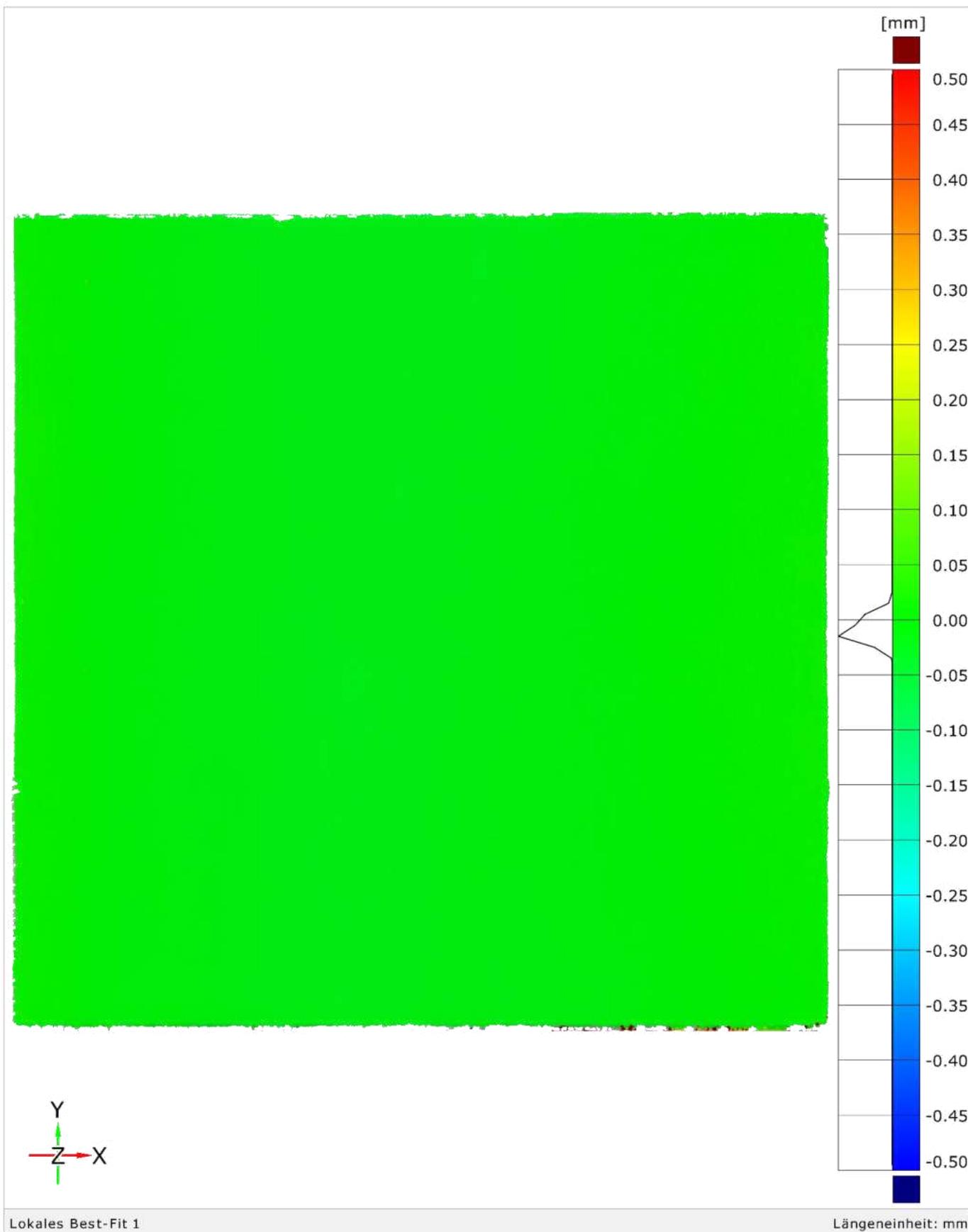
Freising | Probekörper VM1 |



Freising | Probekörper VM1 | 24.01.2024 (Soll), 30.01.2024 (Ist)



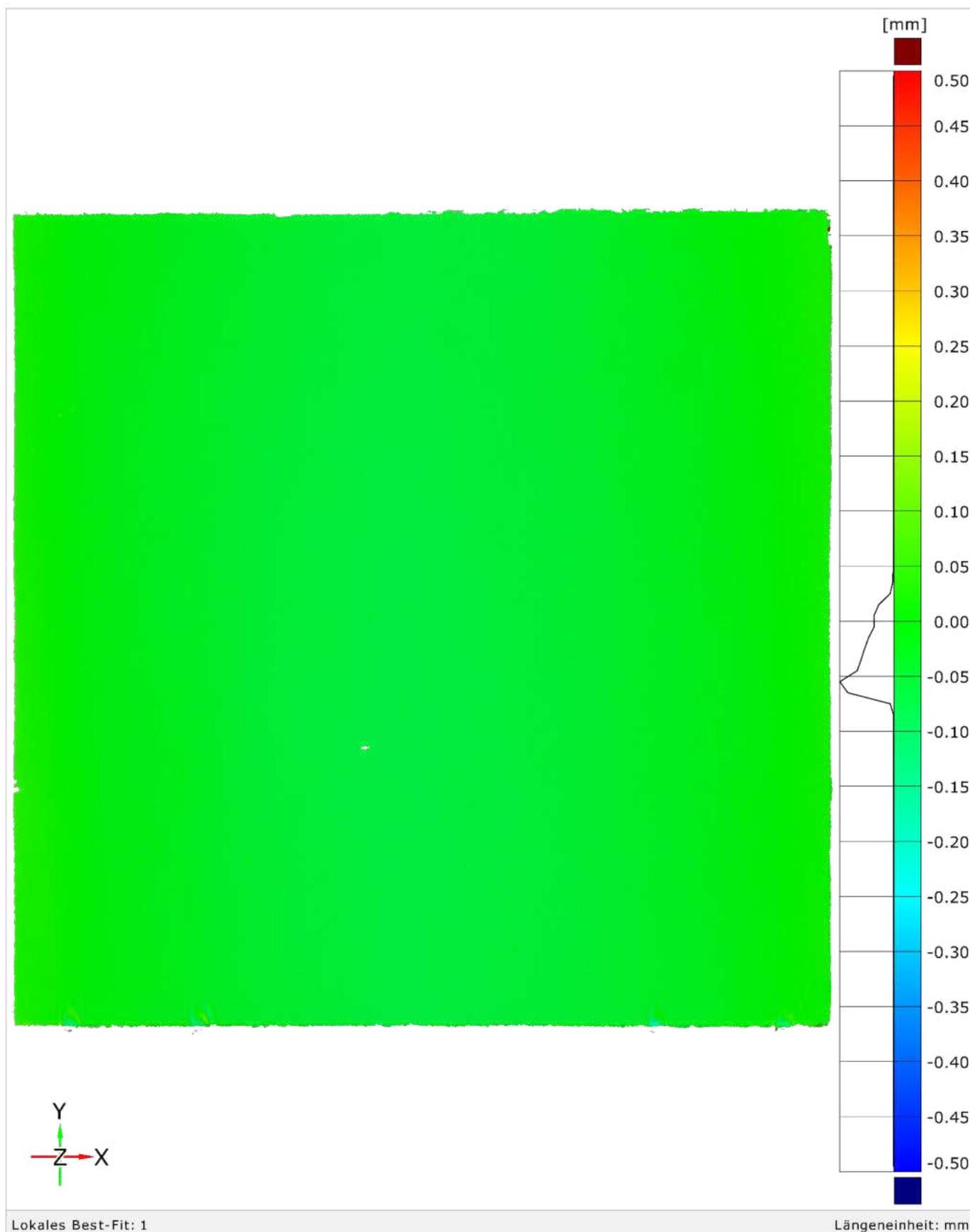
Freising | Probekörper VM1 | 30.01.2024 (Soll), 15.02.2024 (Ist)



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

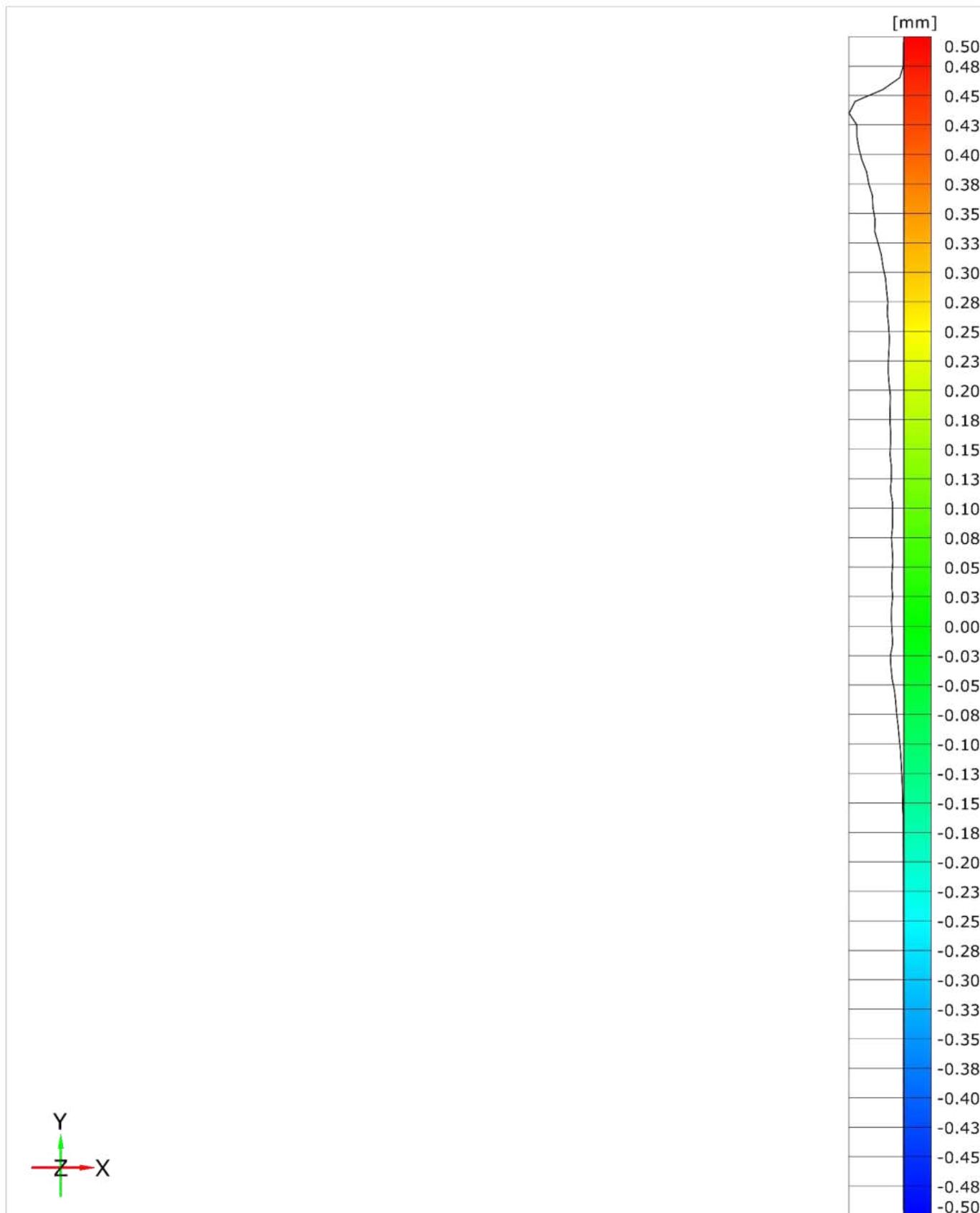
Freising | Probekörper VM1 | 15.02.2024 (Soll), 16.04.2024 (Ist)



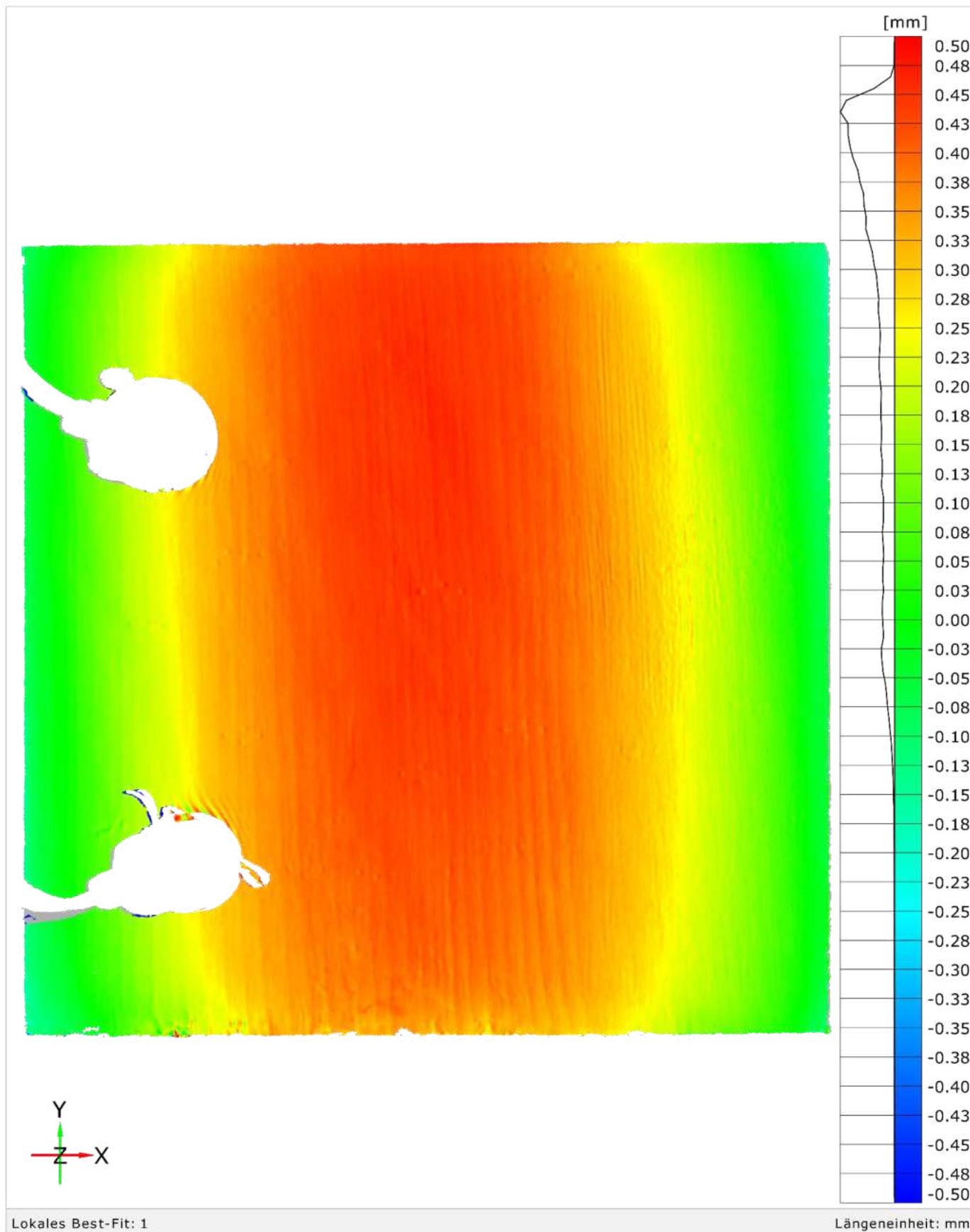
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | B-M-2 |



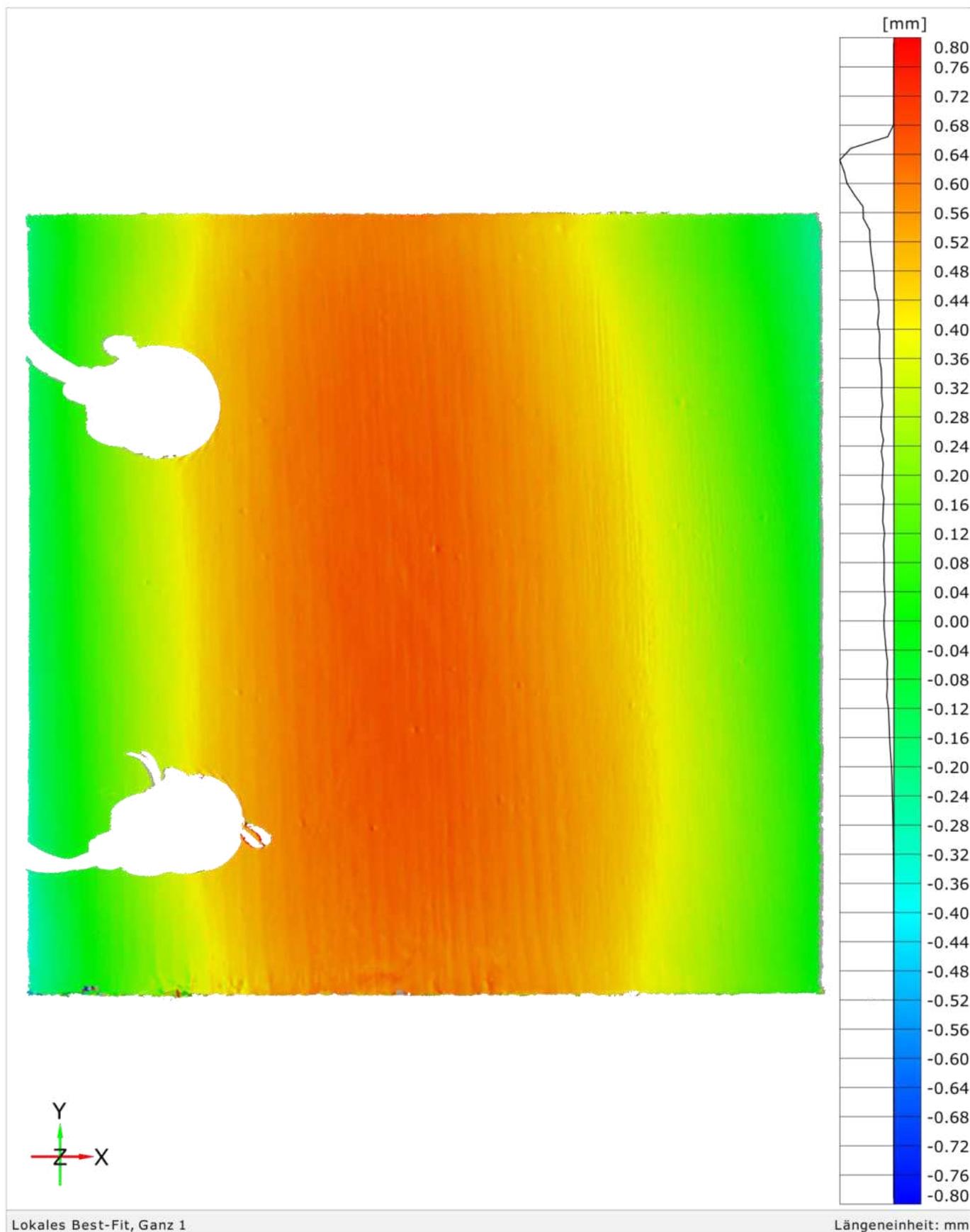
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-07-24, 16:20



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

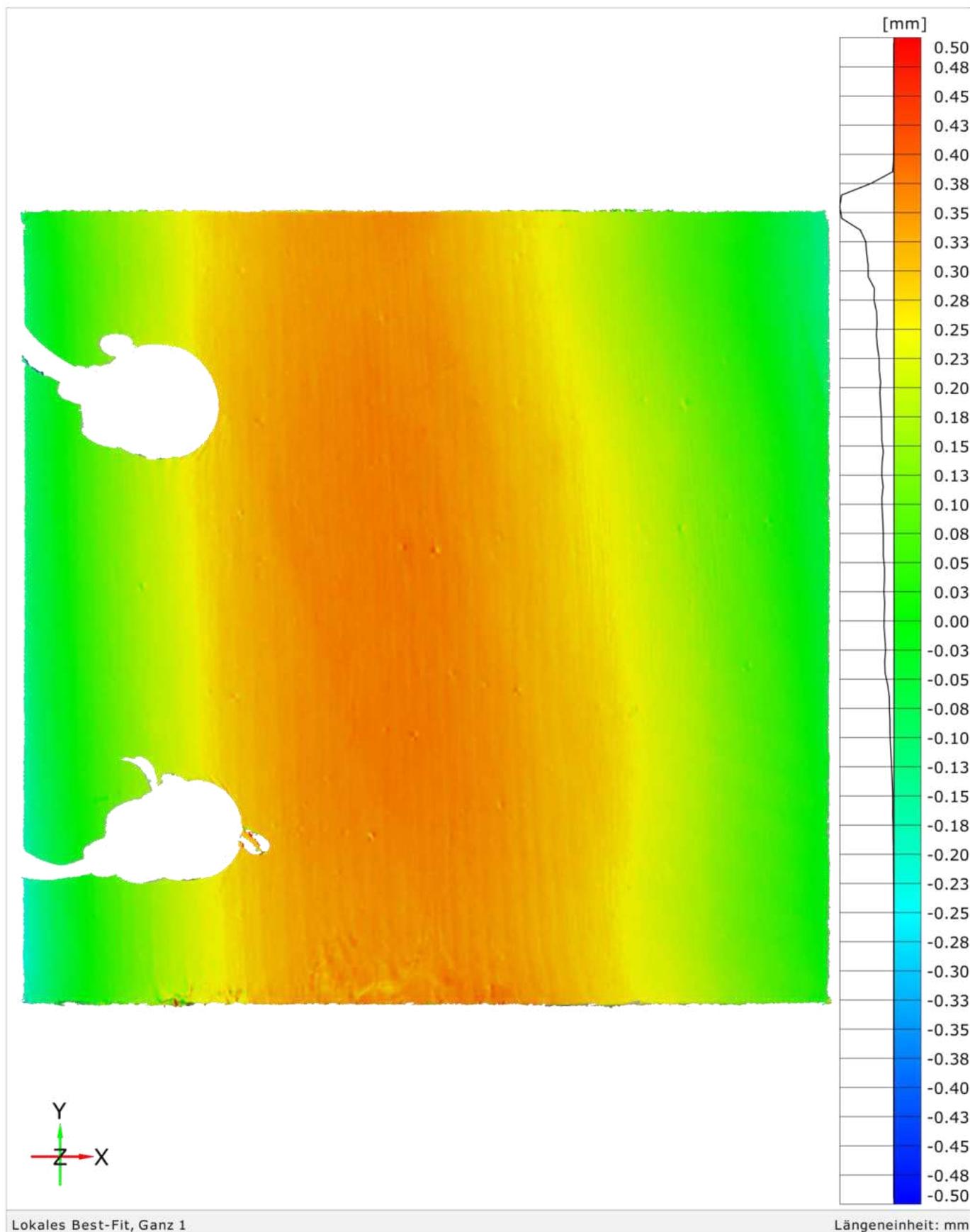
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-24, 16:20 und 2023-07-25, 11:45



Lokales Best-Fit, Ganz 1

Längeneinheit: mm

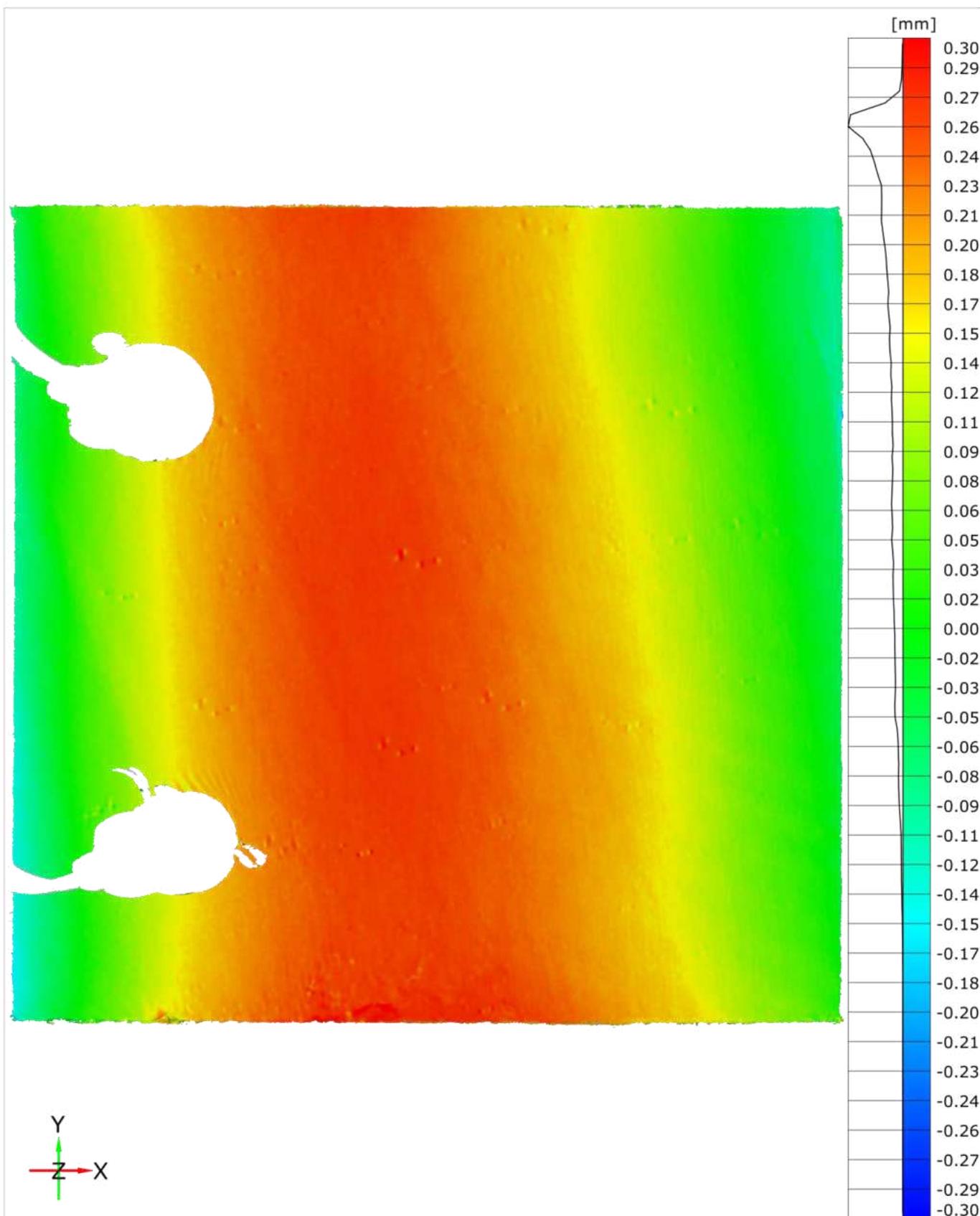
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-25, 11:45 und 2023-07-26, 11:40



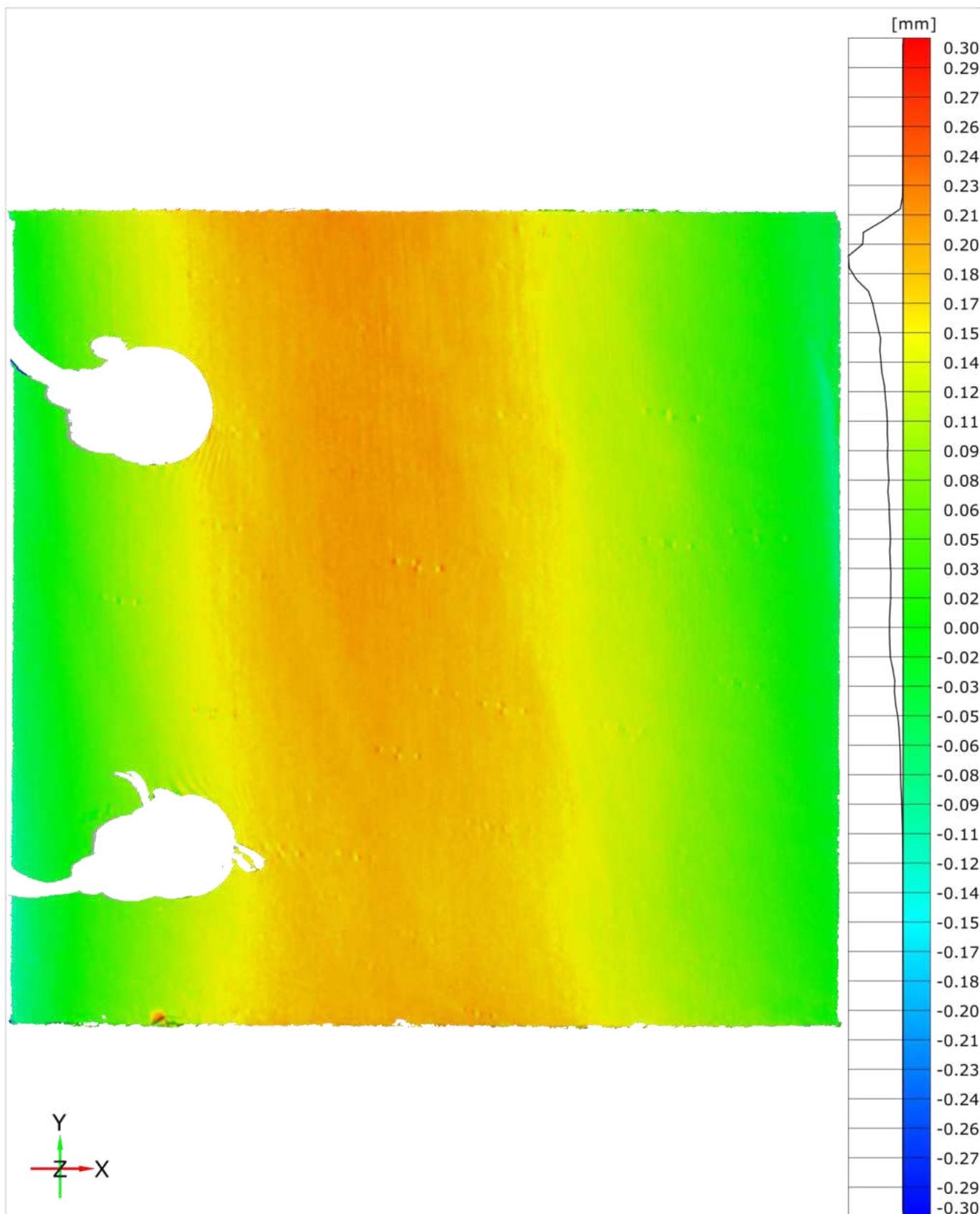
Lokales Best-Fit, Ganz 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-26, 11:40 und 2023-07-27, 12:35



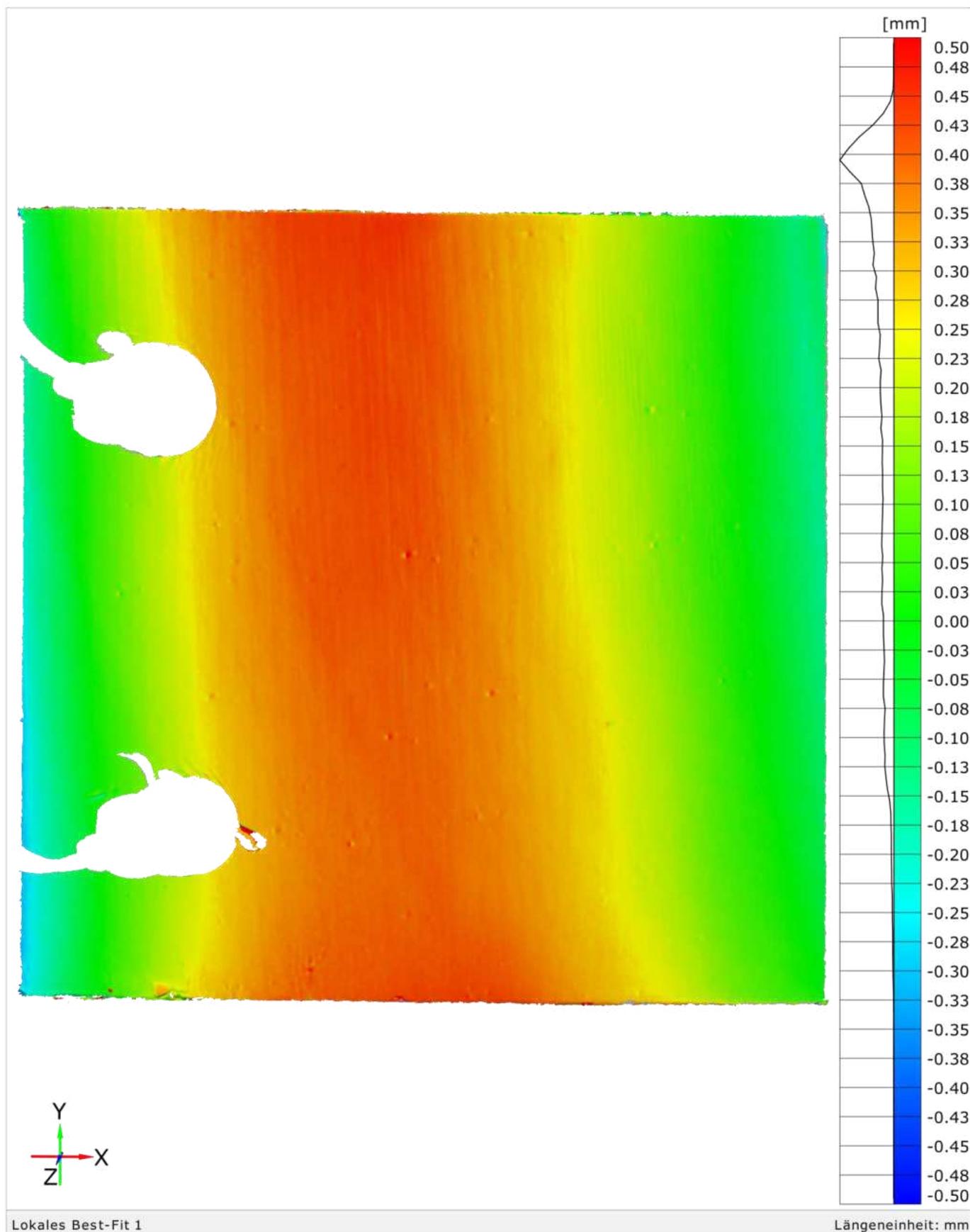
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-27, 12:35 und 2023-07-28, 11:00



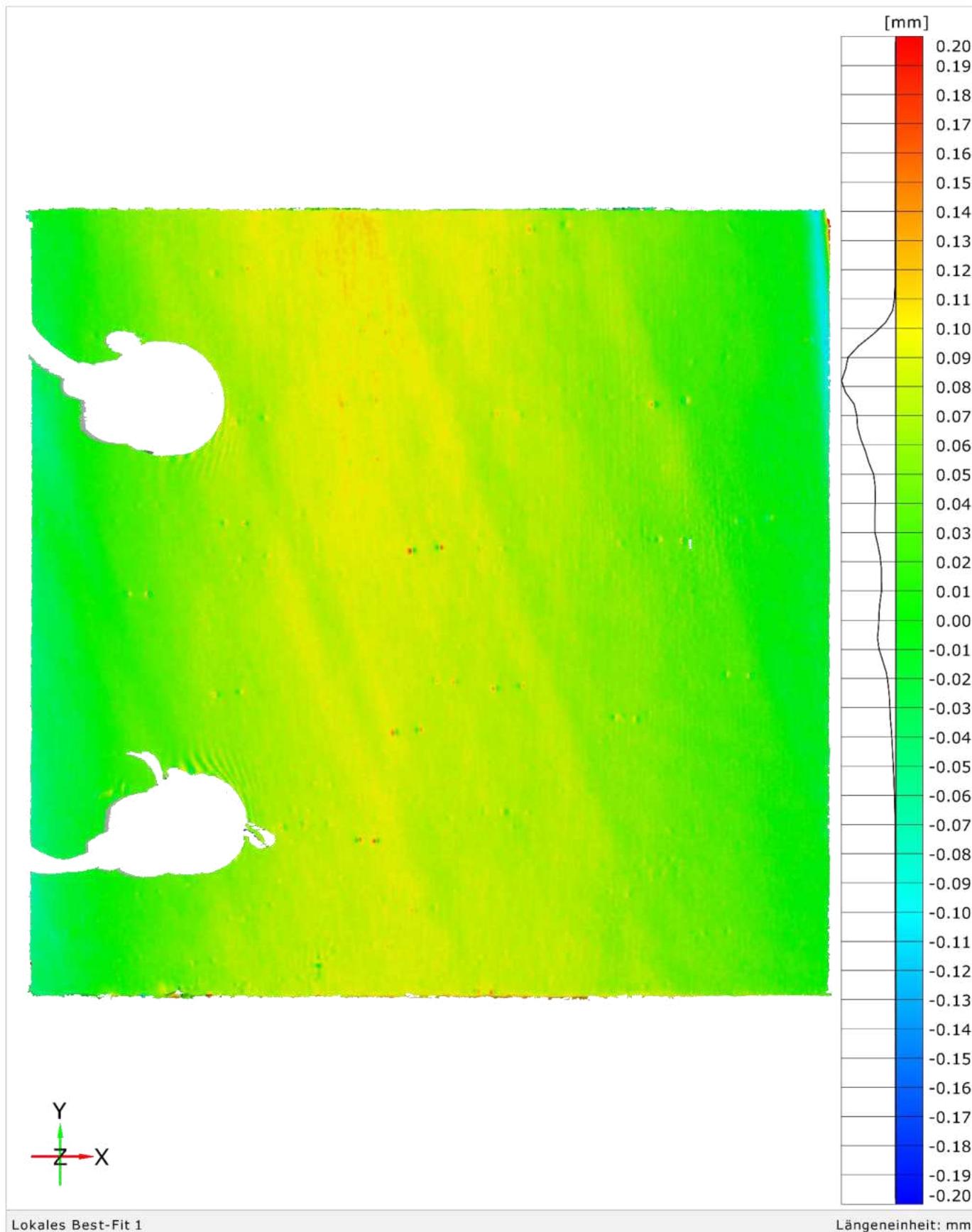
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-28, 11:00 und 2023-07-31, 14:19



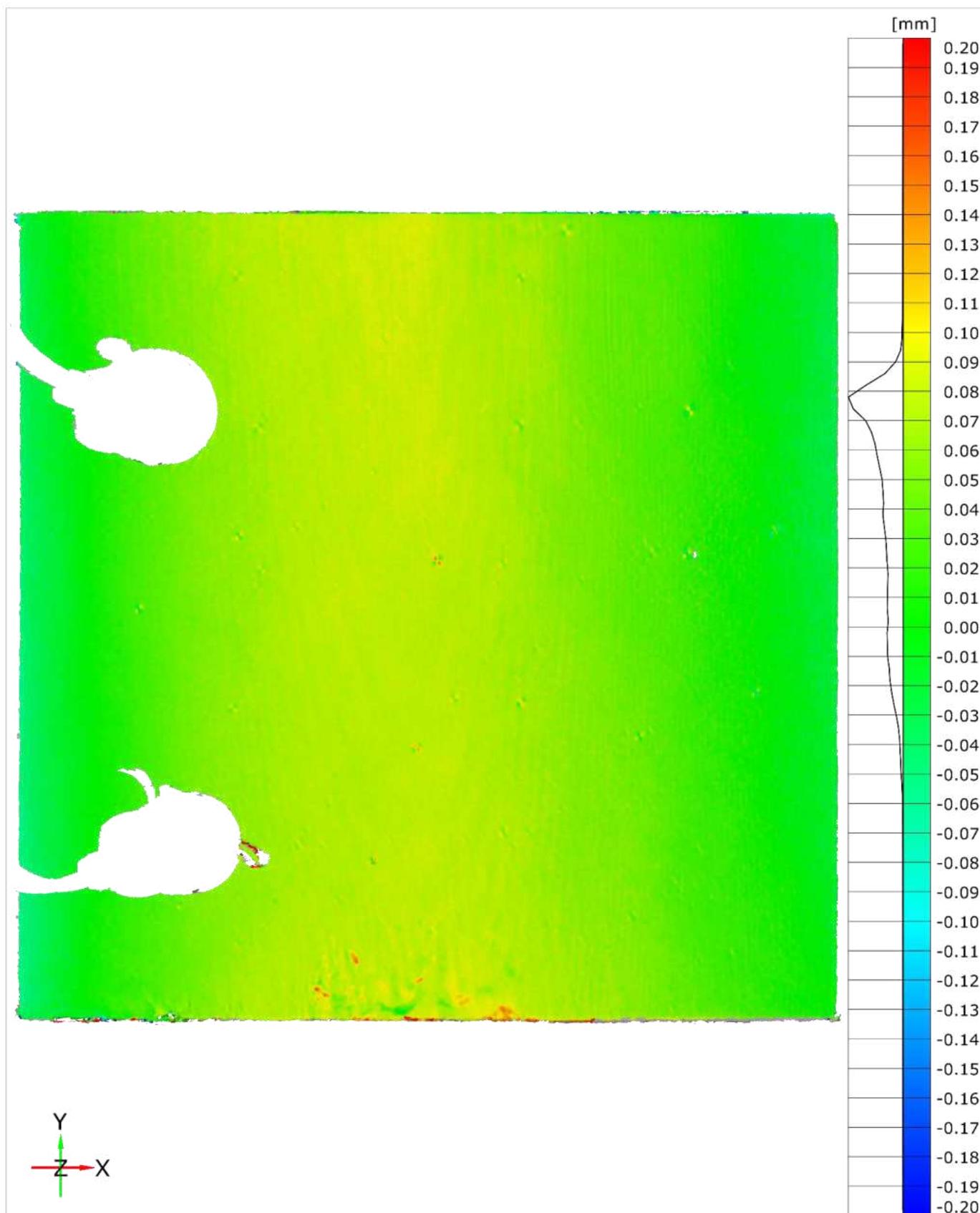
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-31, 14:19 und 2023-08-01, 11:50



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

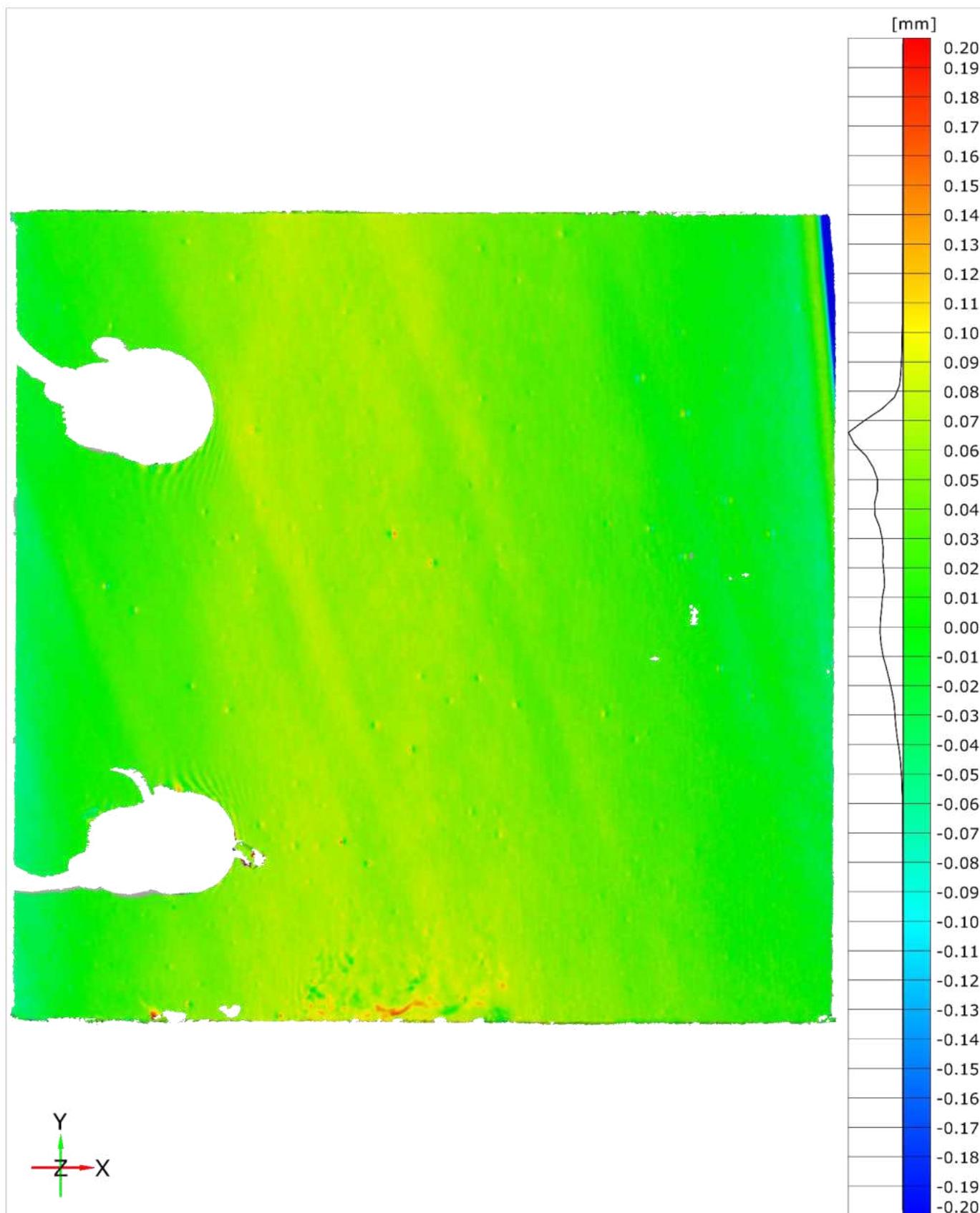
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-01, 11:50 und 2023-08-02, 11:05



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

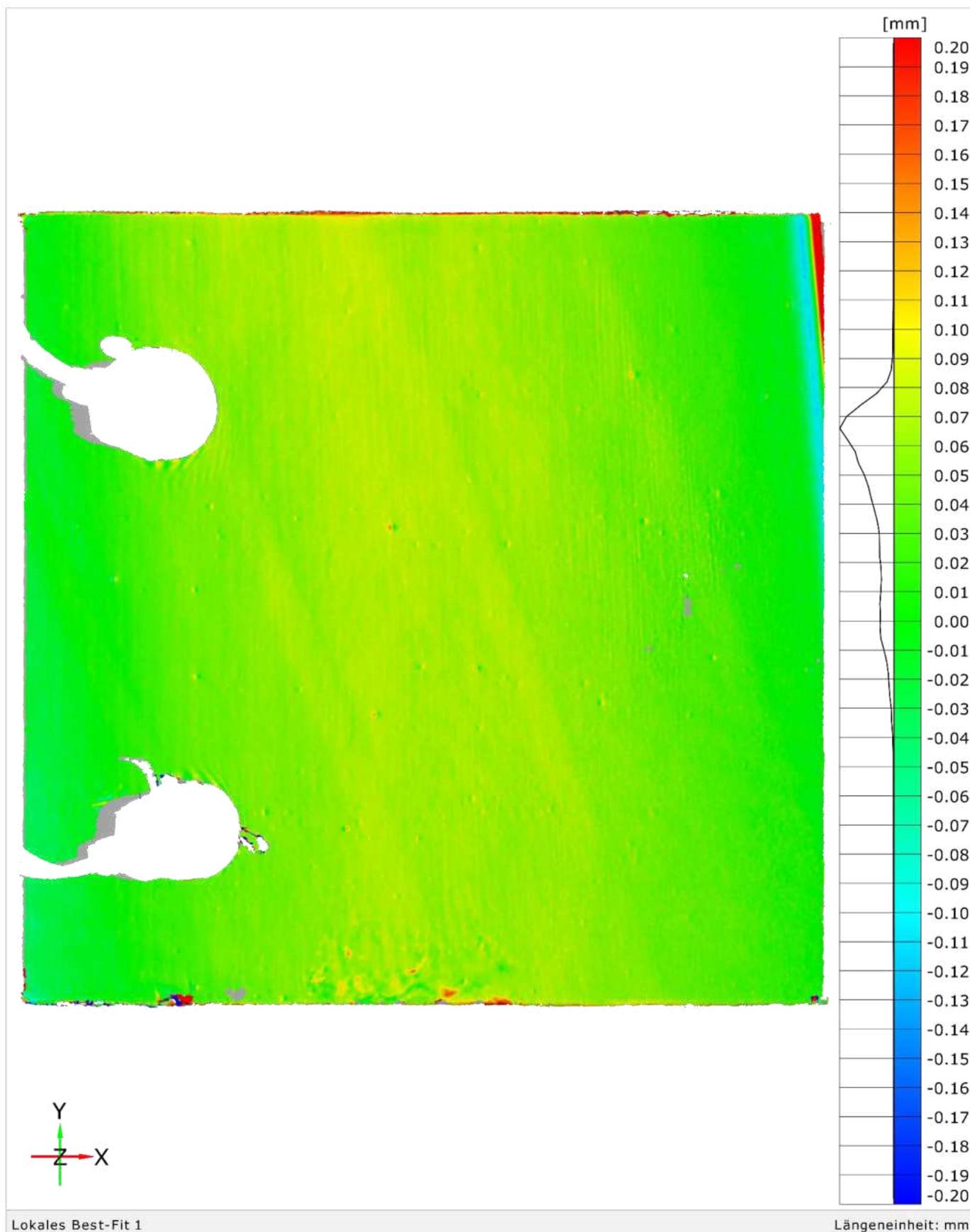
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-02, 11:05 und 2023-08-03, 12:00



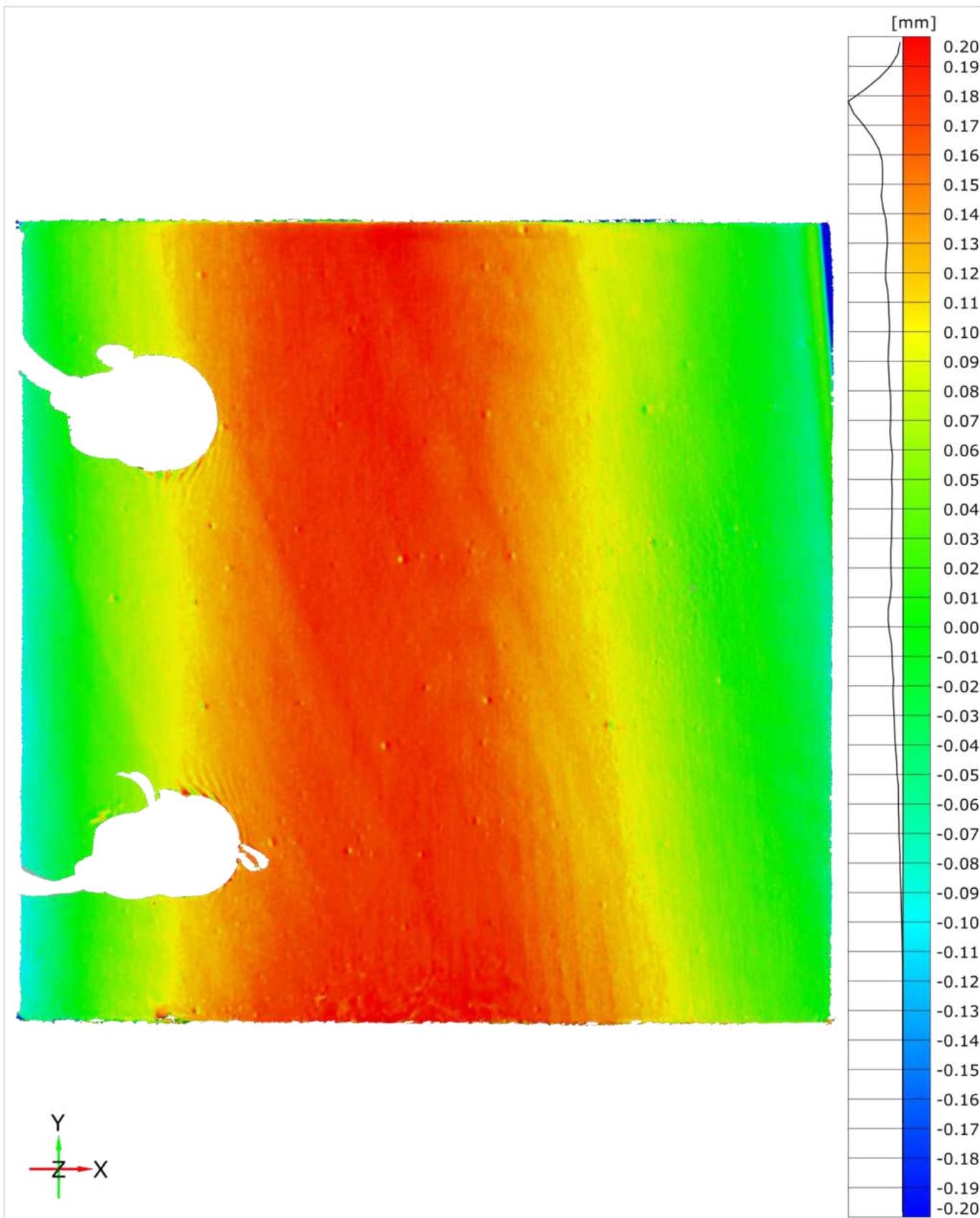
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-03, 12:00 und 2023-08-04, 09:30



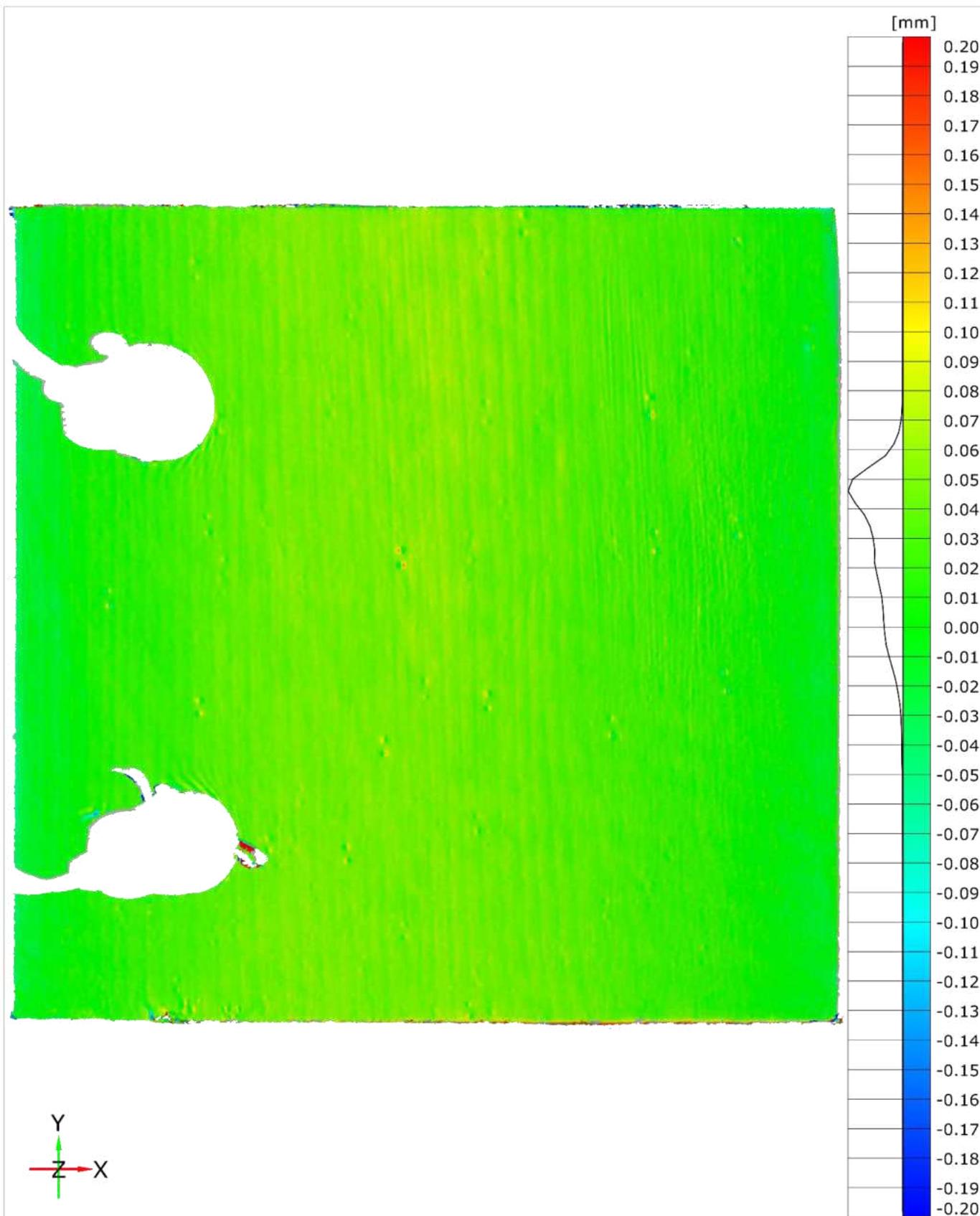
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-04, 09:30 und 2023-08-07, 11:50



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

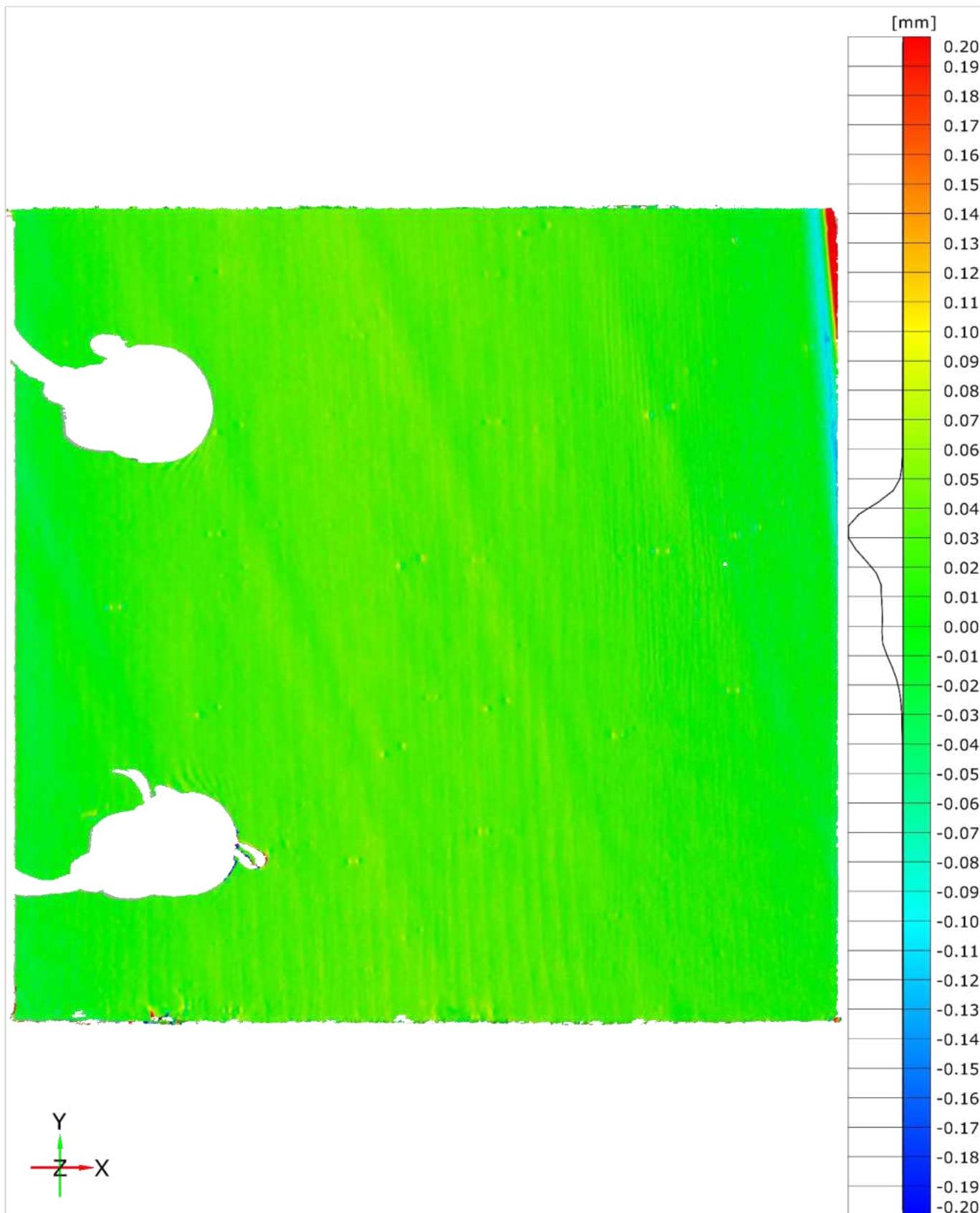
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-07, 11:50 und 2023-08-08, 10:30



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

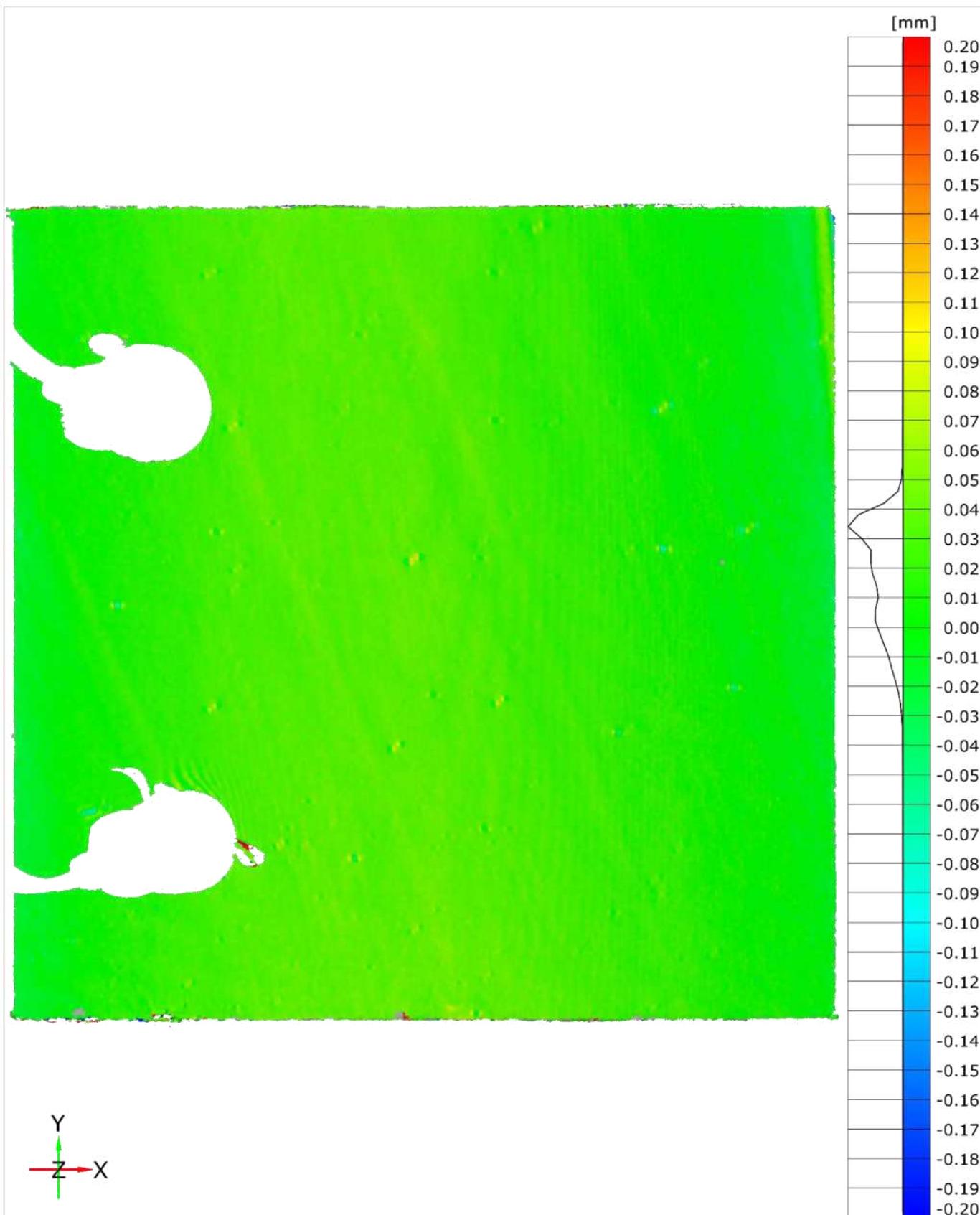
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-08, 10:30 und 2023-08-09, 12:00



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

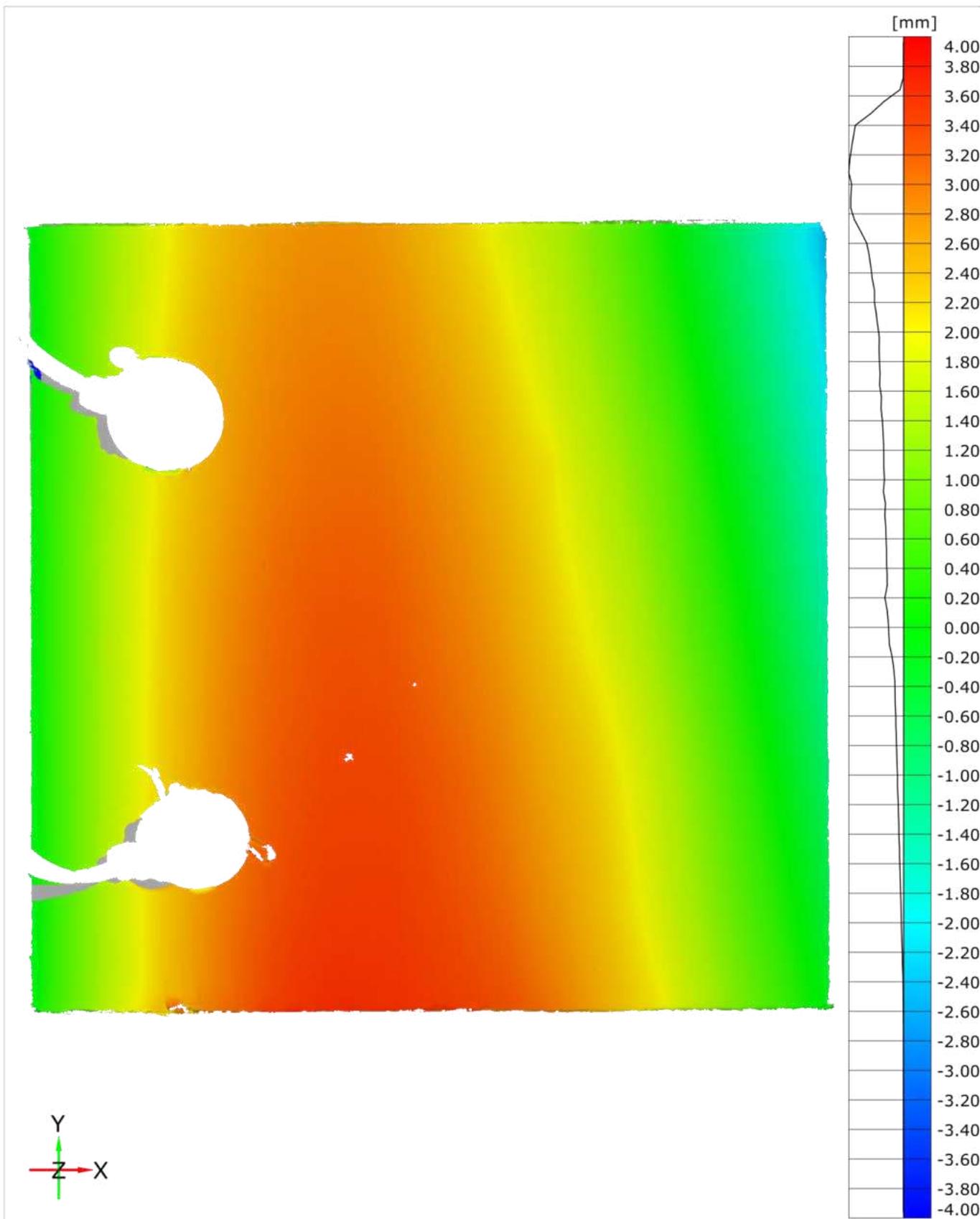
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-08-09, 12:00 und 2023-08-10, 11:09



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

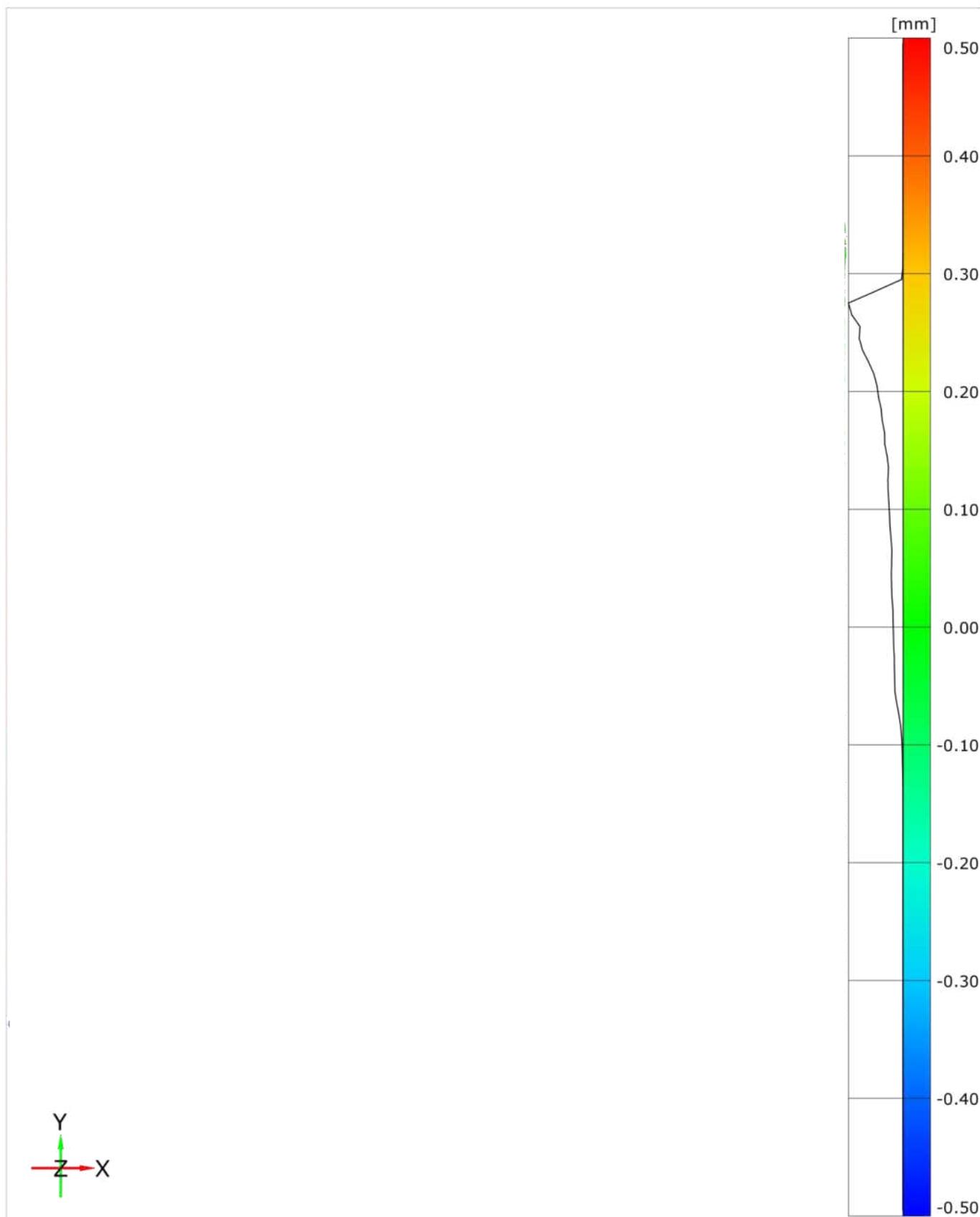
Klimakammertest | B-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-08-11, 09:30



3-Punkt-Ausrichtung

Längeneinheit: mm

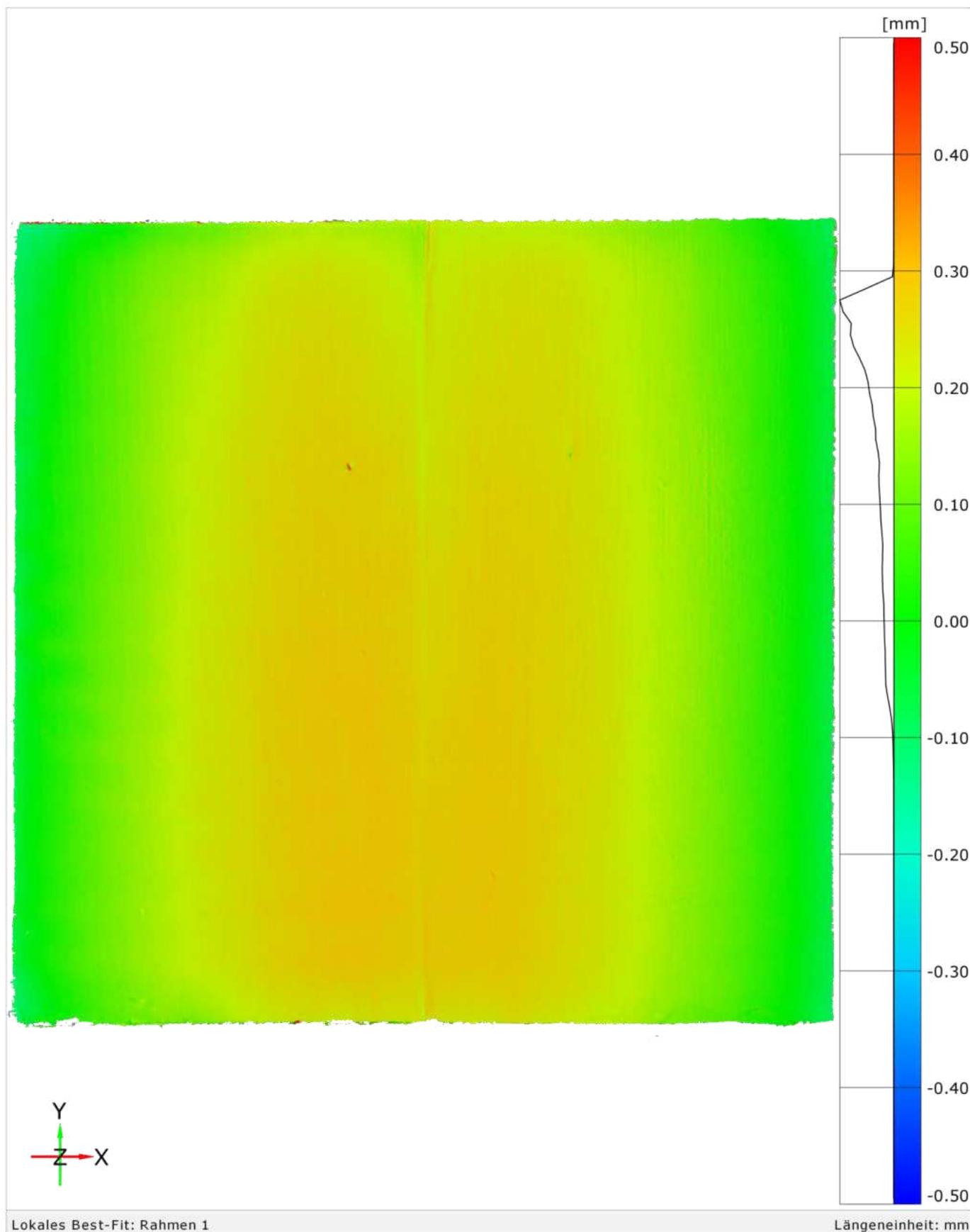
Klimakammertest | S-M-2 |



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

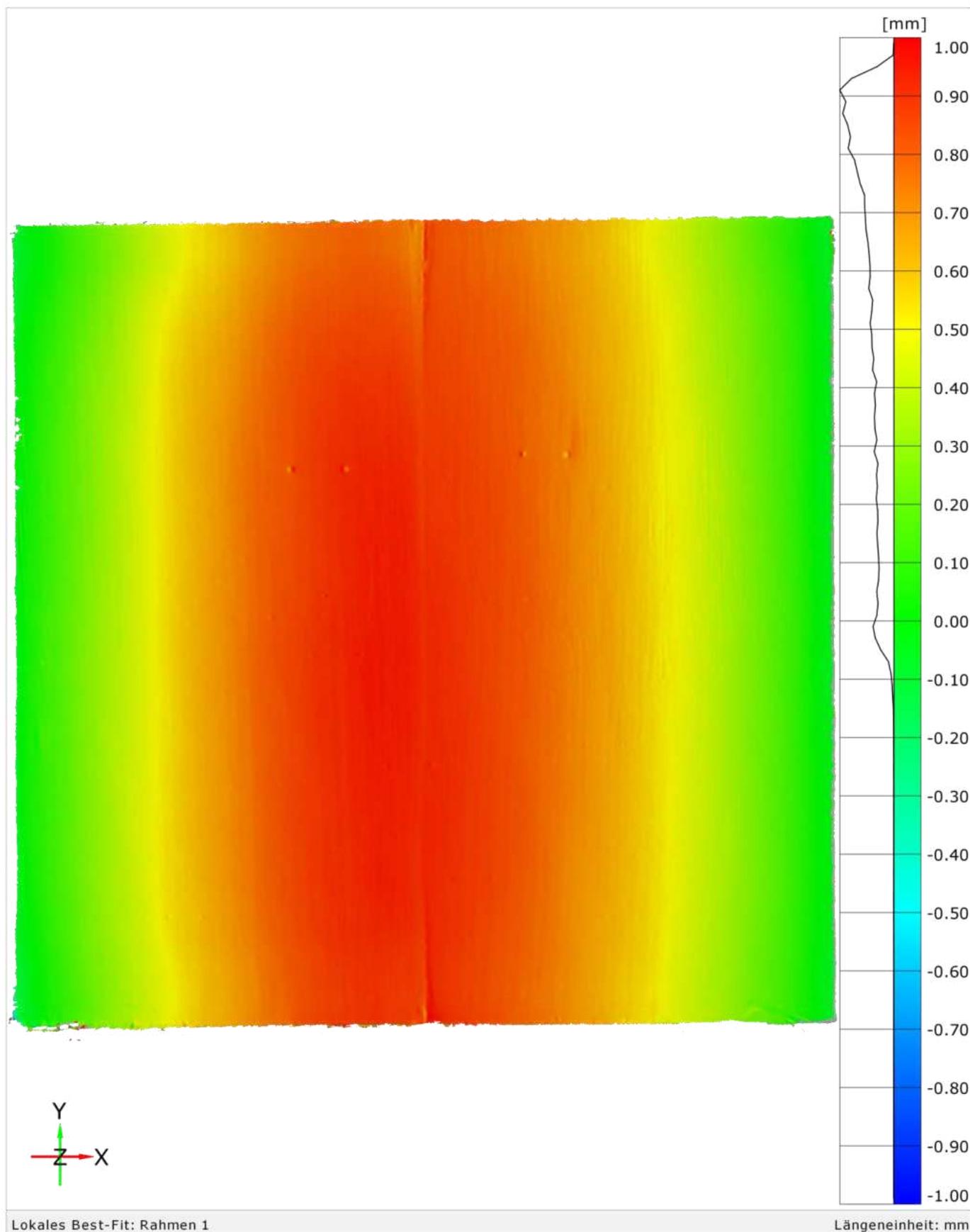
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-07-24, 16:20



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

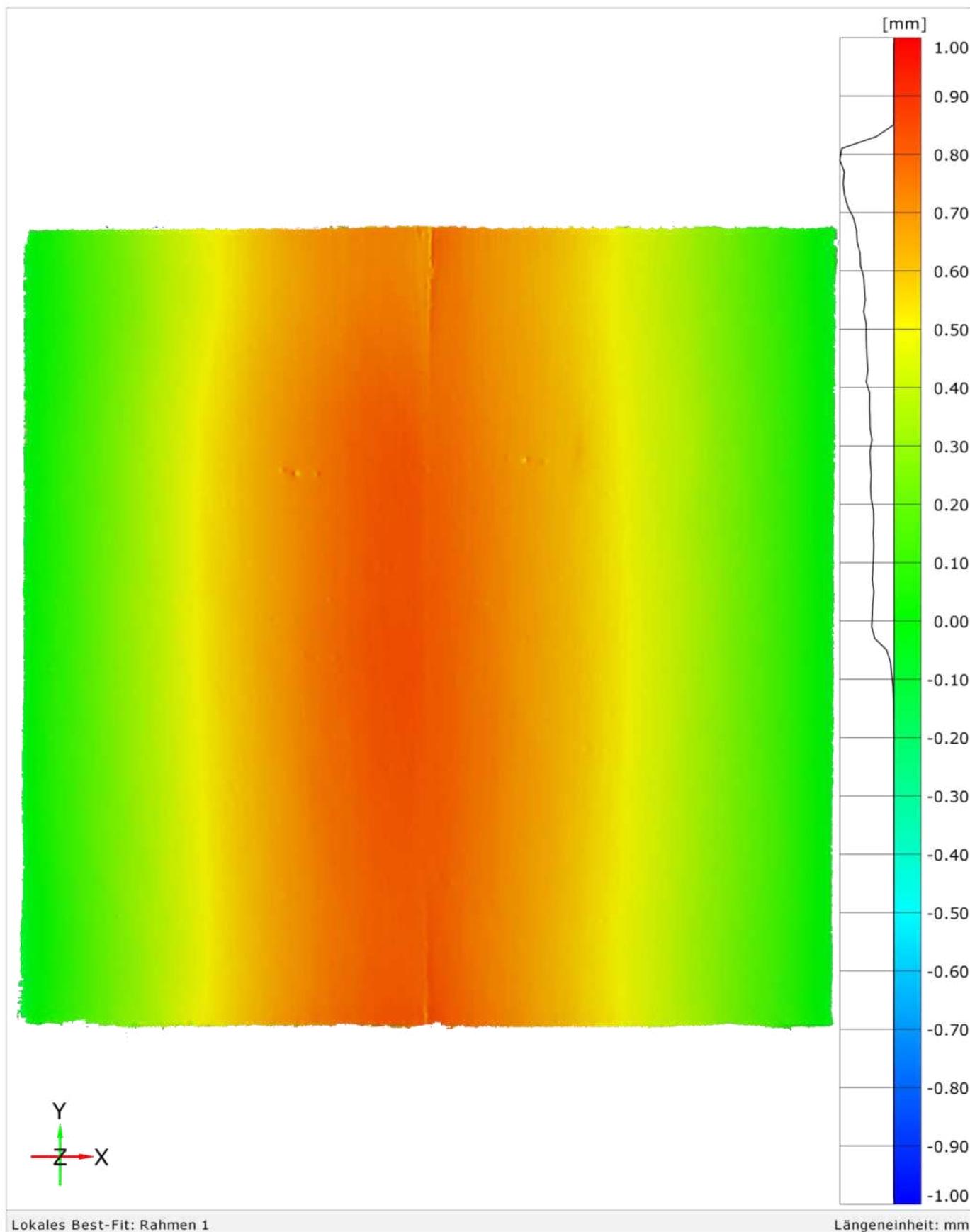
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-24, 16:20 und 2023-07-25, 11:45



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

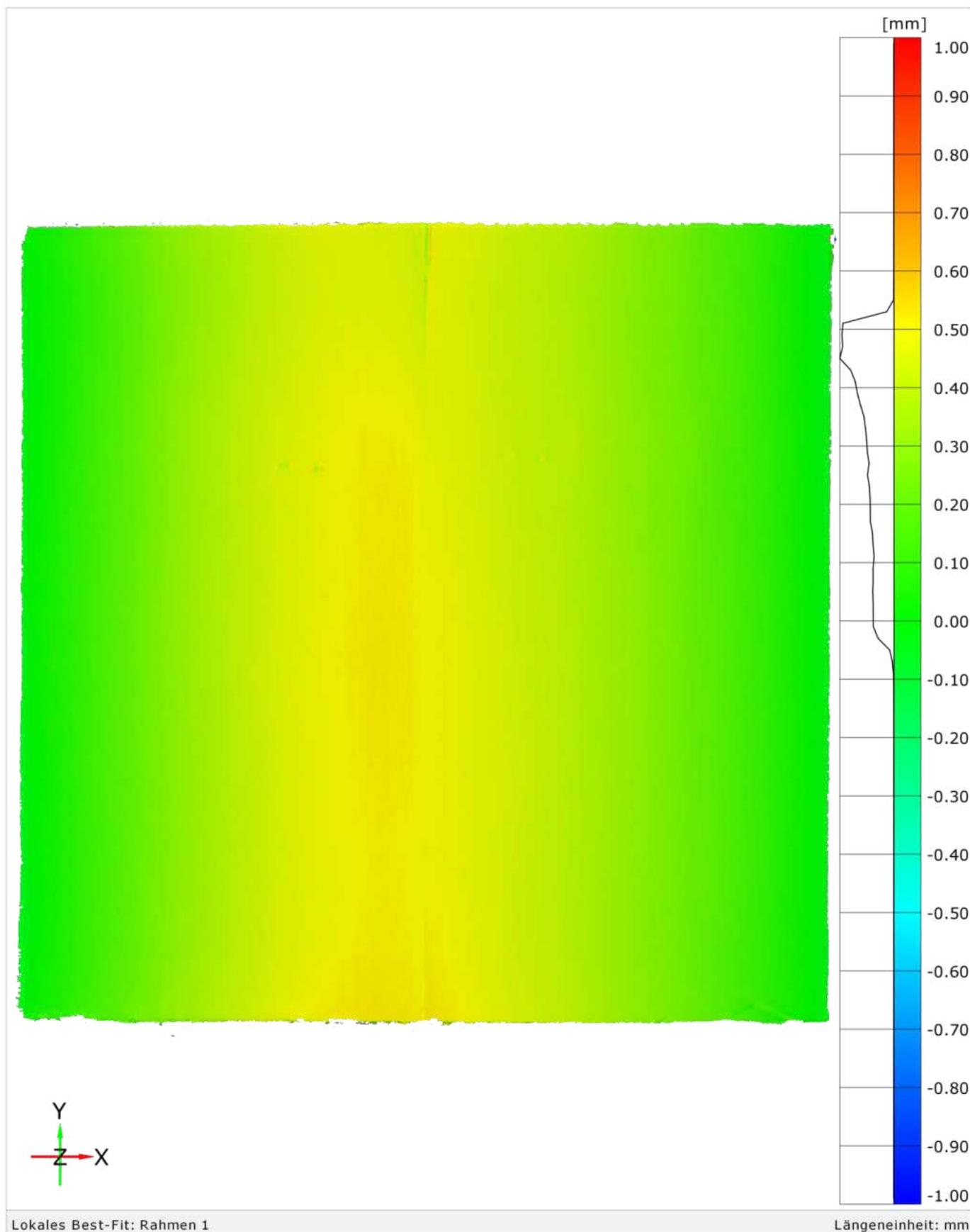
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-25, 11:45 und 2023-07-26, 11:20



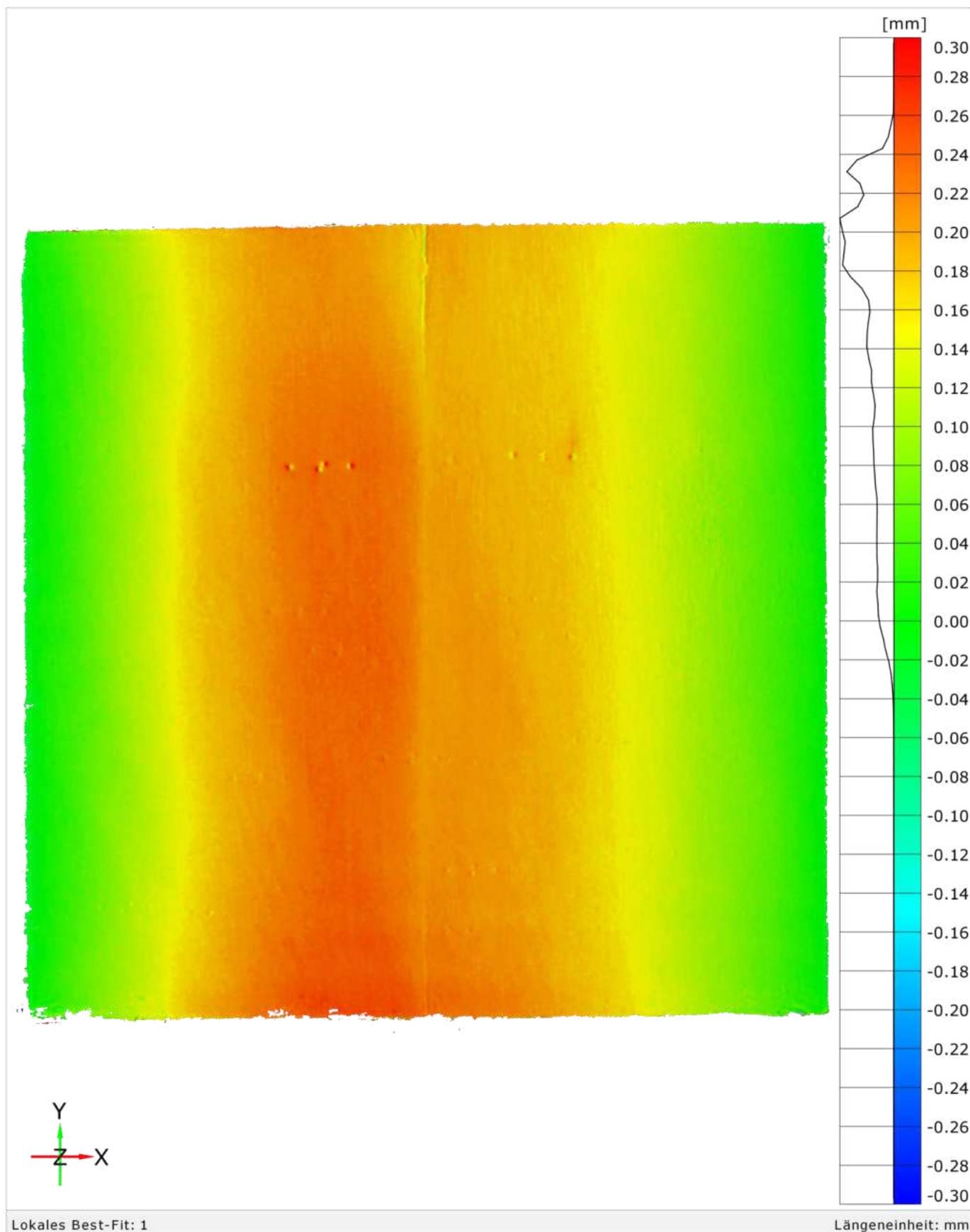
Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-26 , 11:20 und 2023-07-27, 12:35



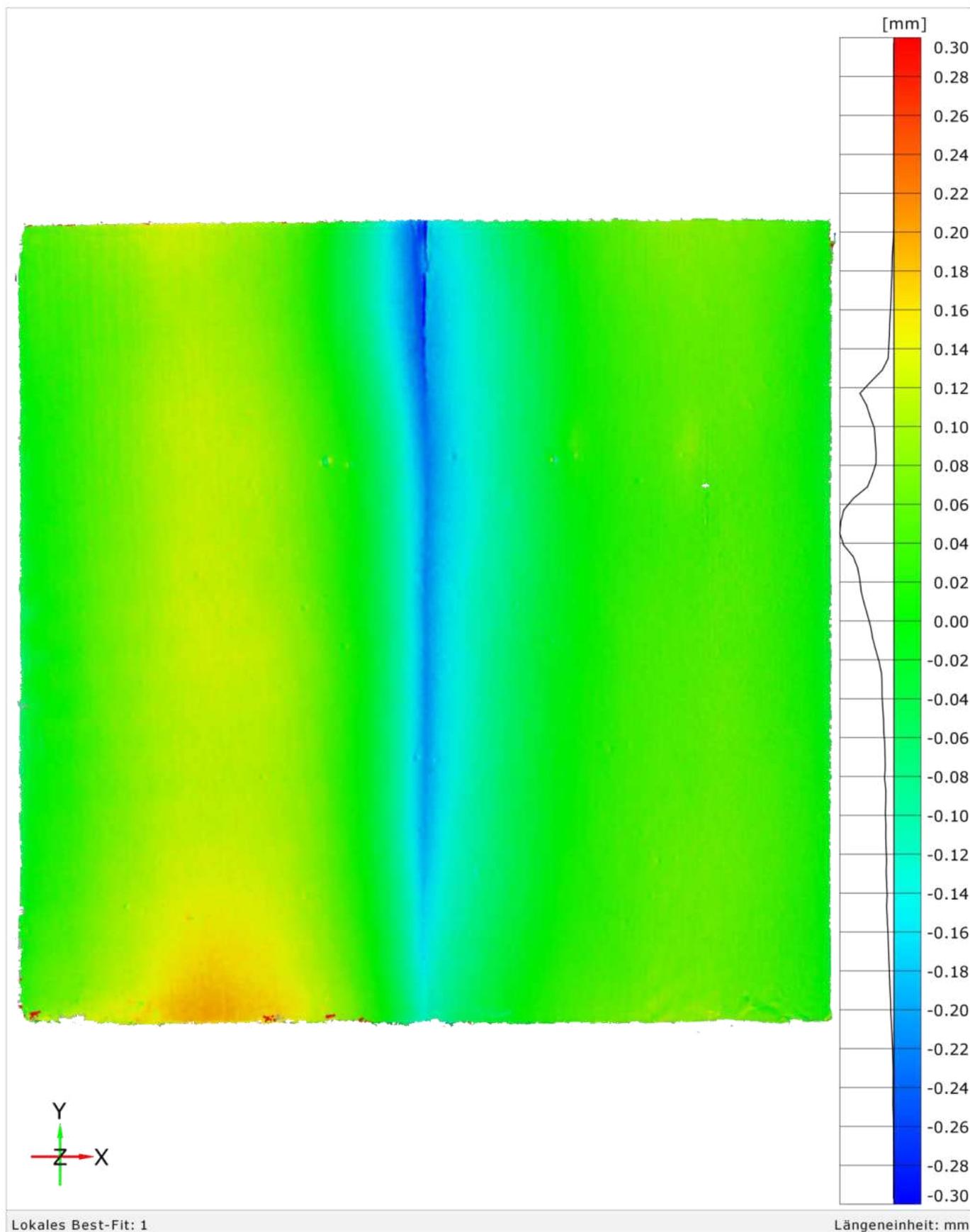
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-27, 12:35 und 2023-07-28, 11:00



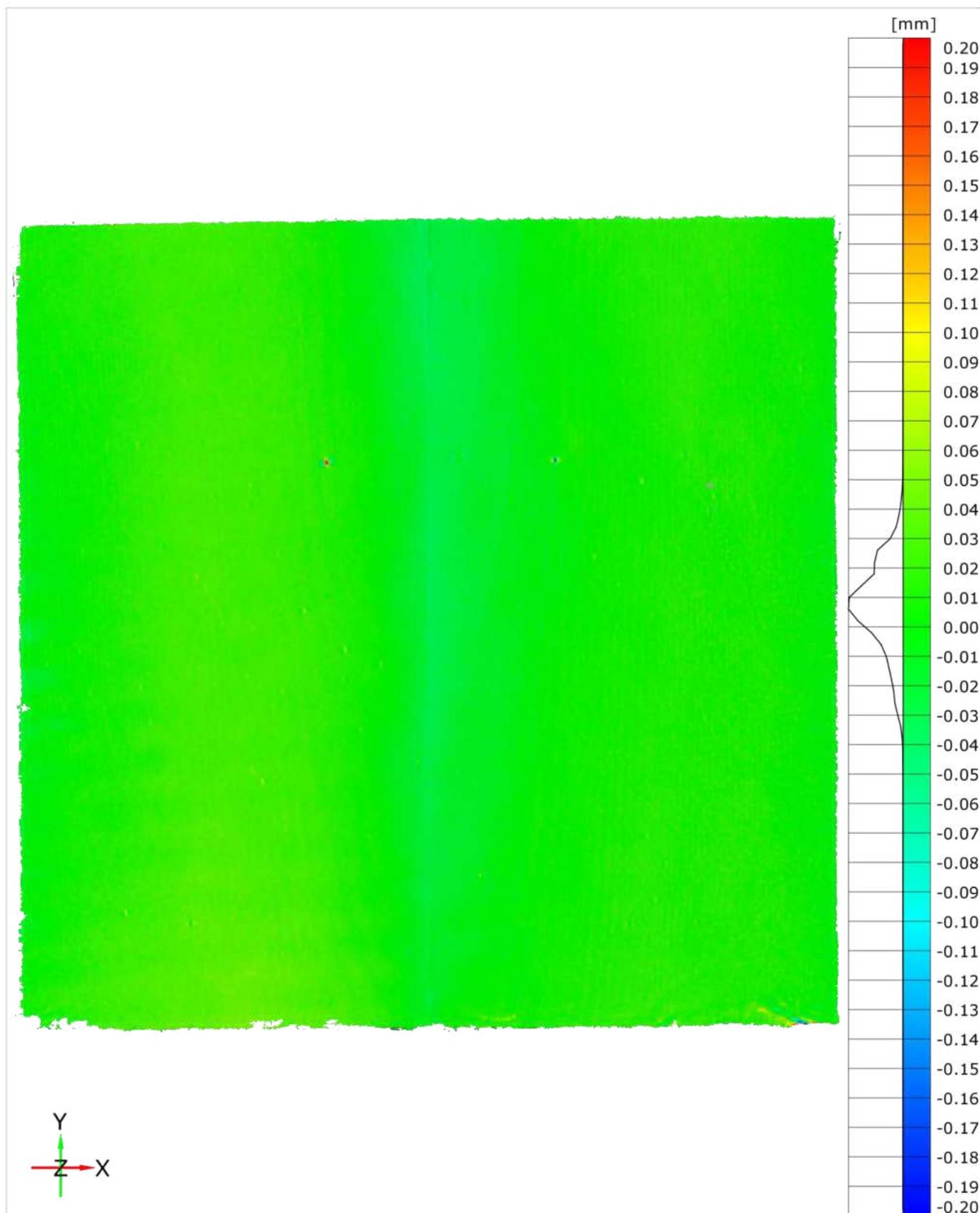
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

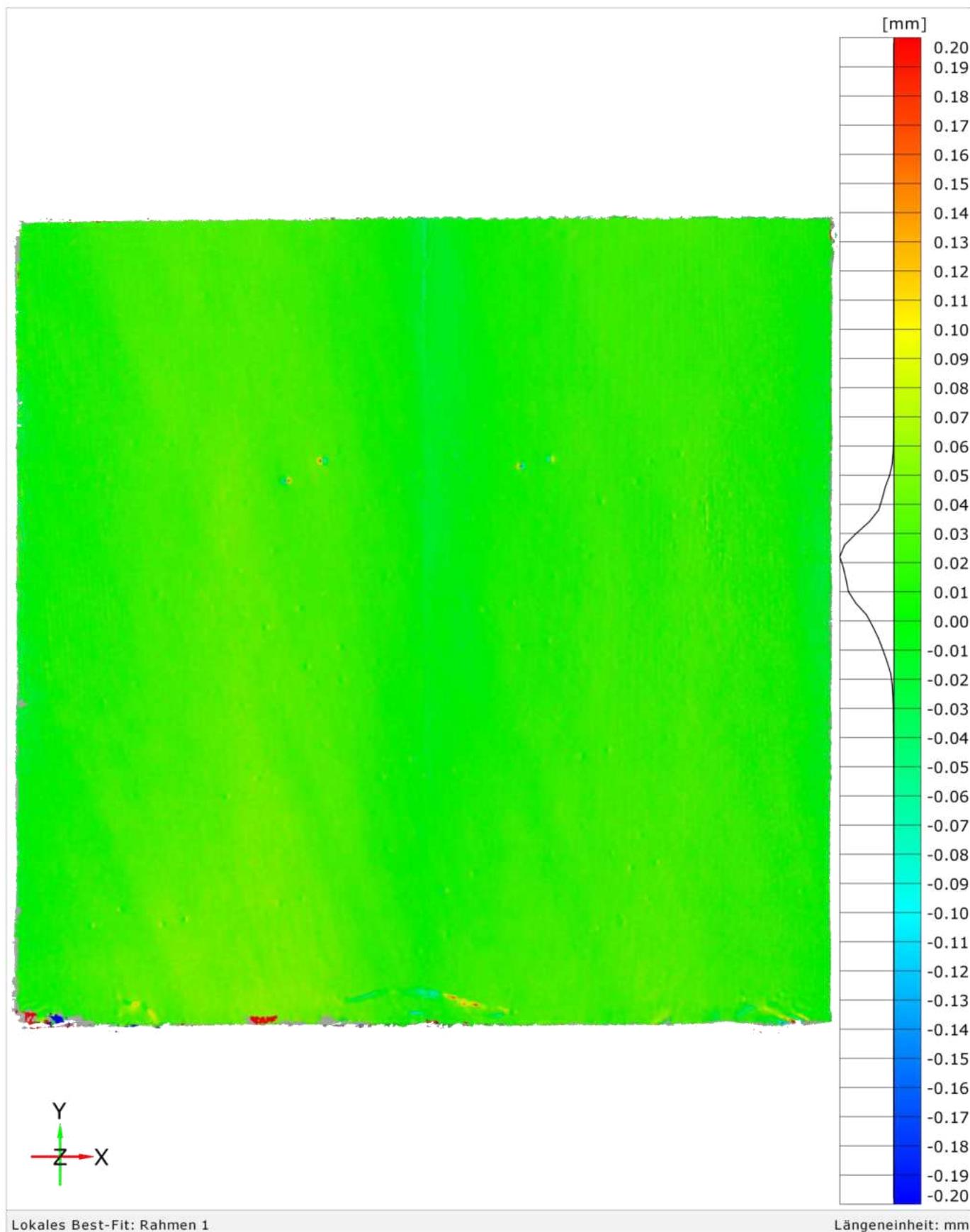
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-28, 11:00 und 2023-07-31, 14:19



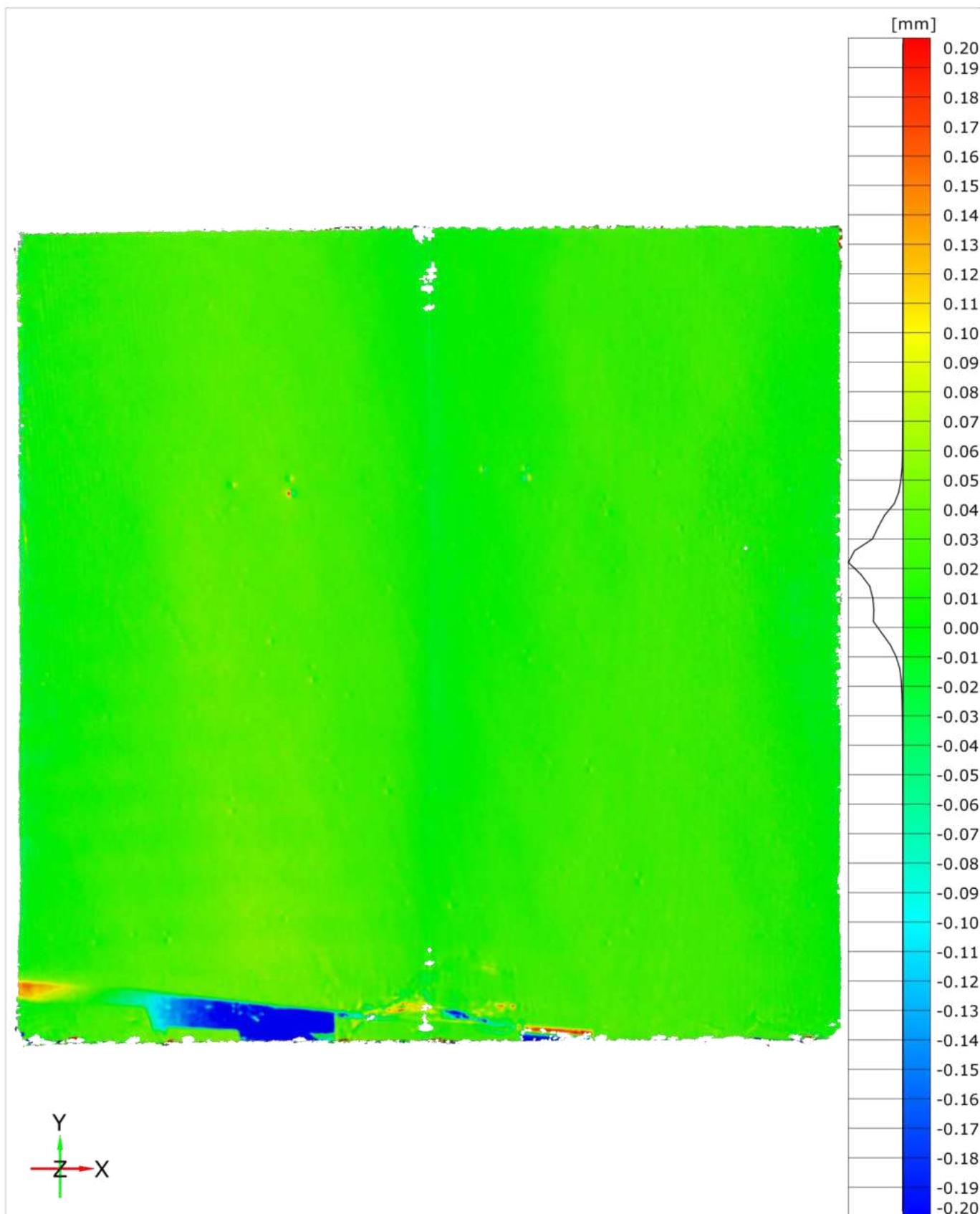
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-31, 14:19 und 2023-08-01, 11:50



Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-01, 11:50 und 2023-08-02, 11:05



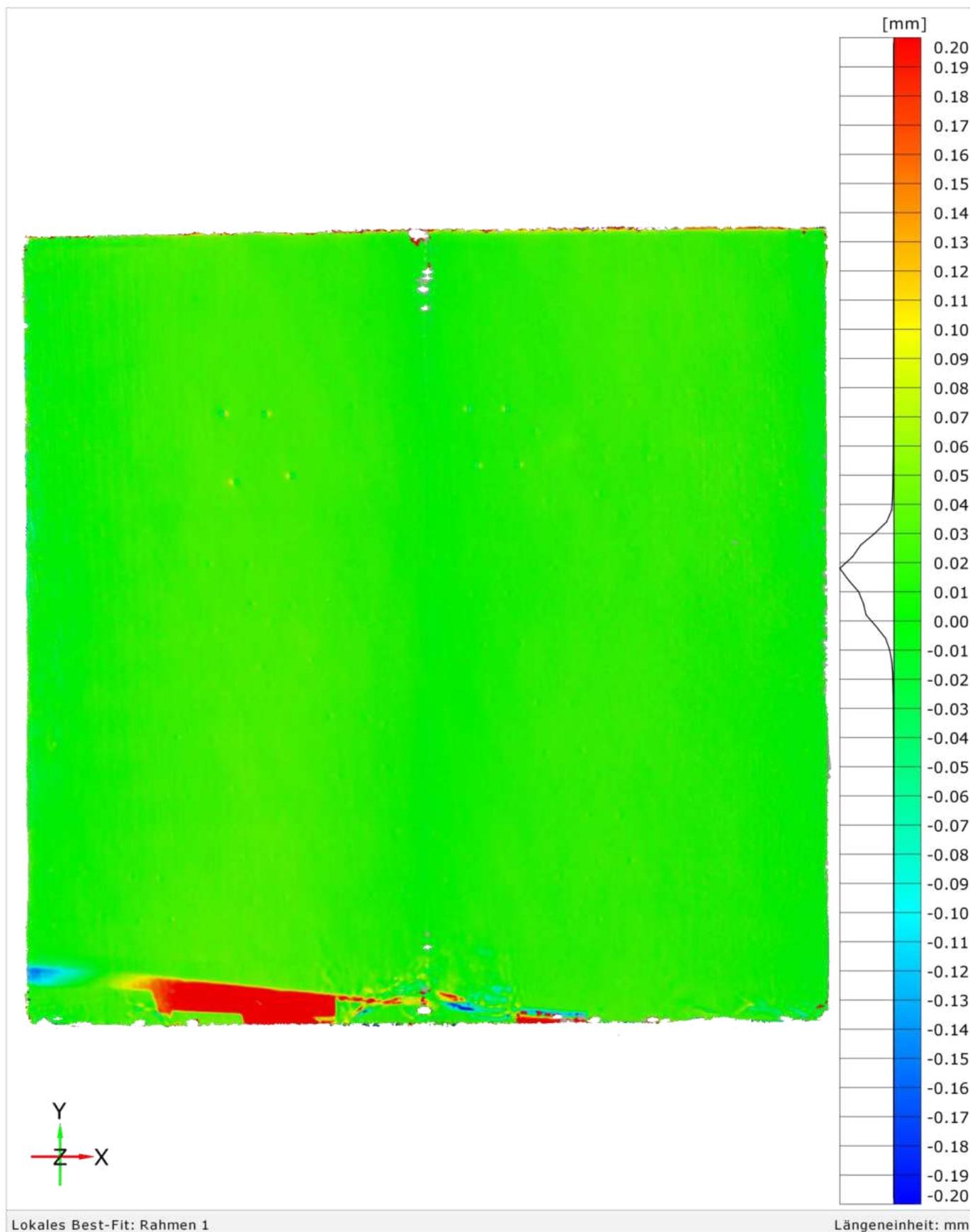
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-02, 11:05 und 2023-08-03, 12:00



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

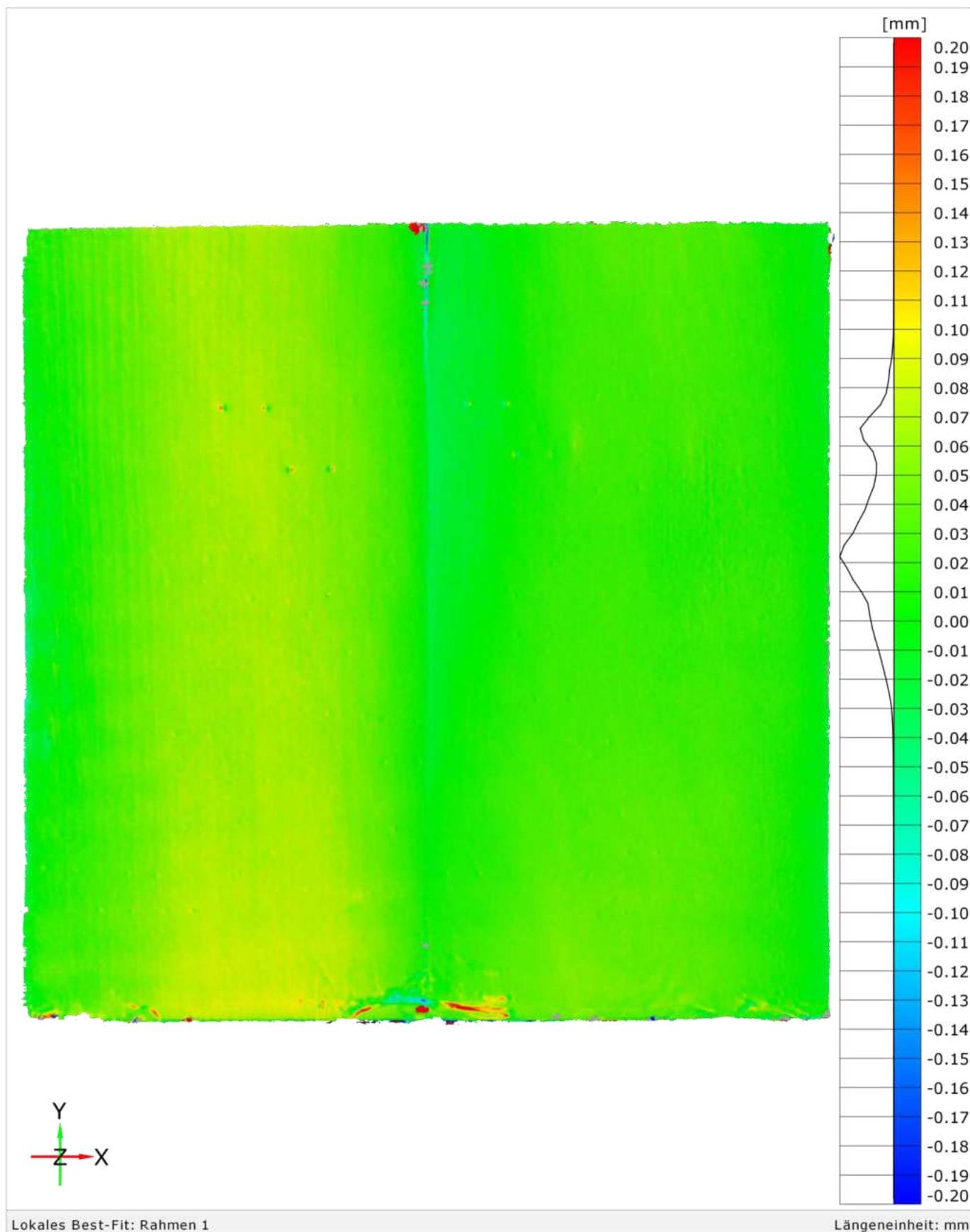
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-03, 12:00 und 2023-08-04, 09:30



Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

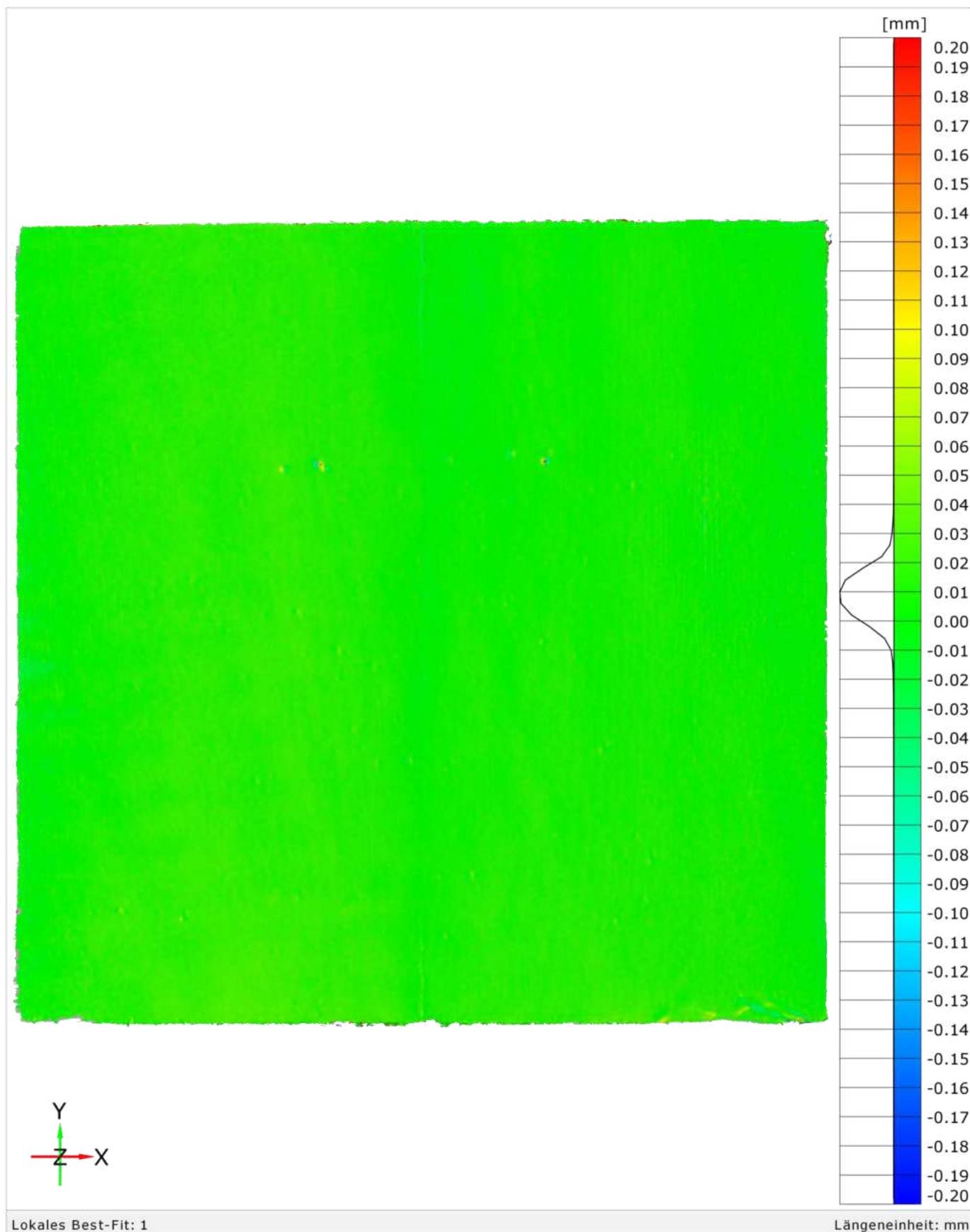
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-04, 09:30 und 2023-08-07, 11:50



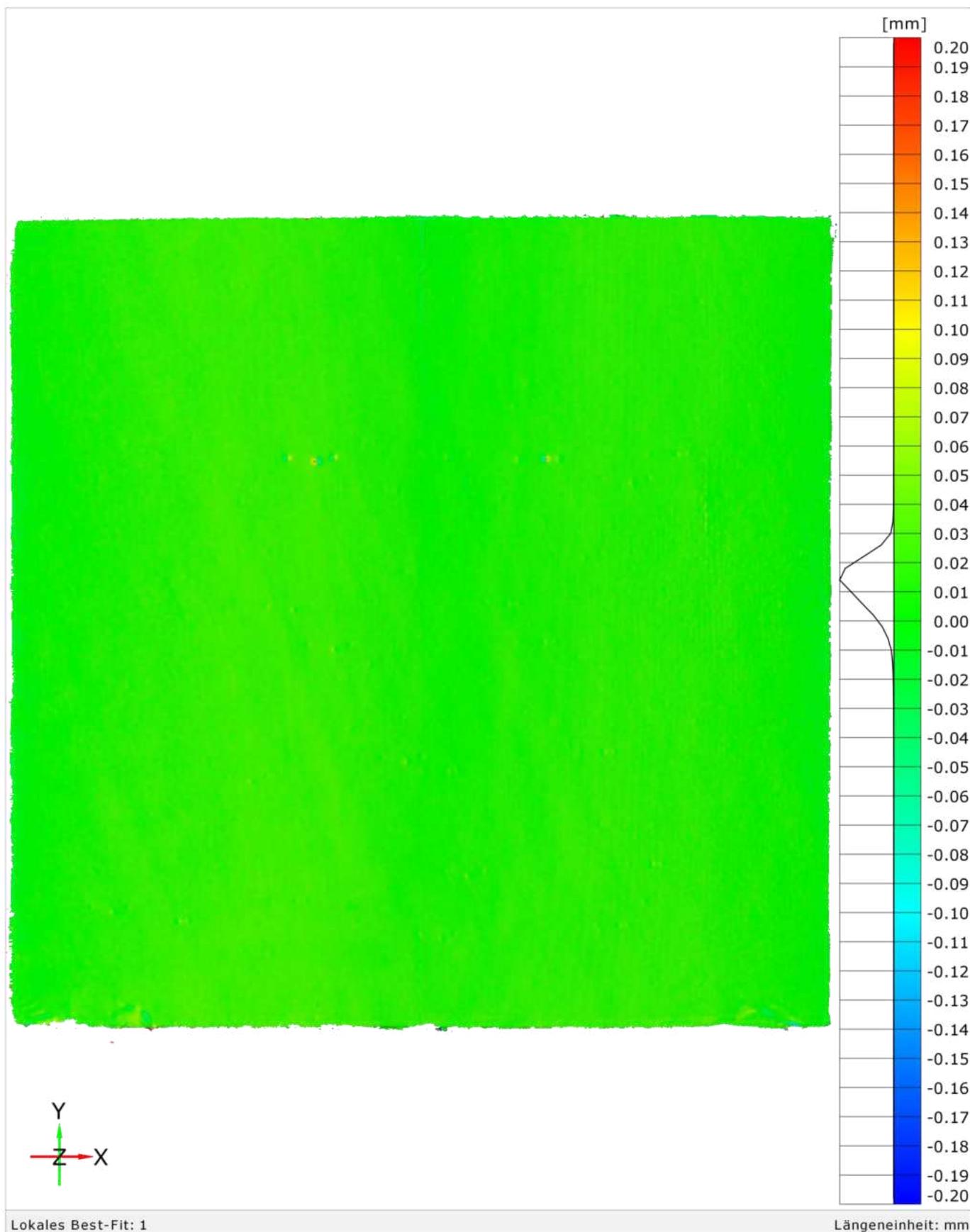
Lokales Best-Fit: Rahmen 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-07, 11:50 und 2023-08-08, 10:30



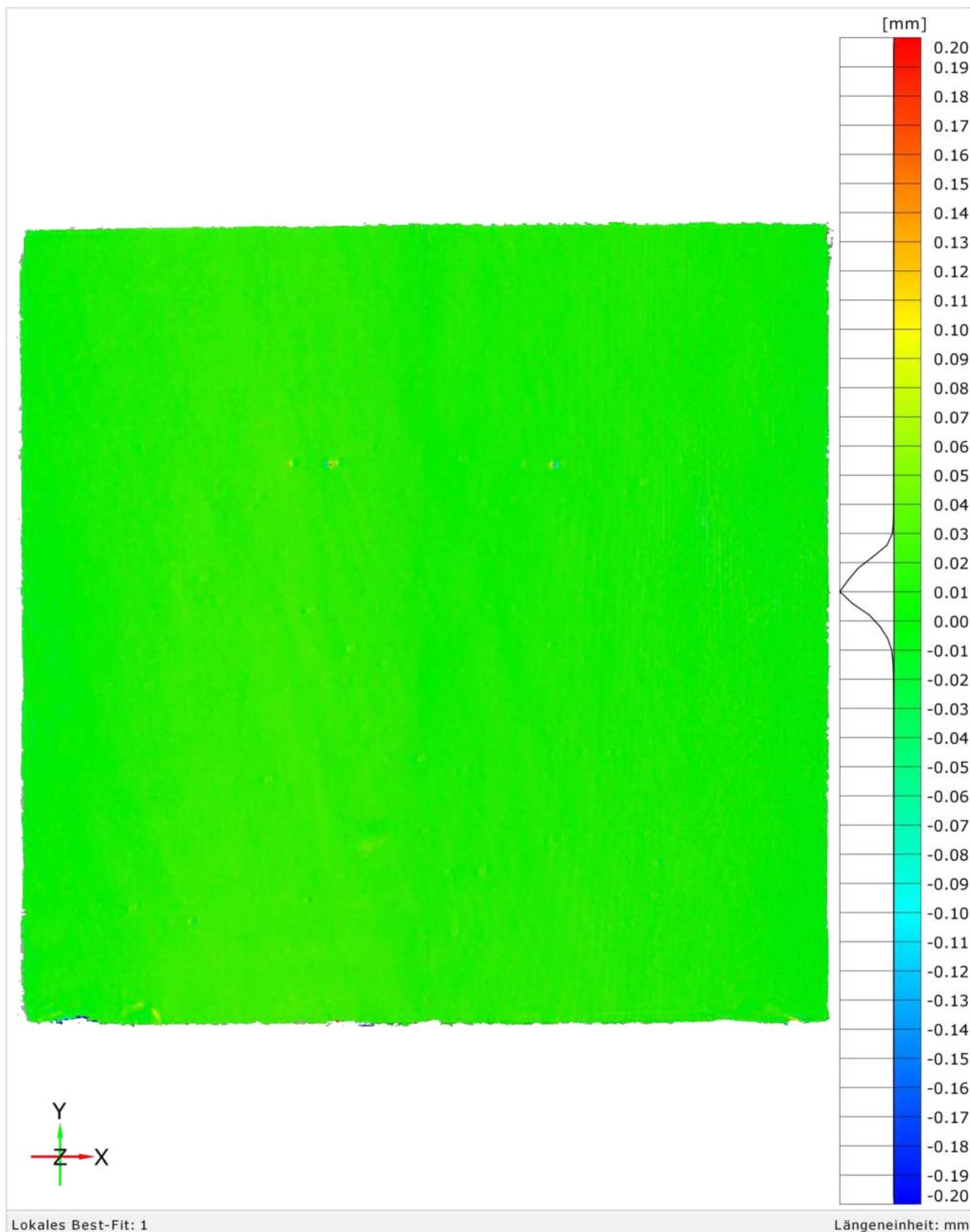
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-08, 10:30 und 2023-08-09, 12:00



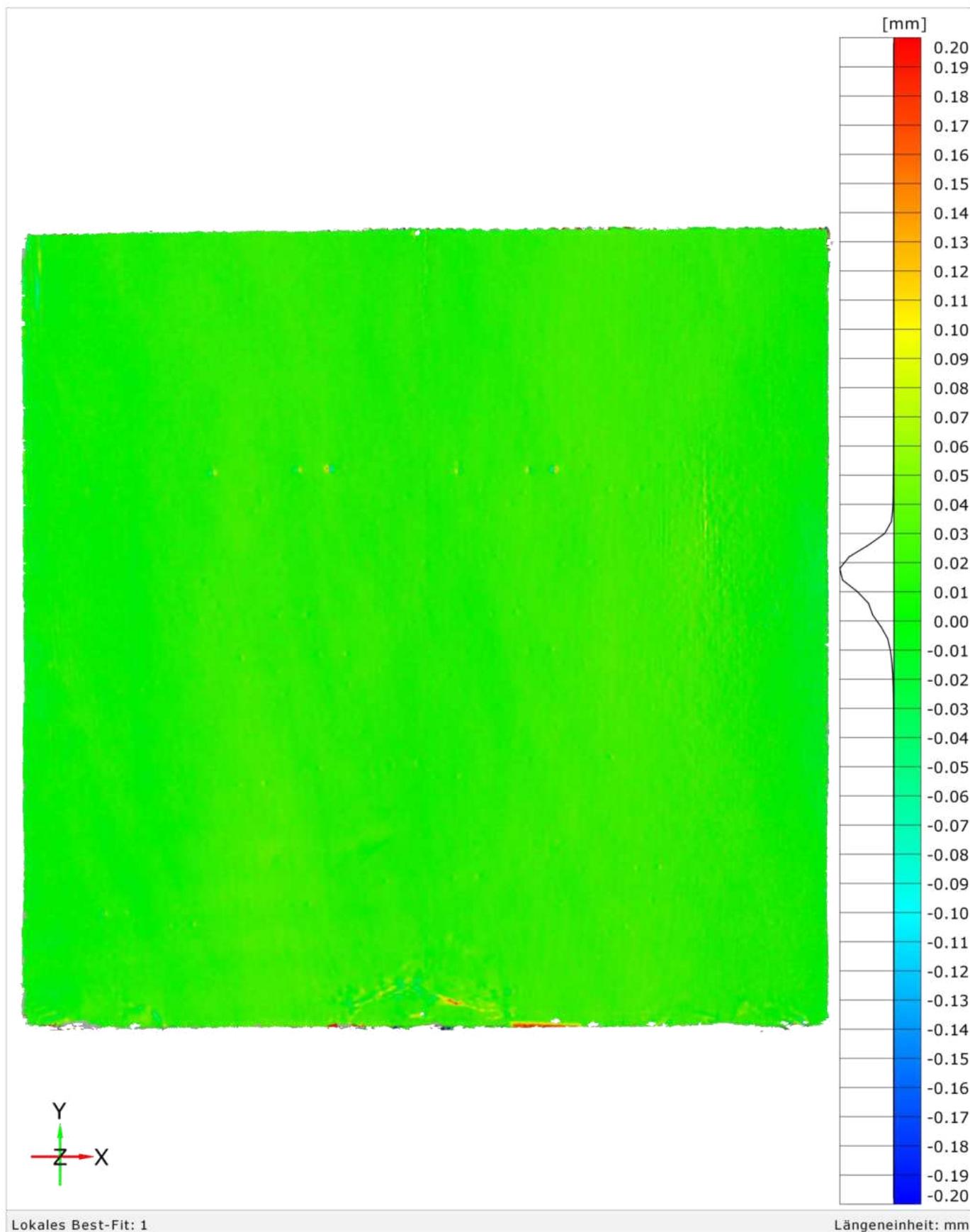
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

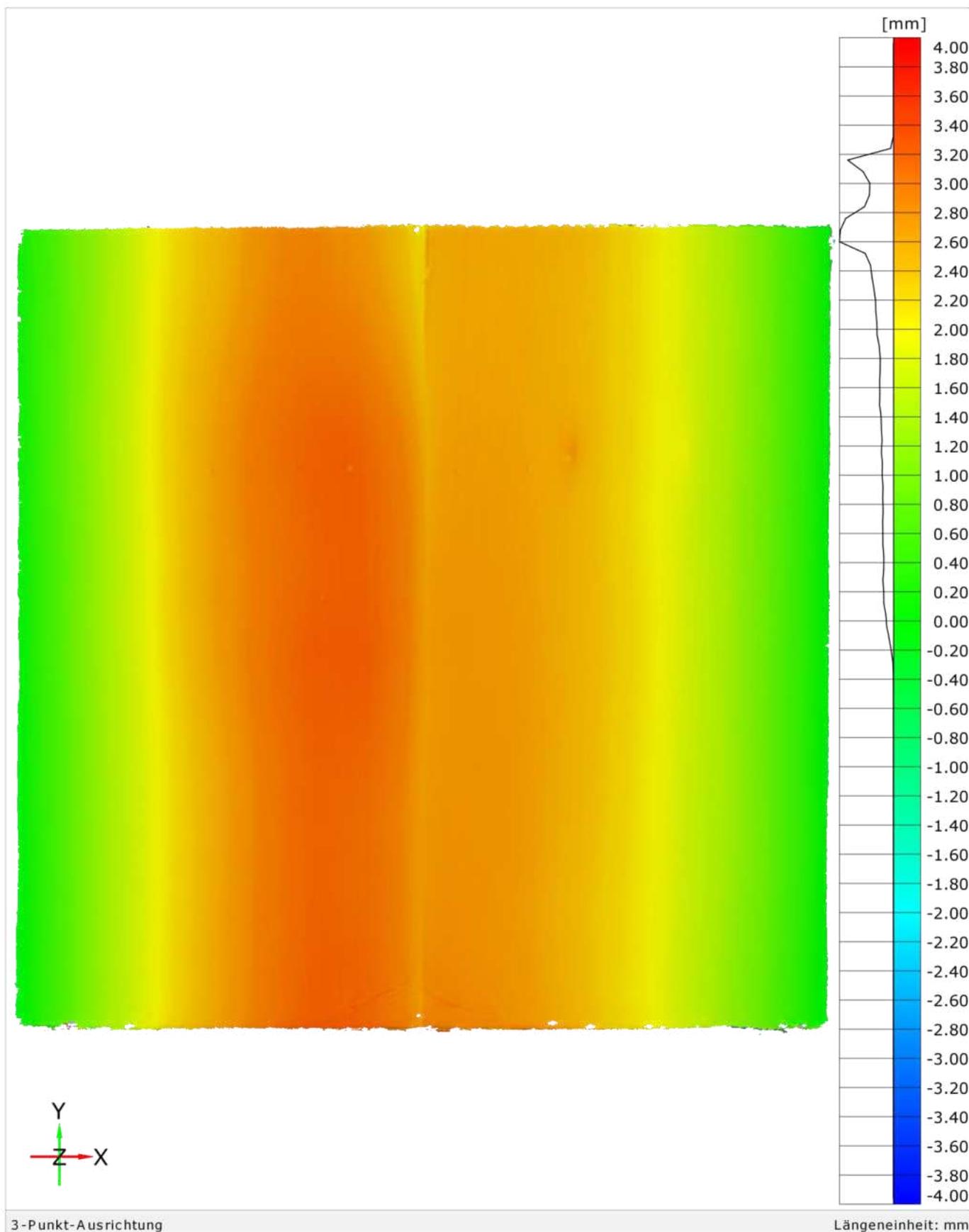
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-09, 12:00 und 2023-08-10, 11:09



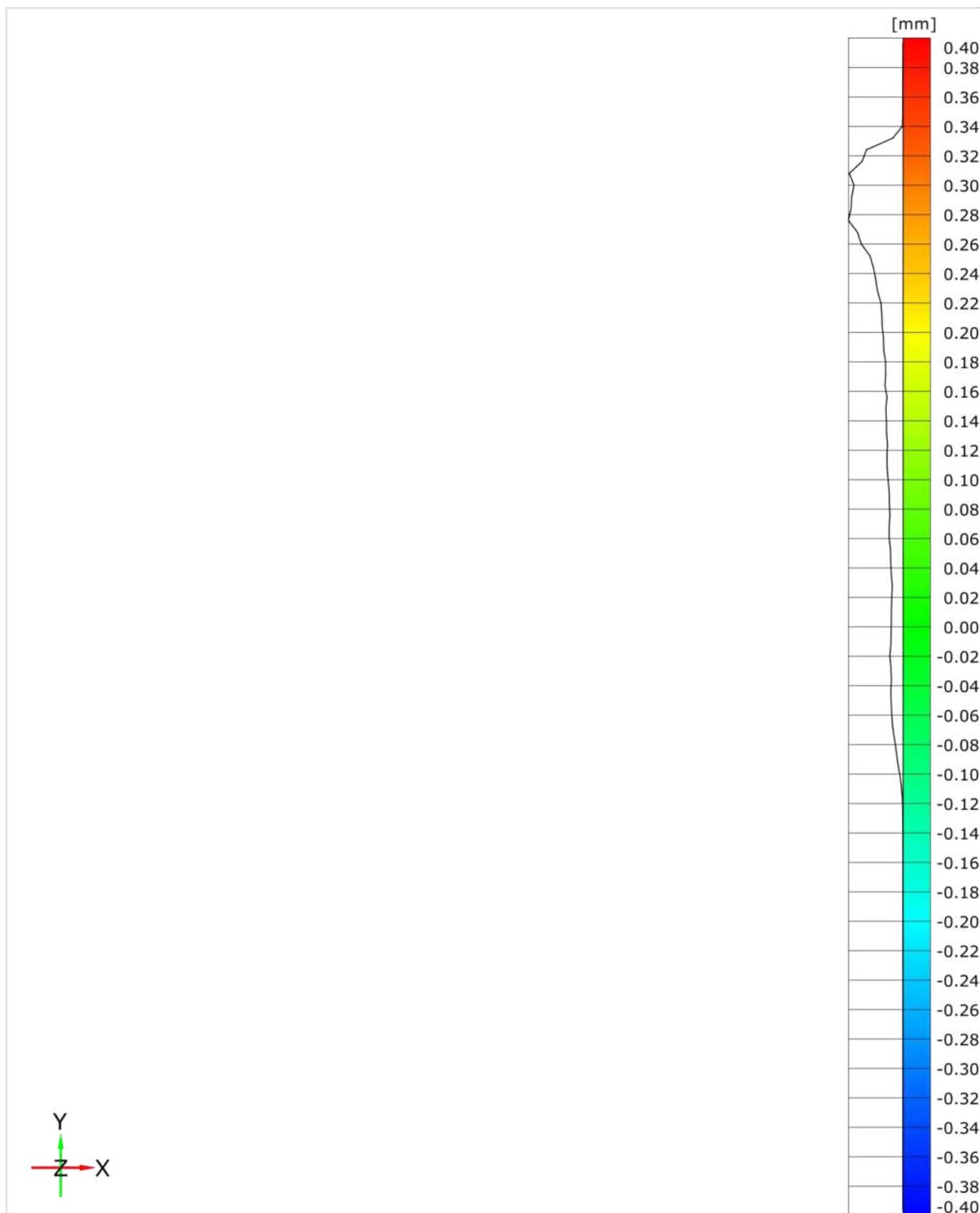
Klimakammertest | S-M-2 | 2023-08-10, 11:09 und 2023-08-11, 09:30



Klimakammertest | S-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-08-11, 09:30



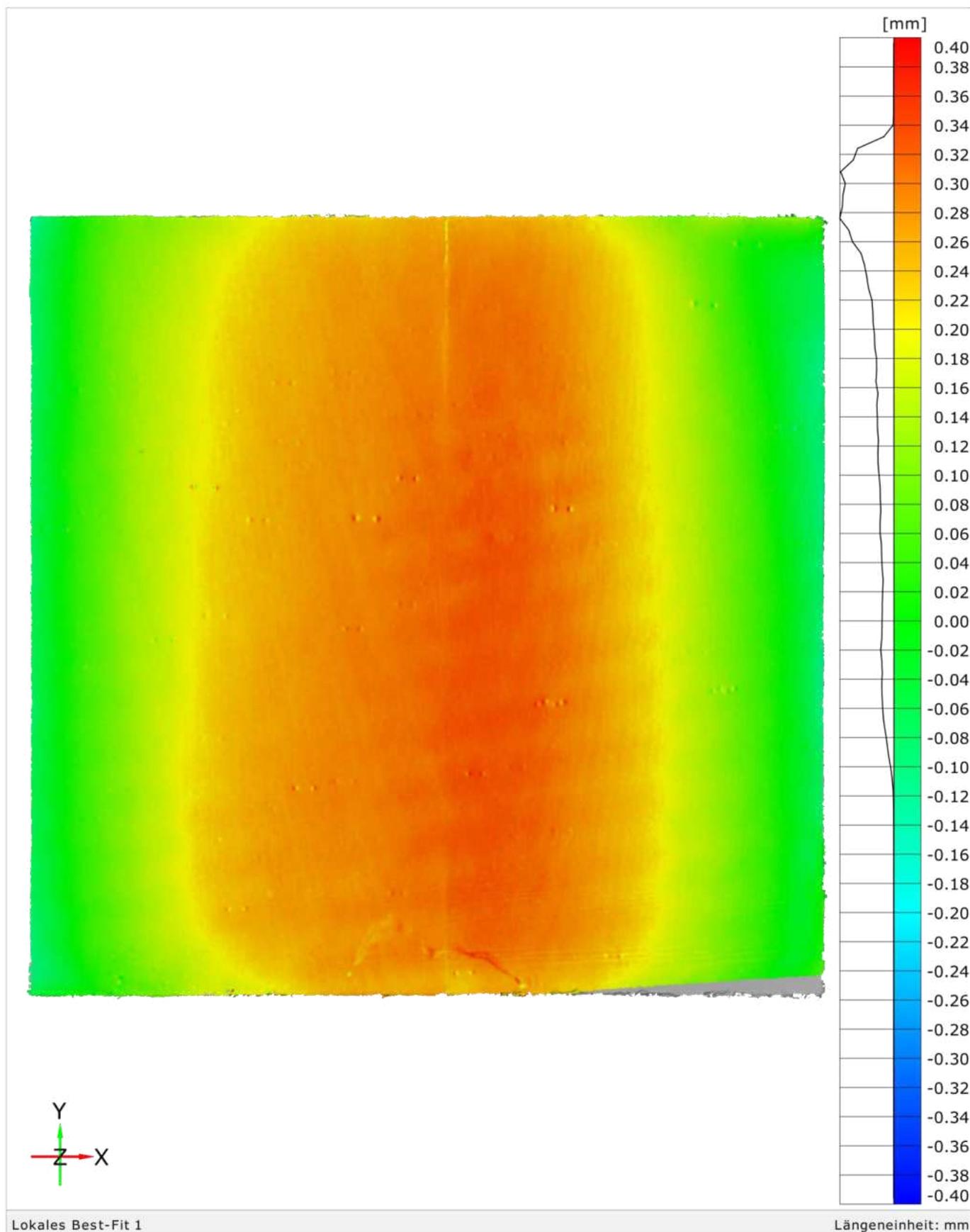
Klimakammertest | V-M-2 |



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

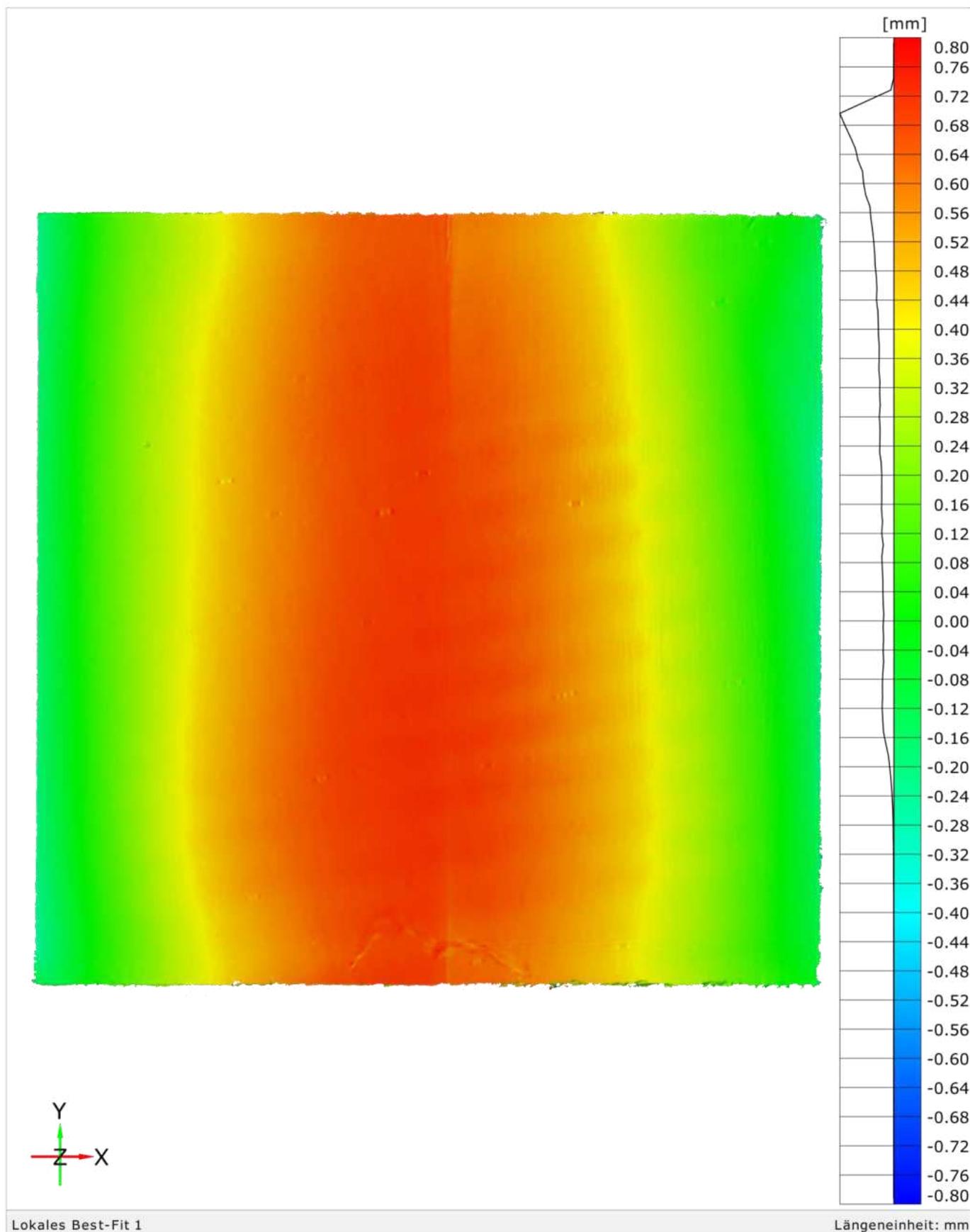
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-07-24, 16:20



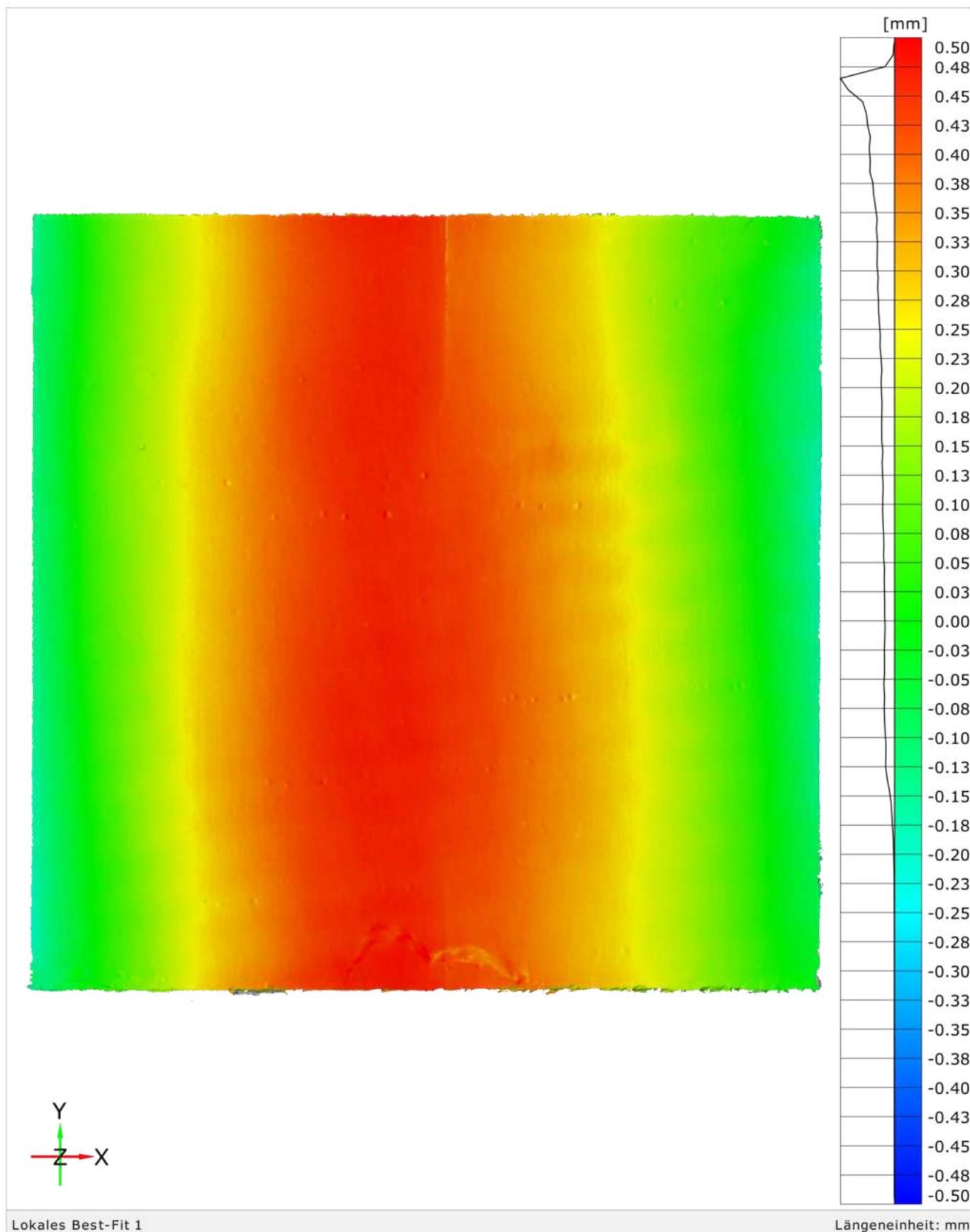
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

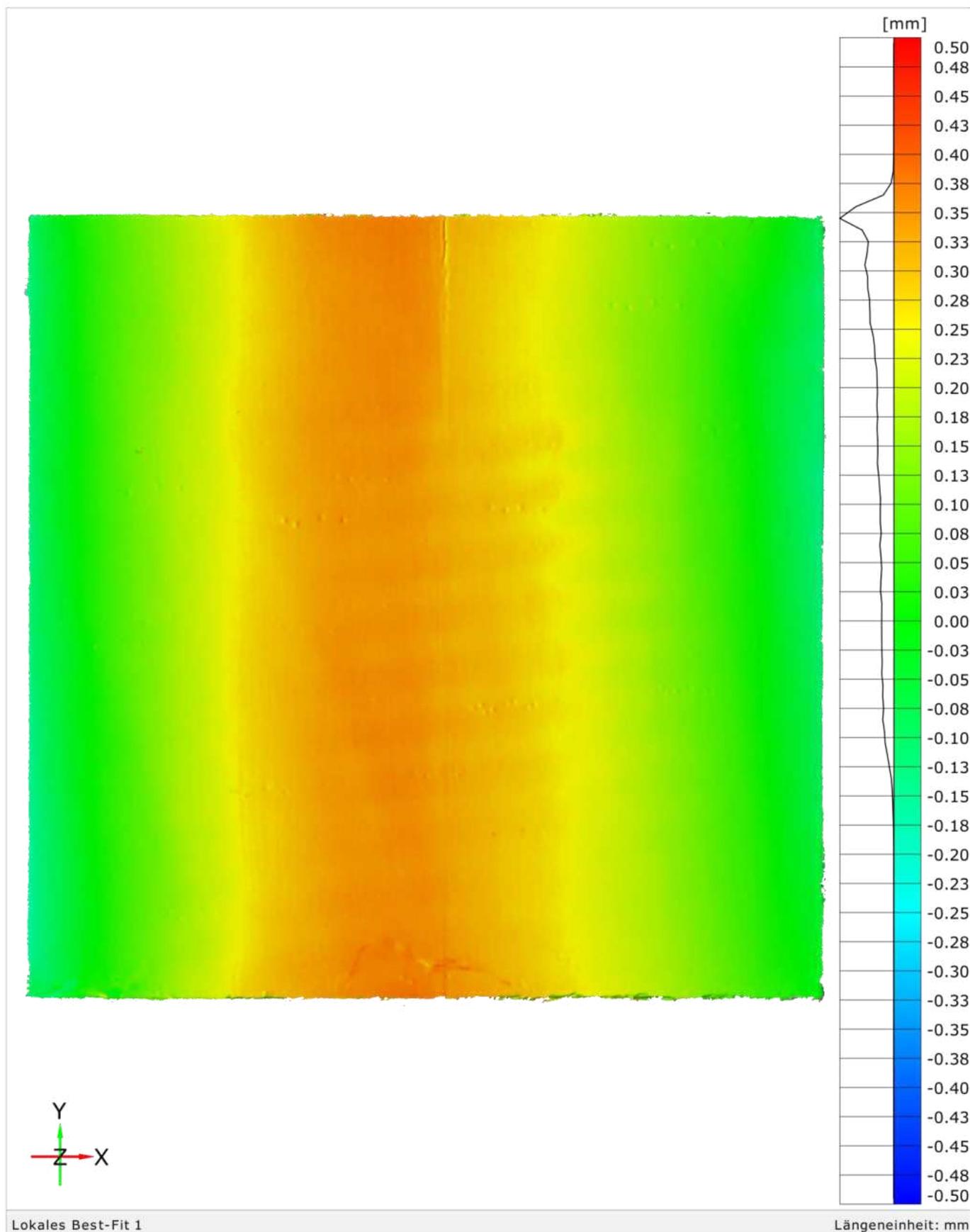
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-24, 16:20 und 2023-07-25, 11:45



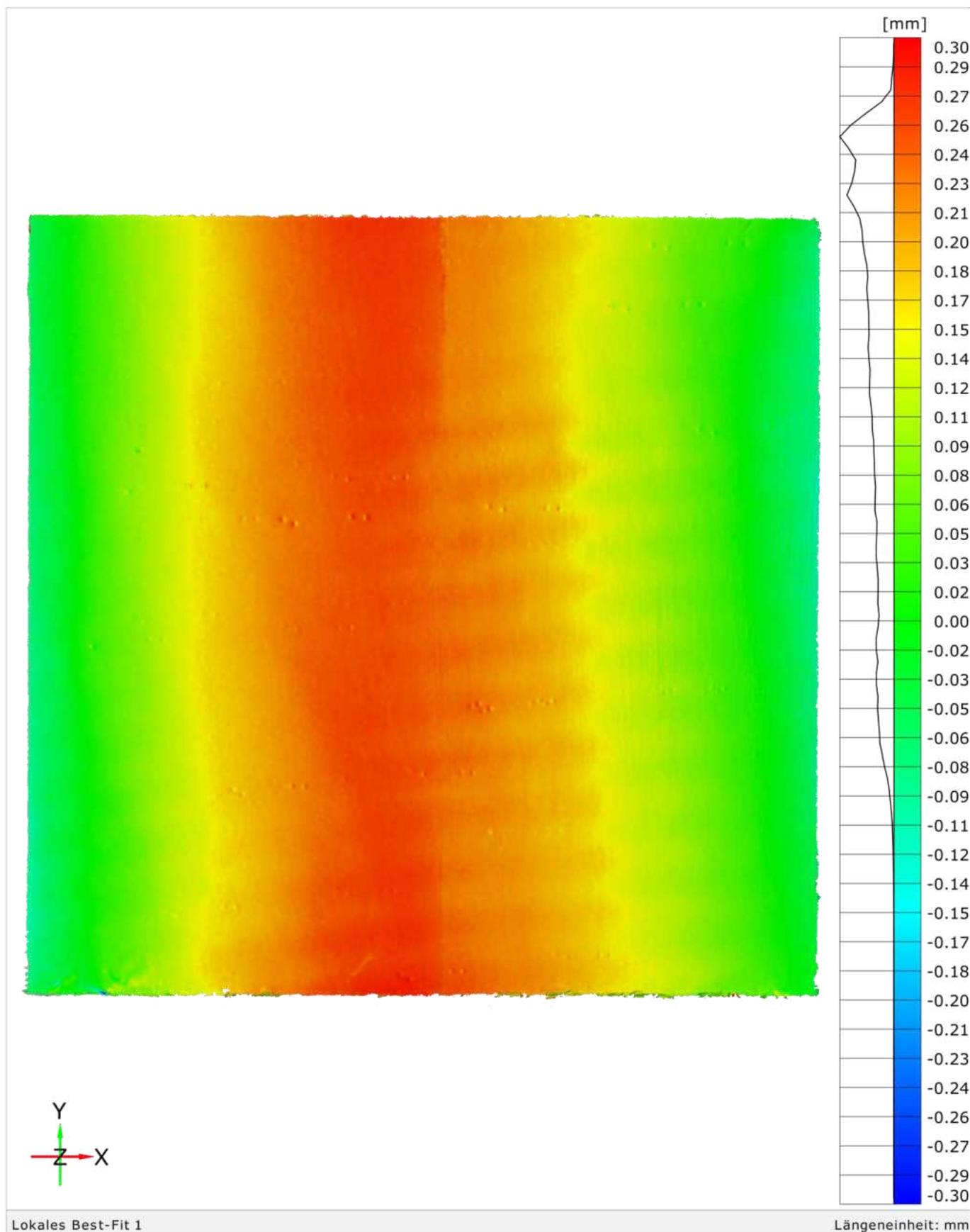
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-25, 11:45 und 2023-07-26, 11:40



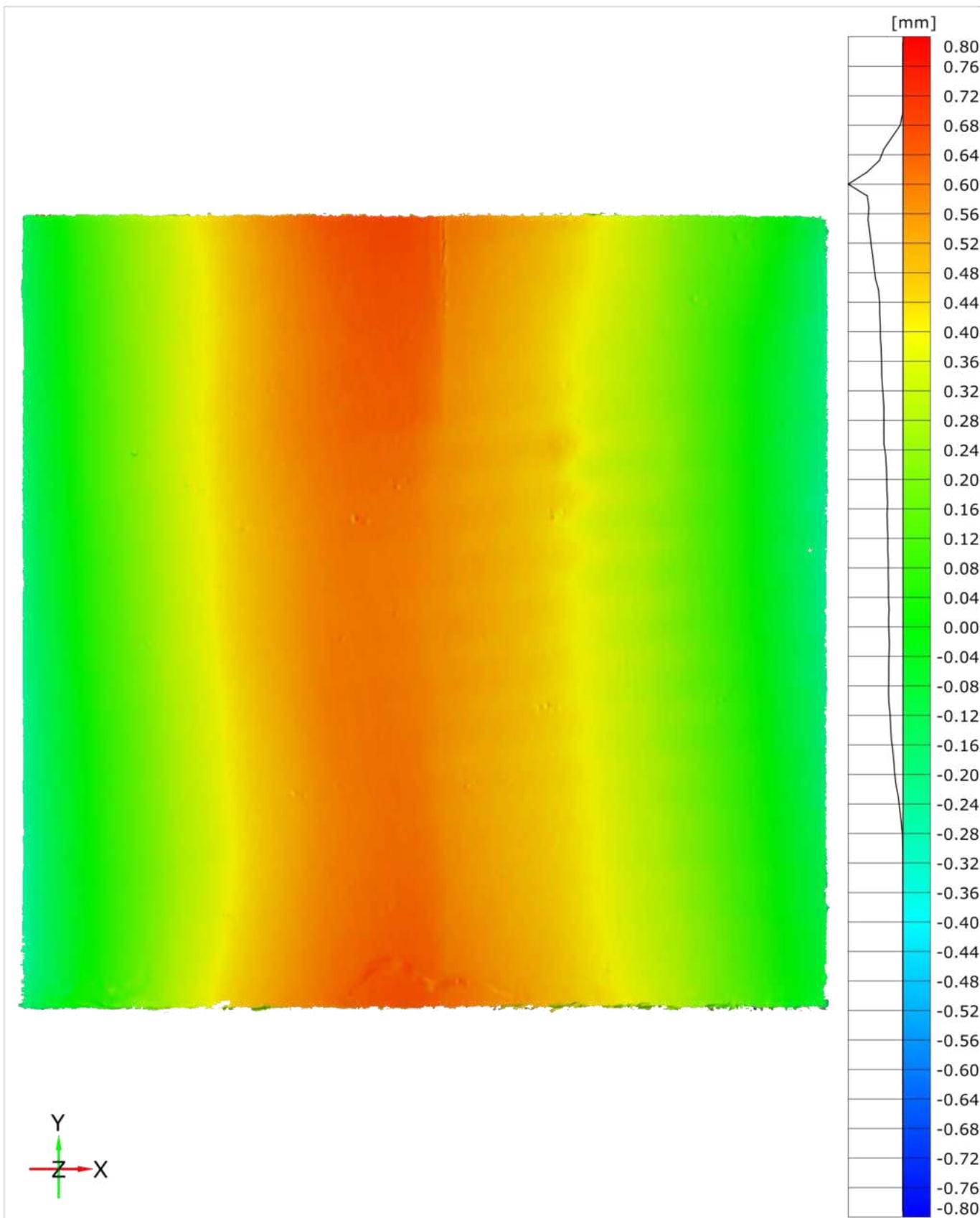
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-26, 11:40 und 2023-07-27, 12:35



Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-27, 12:35 und 2023-07-28, 11:00



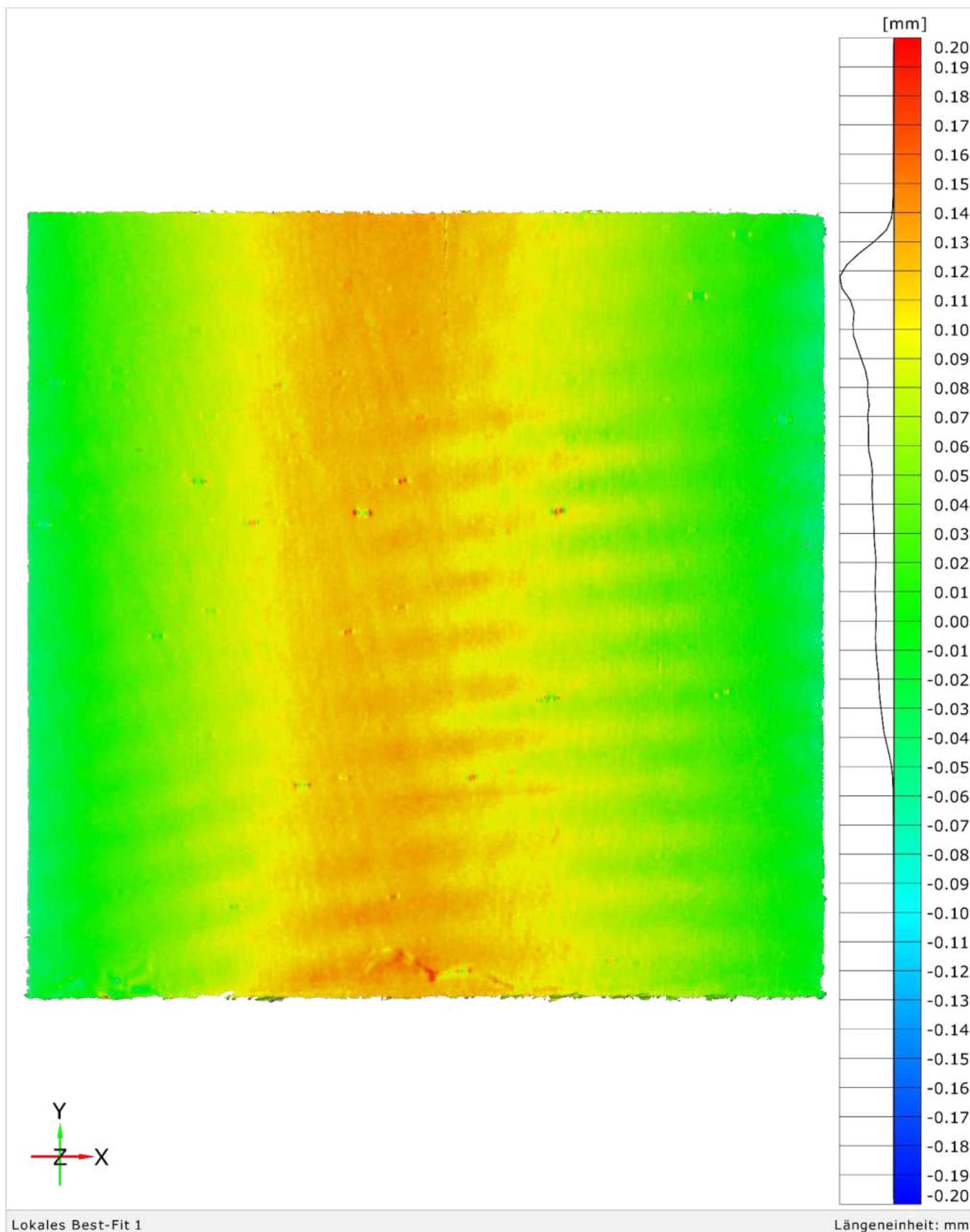
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-28, 11:00 und 2023-07-31, 14:19



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

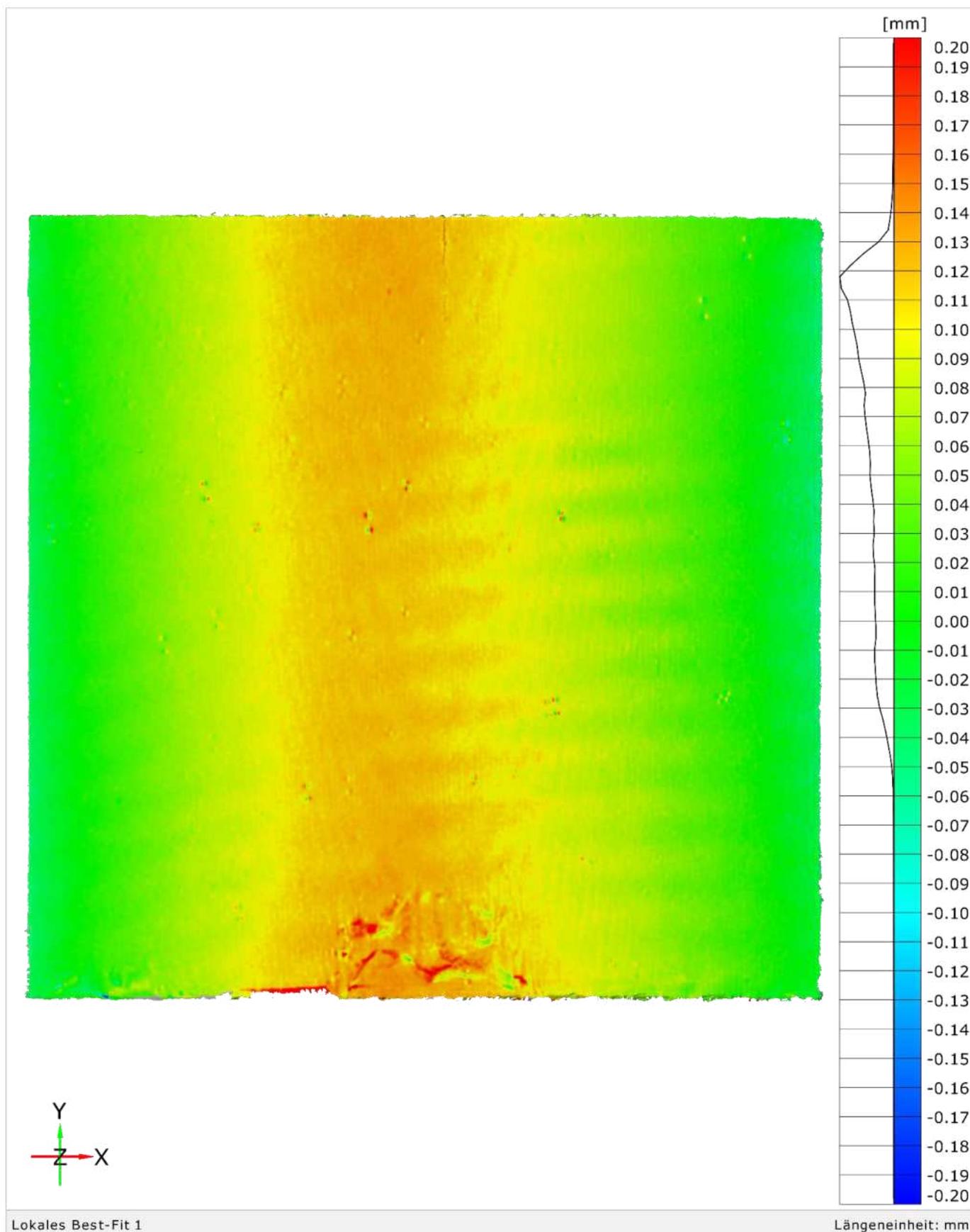
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-31, 14:19 und 2023-08-01, 11:50



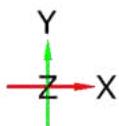
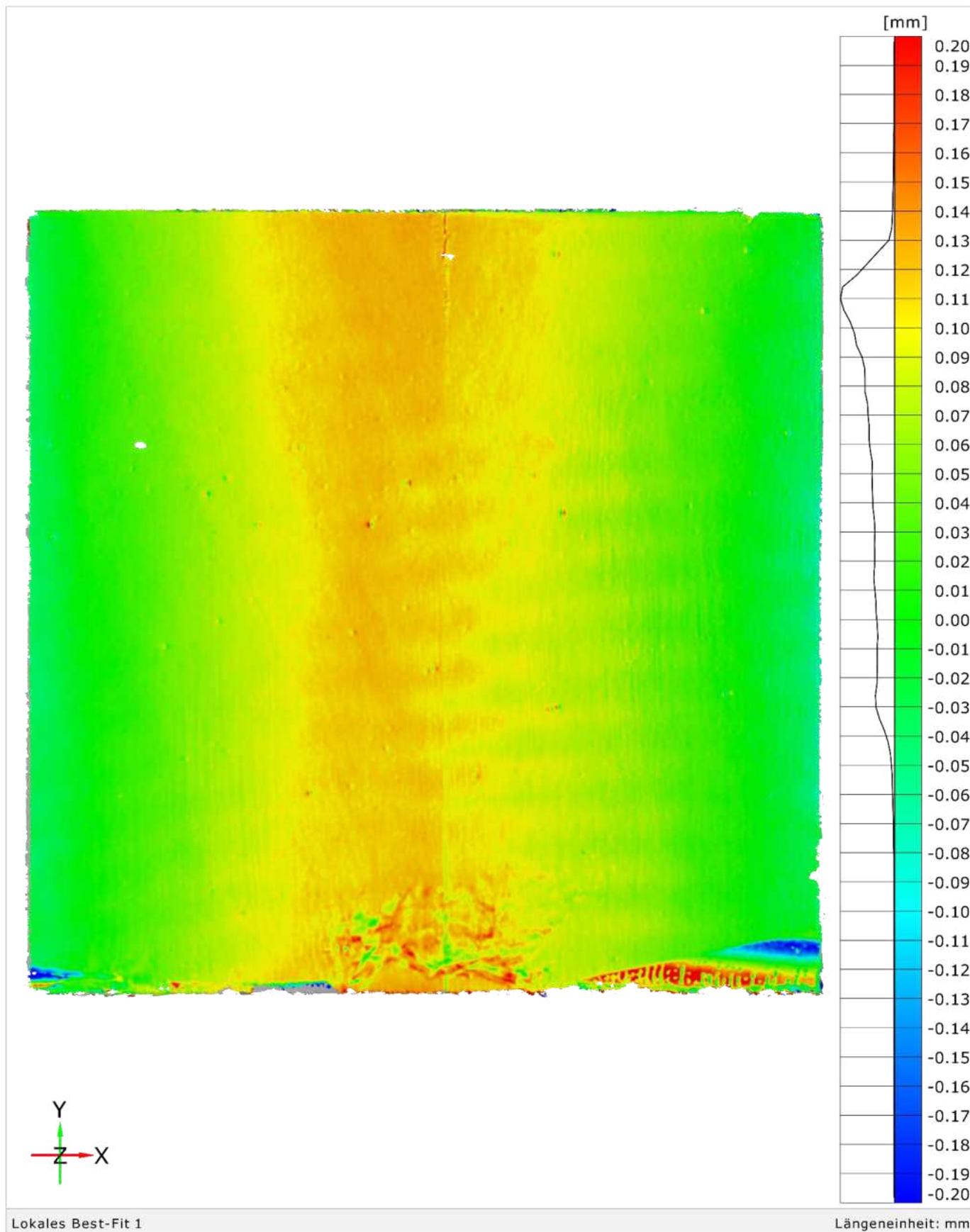
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-01, 11:50 und 2023-08-02, 10:32



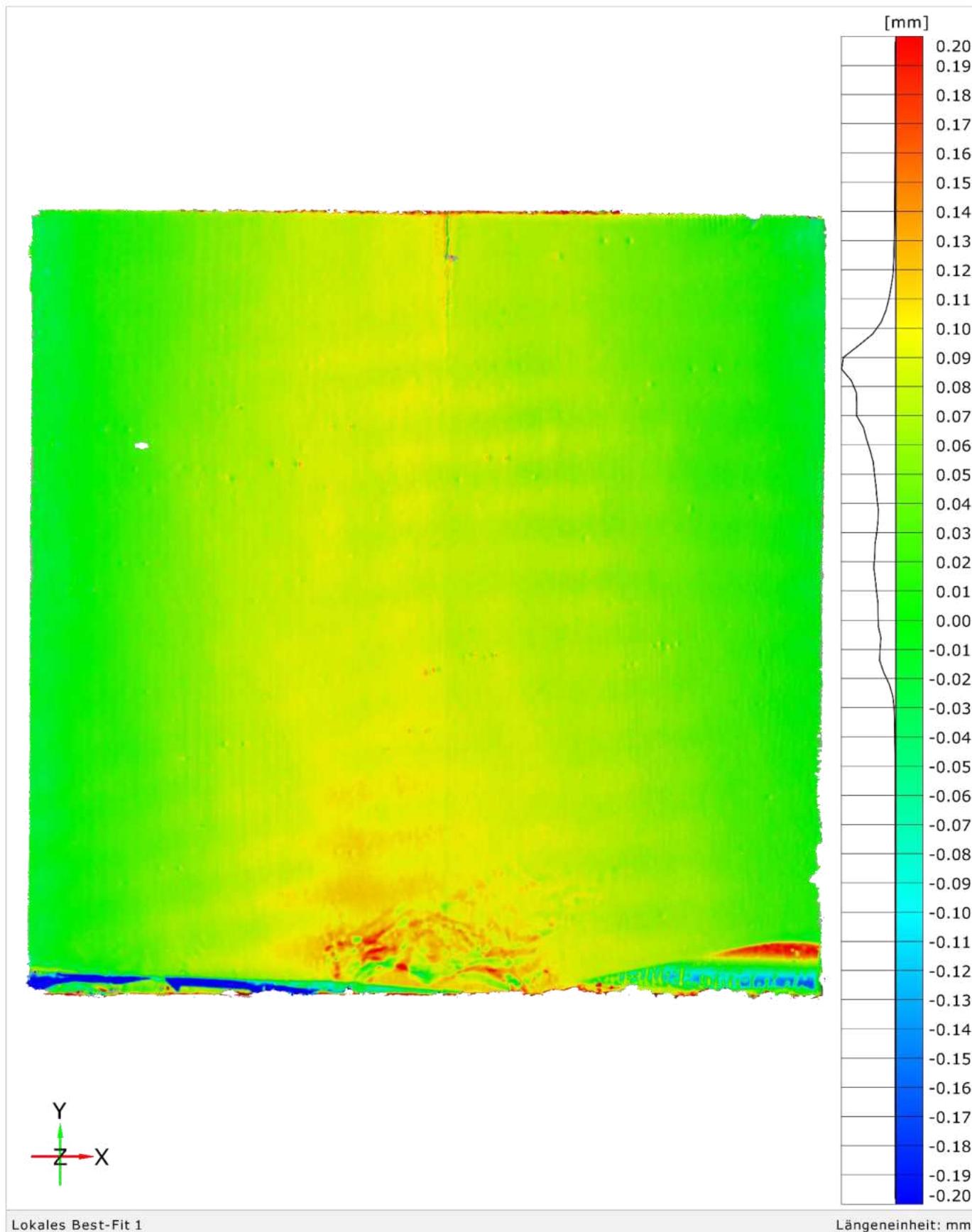
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-02, 10:32 und 2023-08-03, 12:00



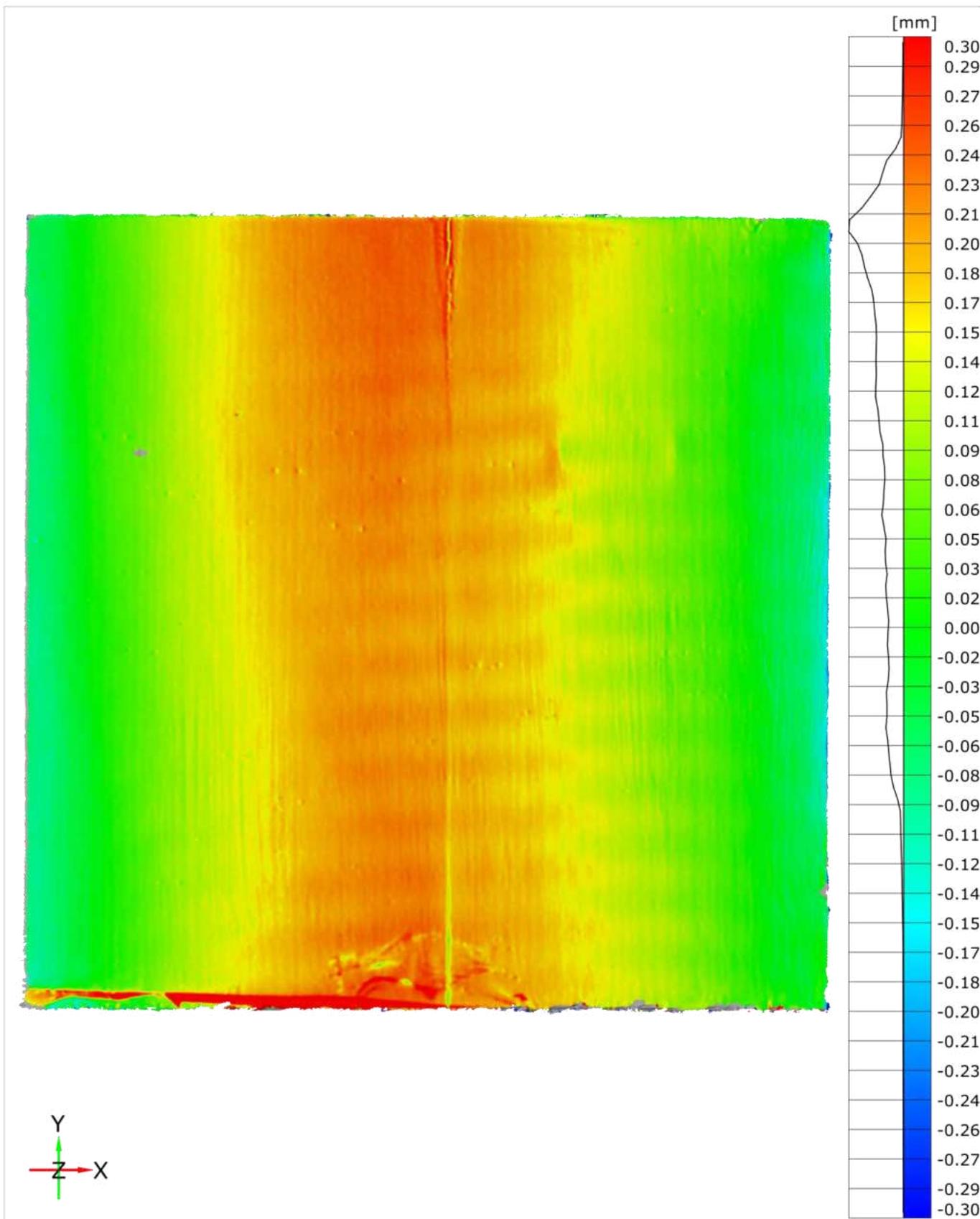
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

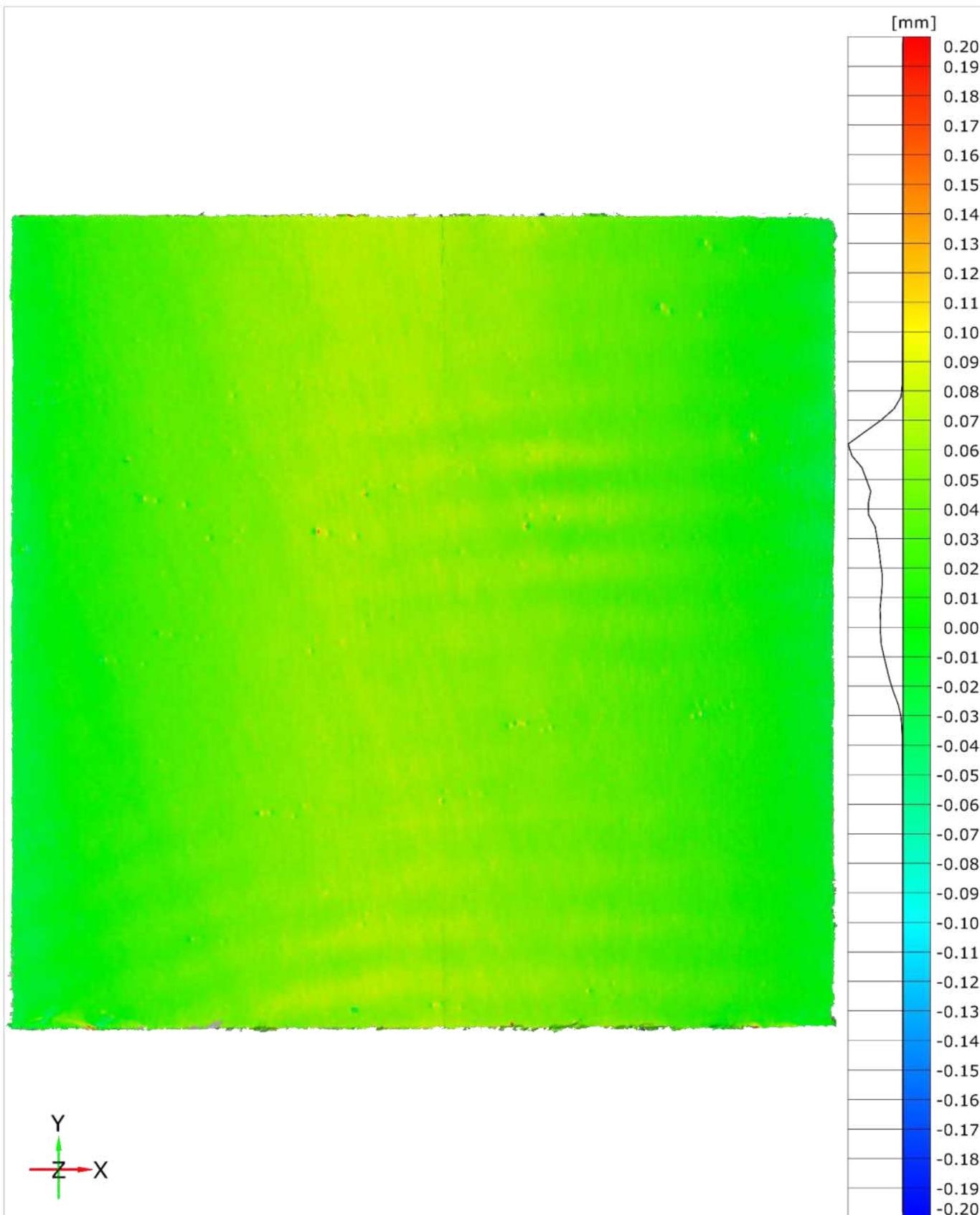
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-03, 12:00 und 2023-08-04, 09:30



Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-04, 09:30 und 2023-08-07, 11:50



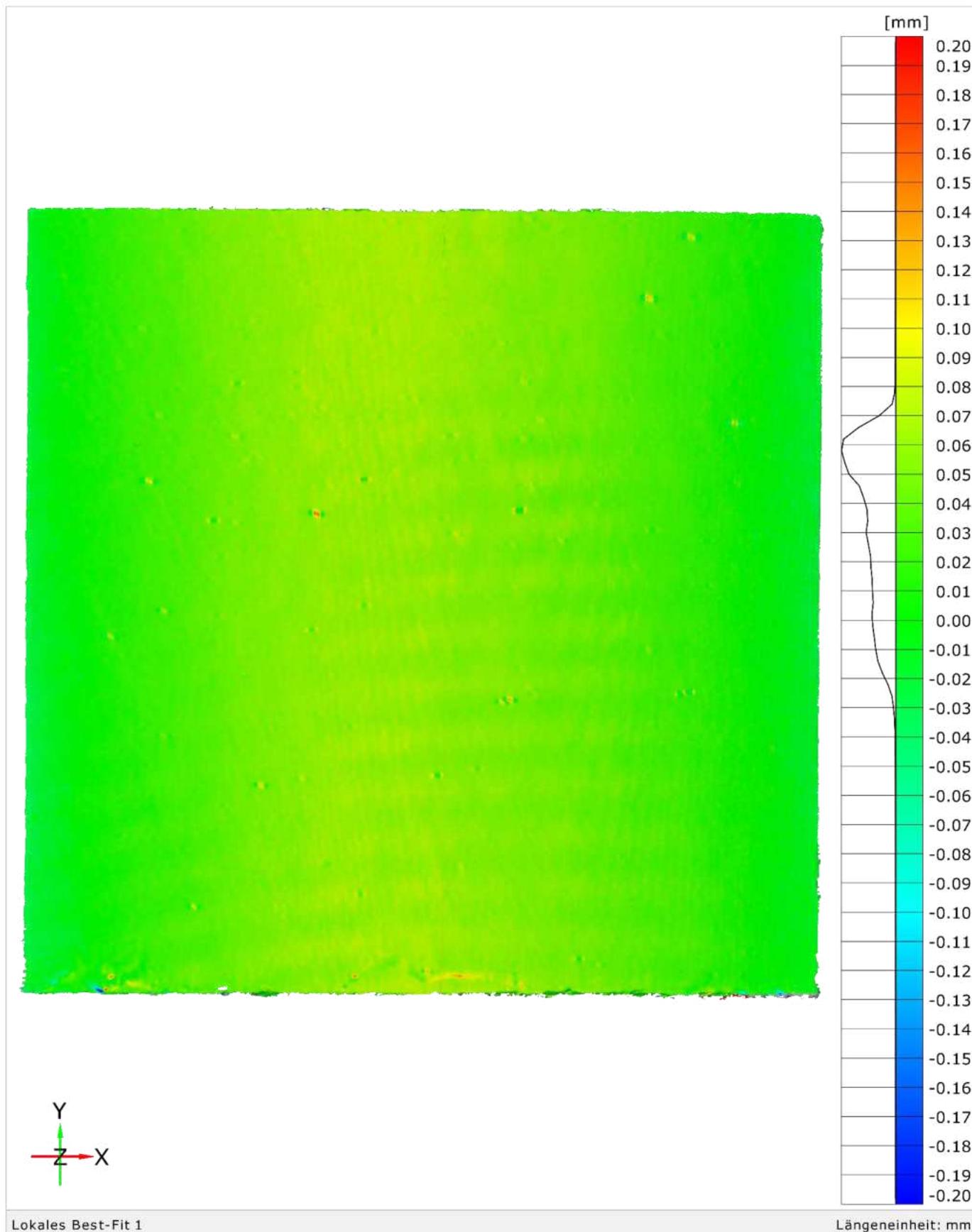
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-07, 11:50 und 2023-08-08, 10:30



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

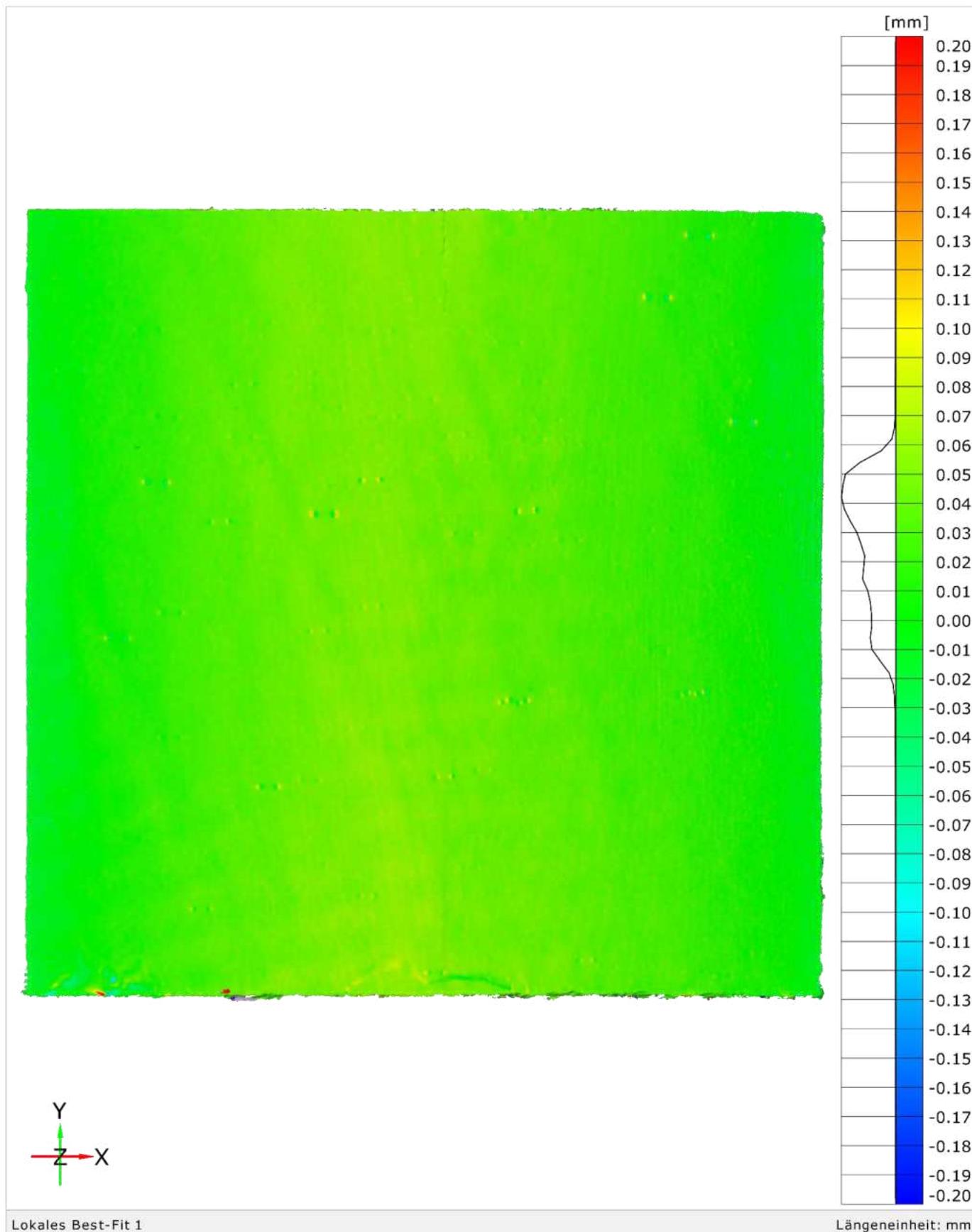
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-08, 10:30 und 2023-08-09, 12:00



Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

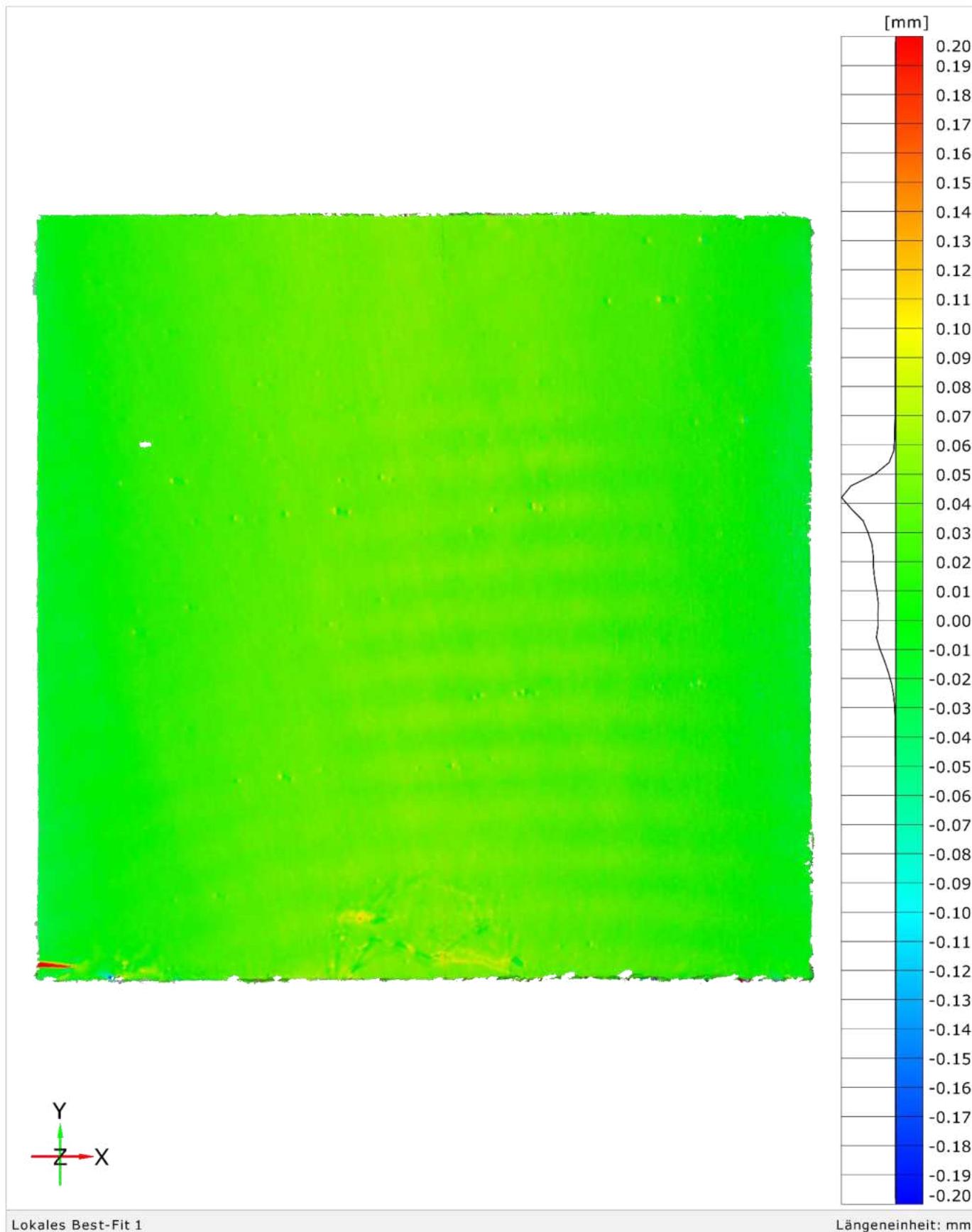
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-09, 12:00 und 2023-08-10, 11:09



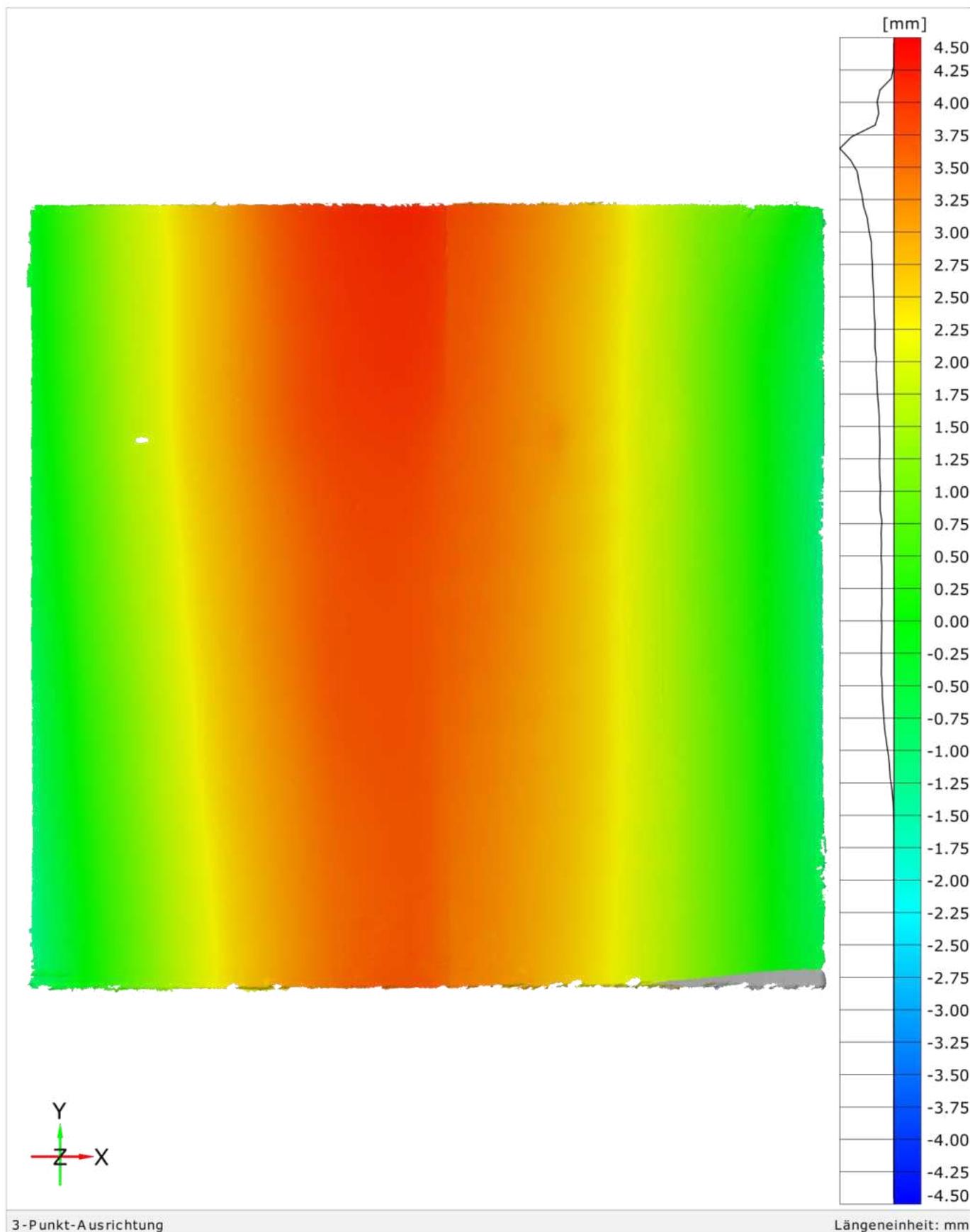
Lokales Best-Fit 1

Längeneinheit: mm

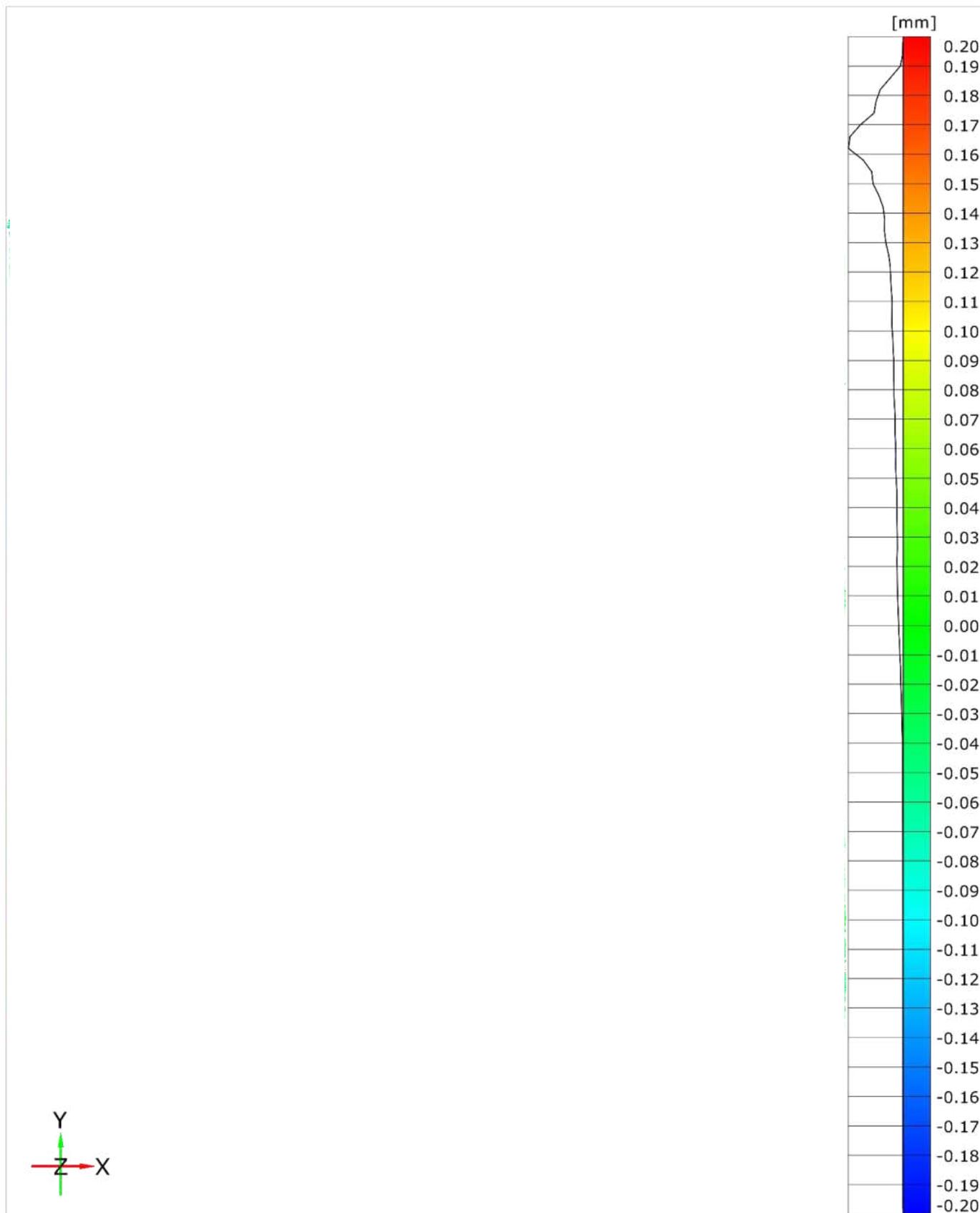
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-08-10, 11:09 und 2023-08-11, 09:30



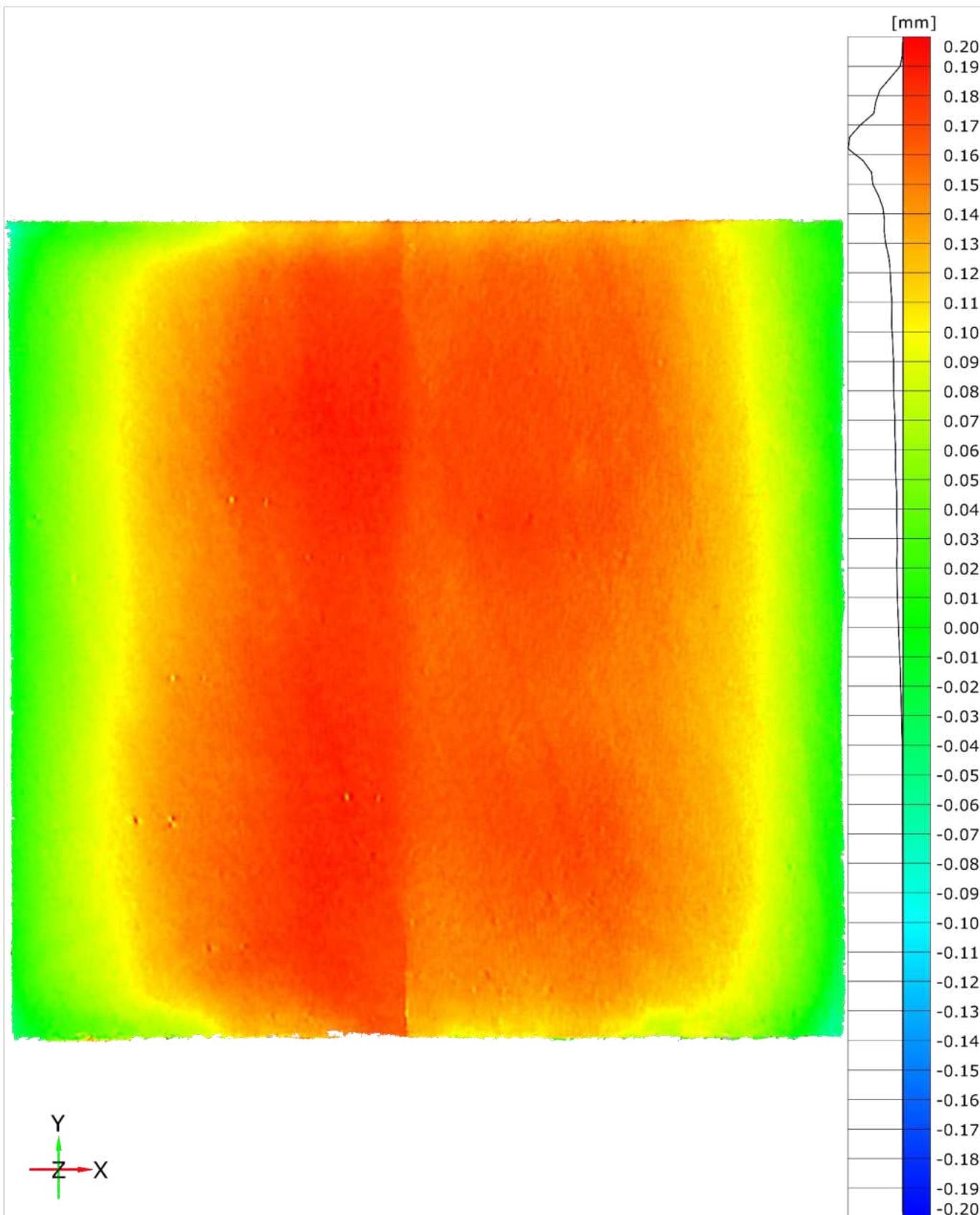
Klimakammertest | V-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-08-11, 09:30



Klimakammertest | VG-M-2 |



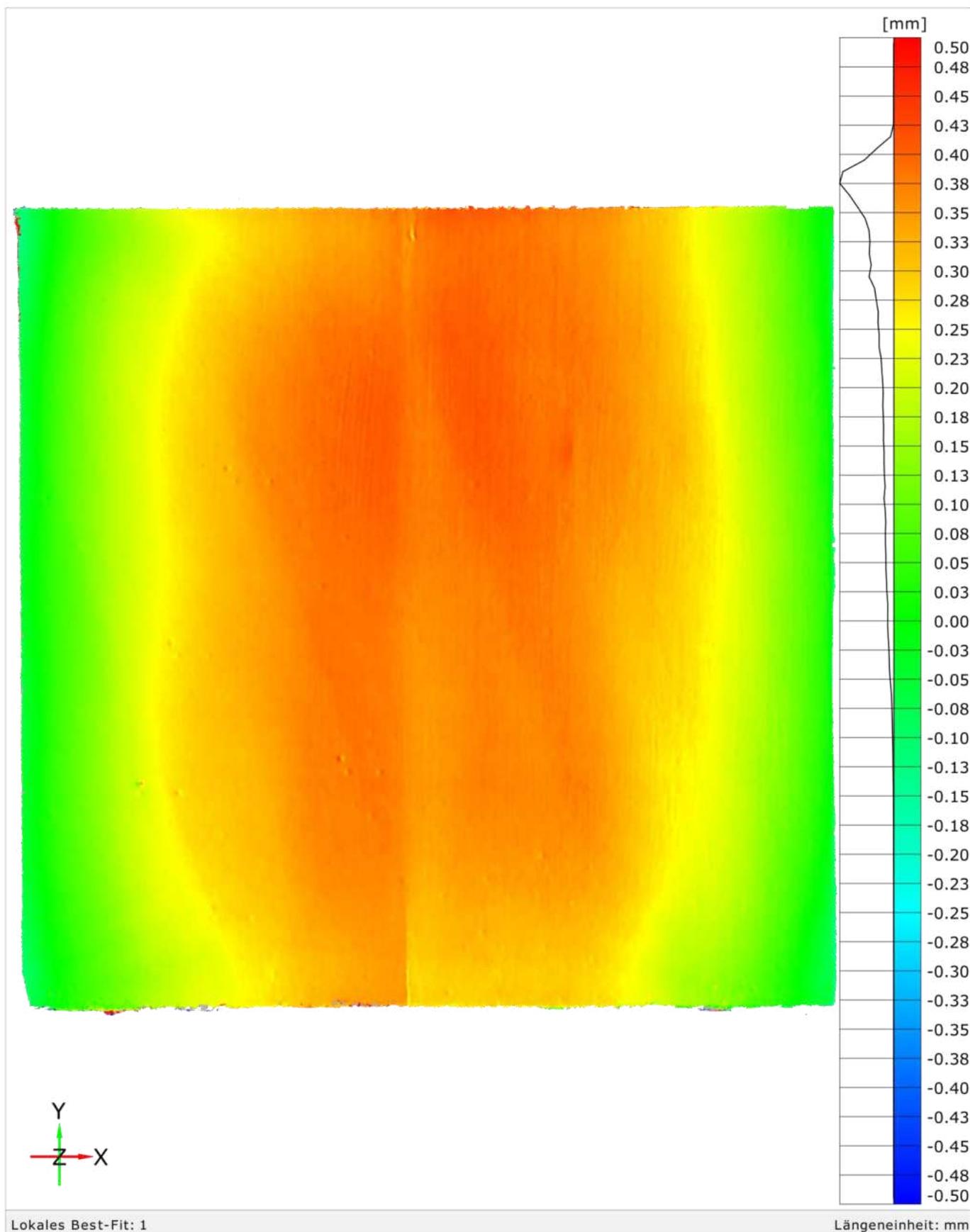
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-07-24, 16:20



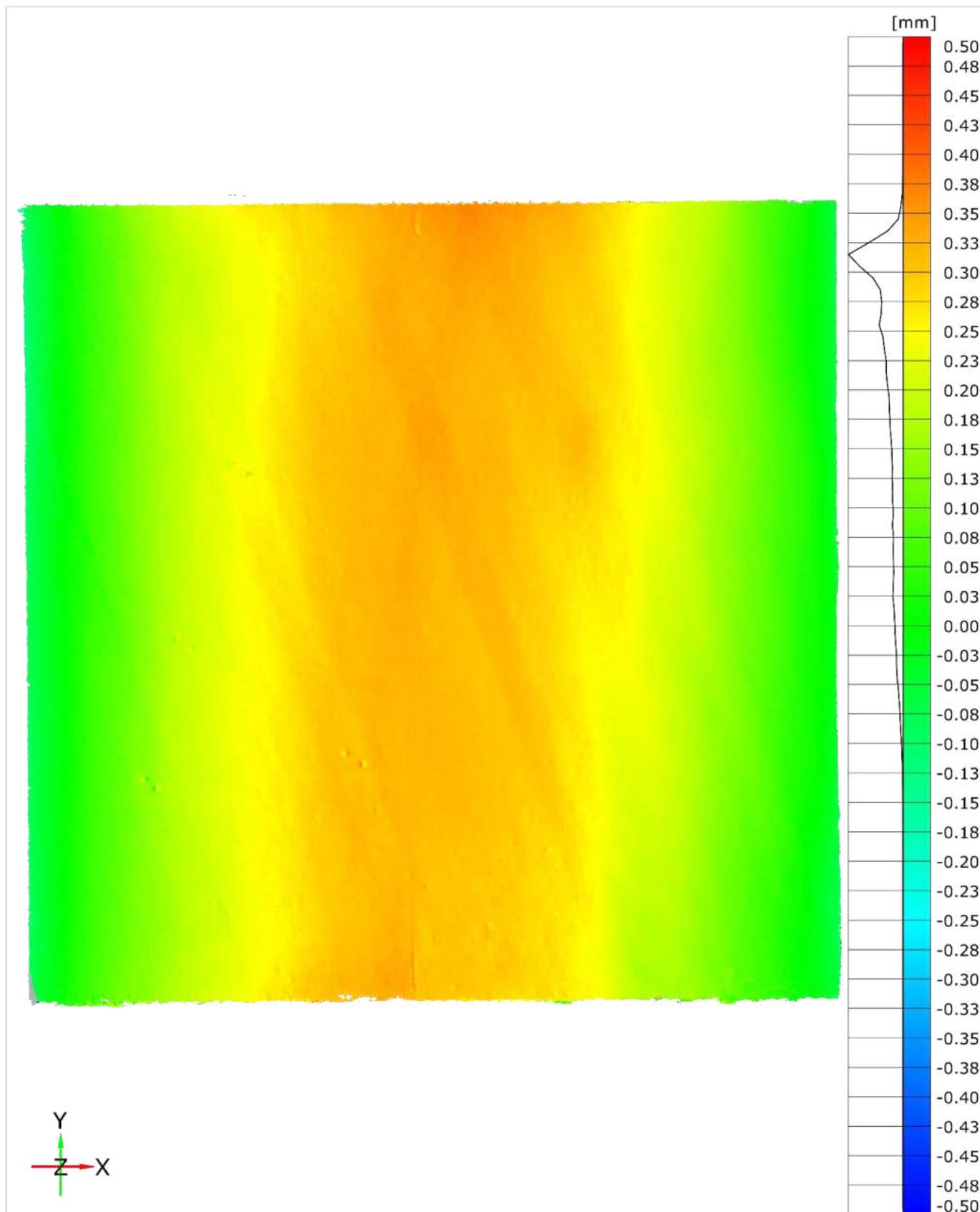
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

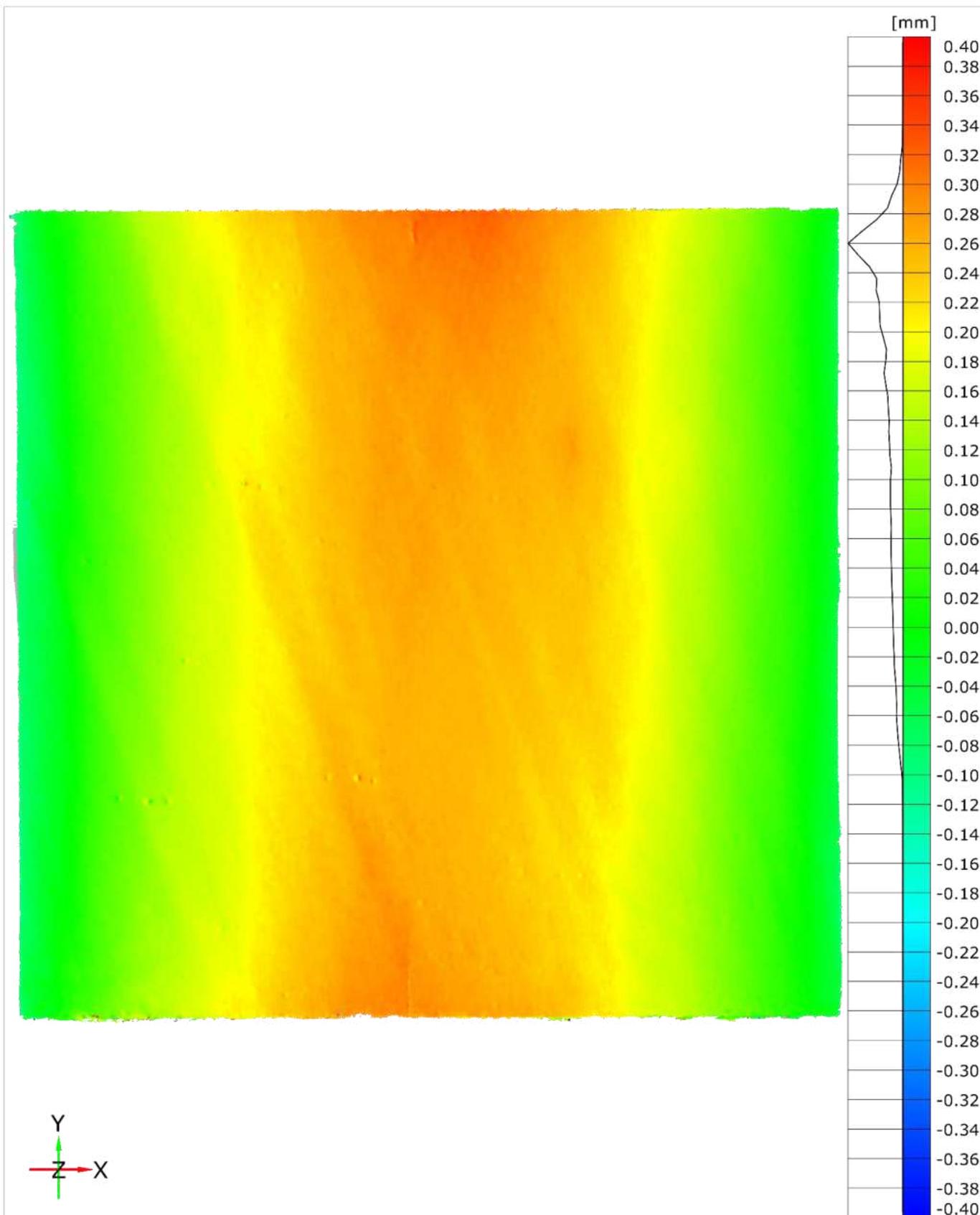
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-24, 16:20 und 2023-07-25, 11:45



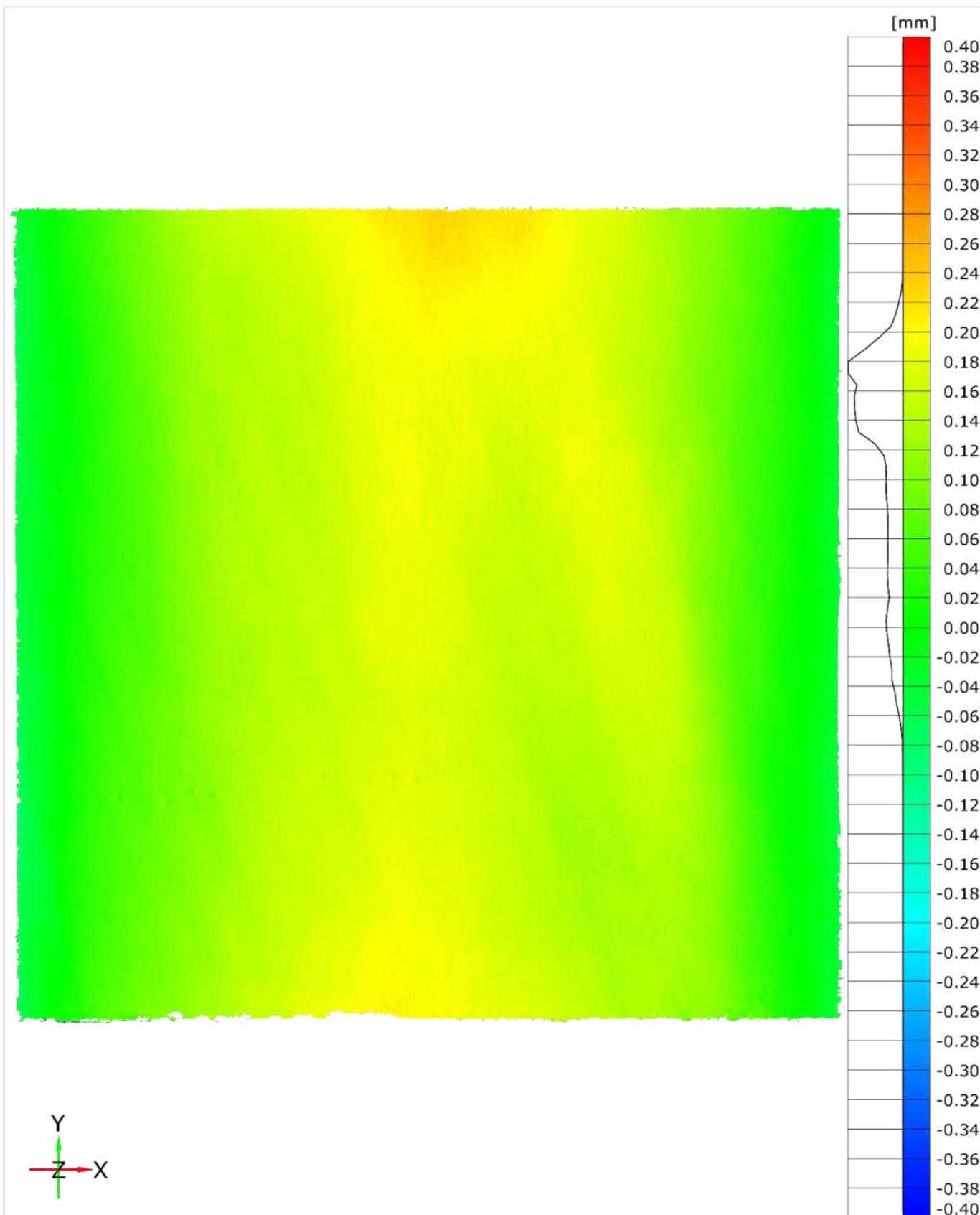
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-25, 11:45 und 2023-07-26, 11:40



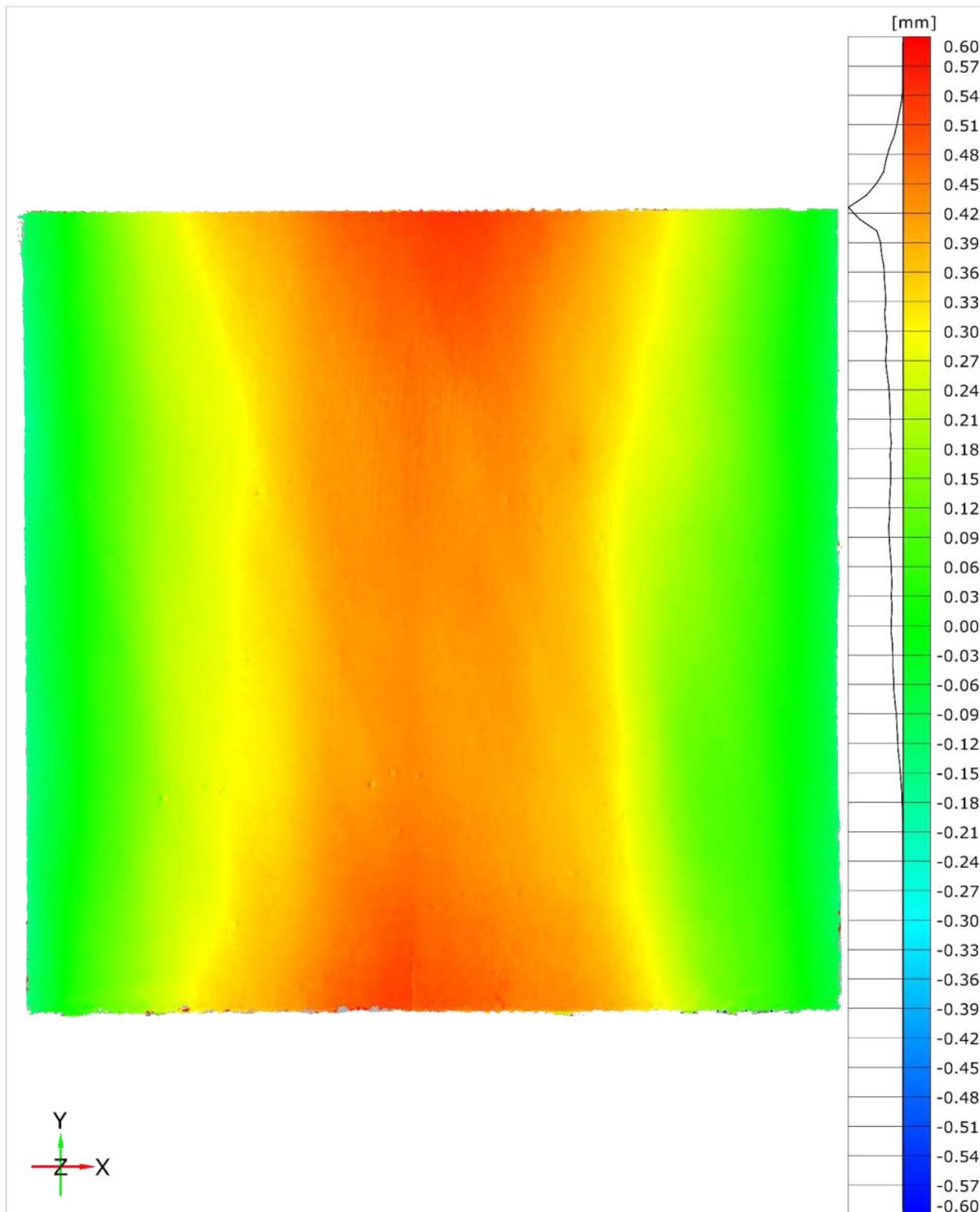
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-26, 11:40 und 2023-07-27, 12:35



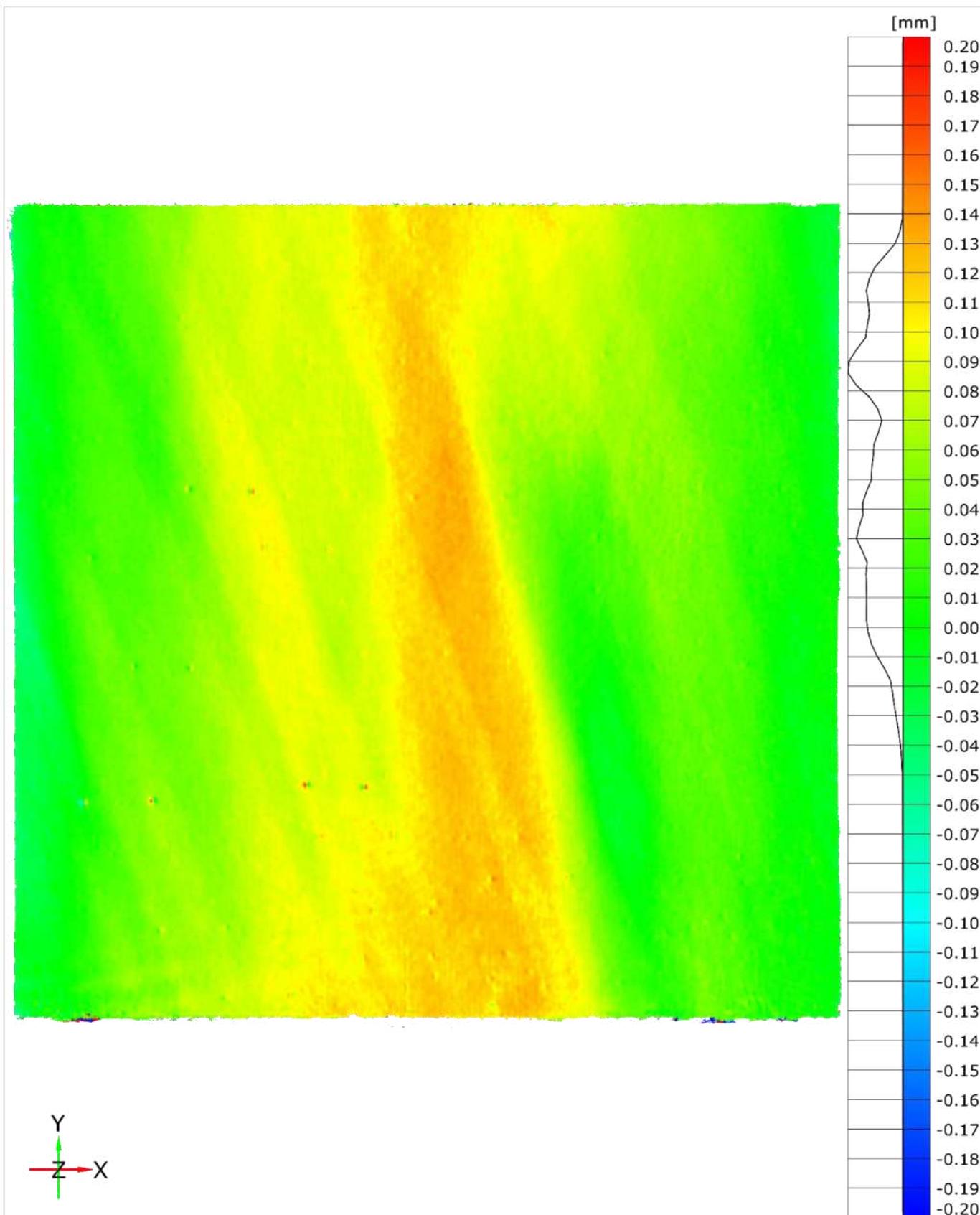
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-27, 12:35 und 2023-07-28, 11:00



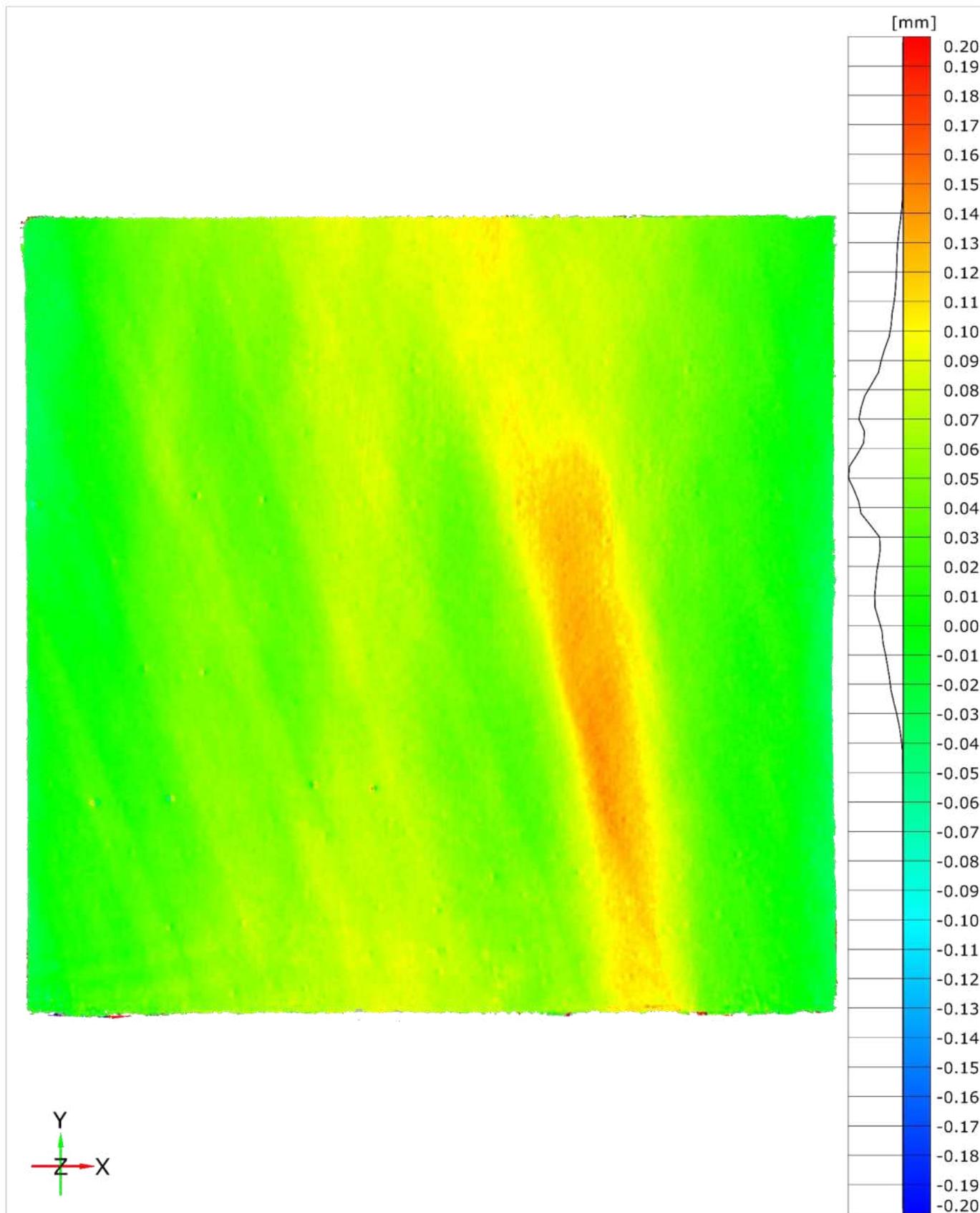
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-28, 11:00 und 2023-07-31, 14:19



Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-31, 14:19 und 2023-08-01, 11:50



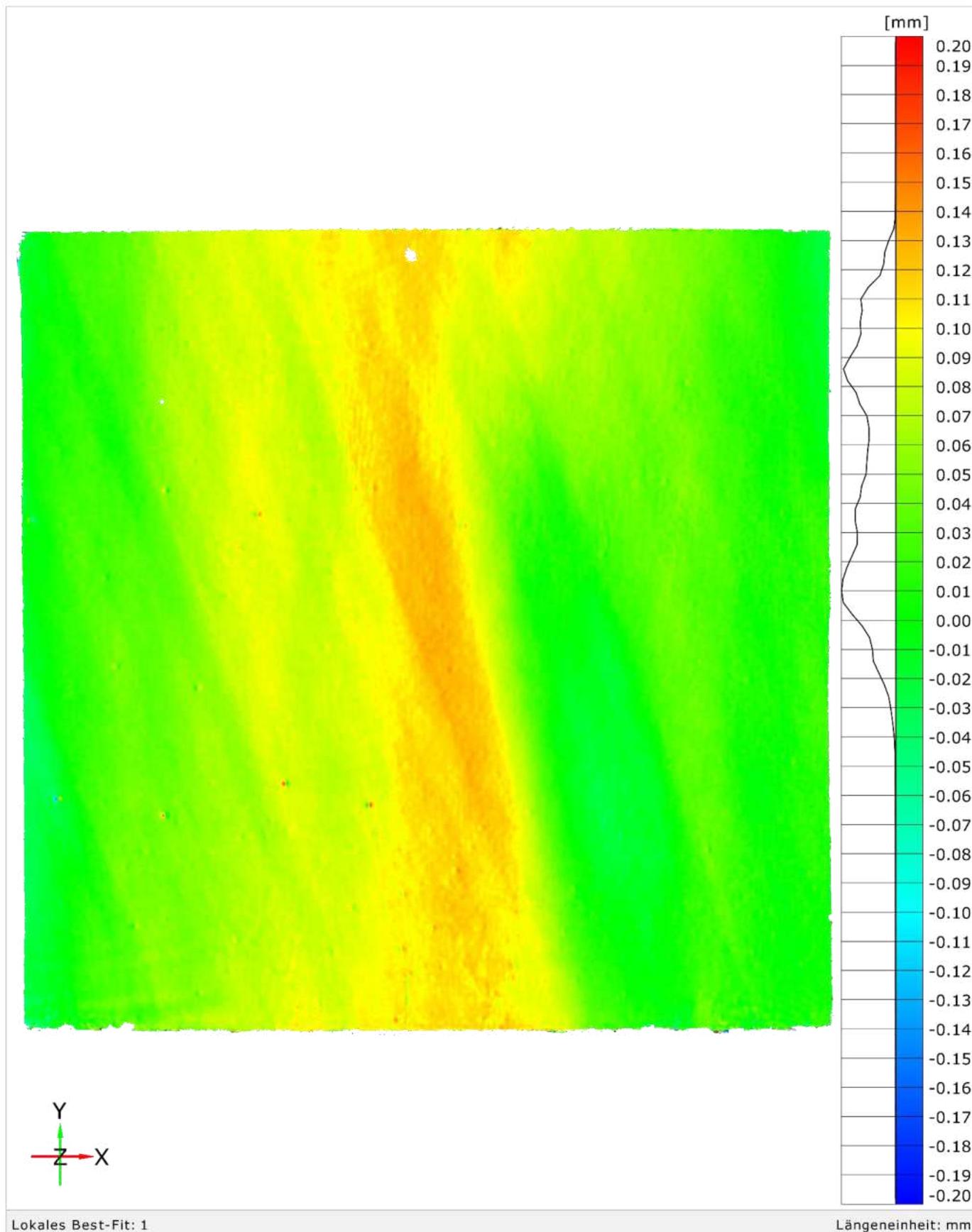
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-01, 11:50 und 2023-08-02, 11:19



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

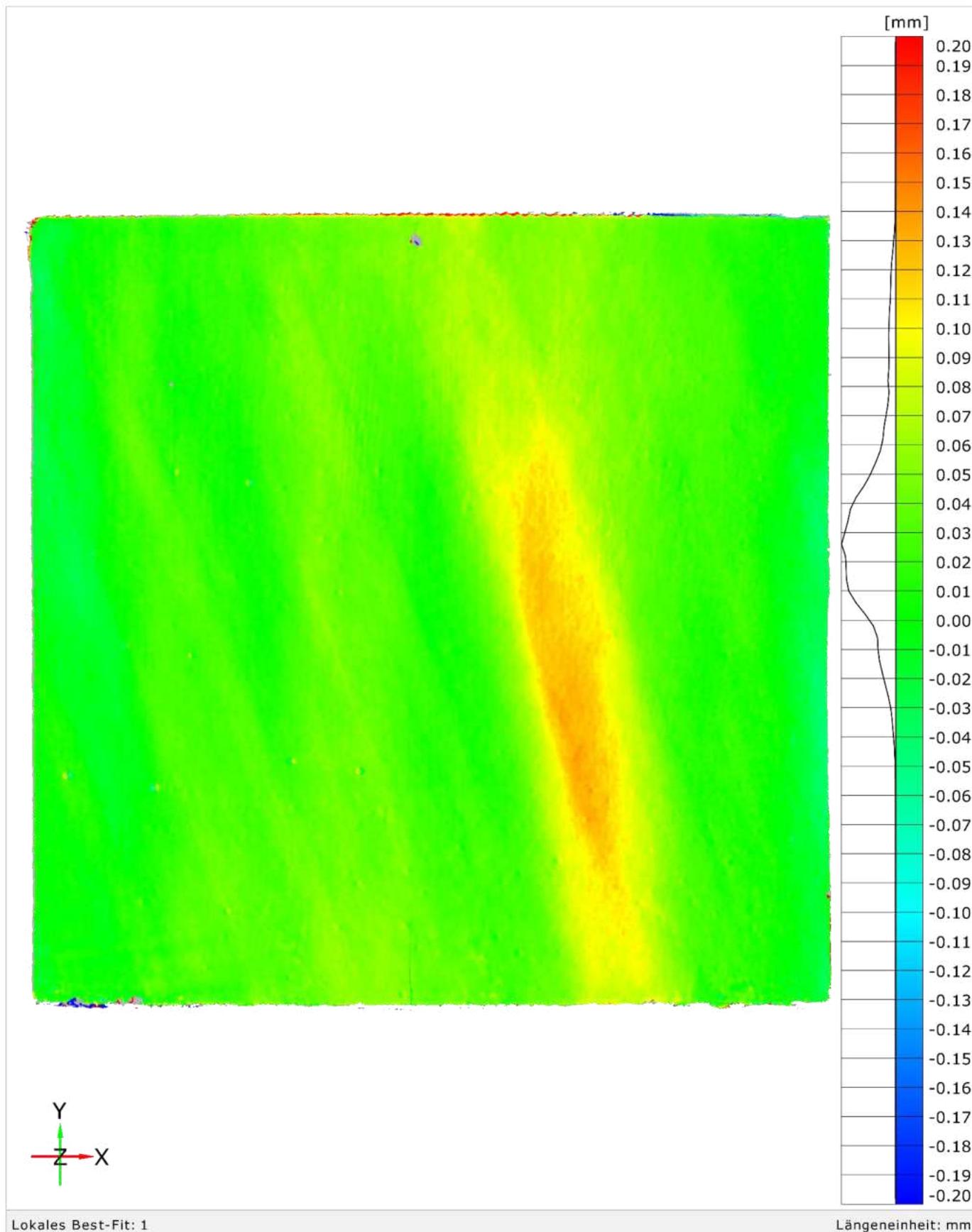
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-02, 11:19 und 2023-08-03, 12:00



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

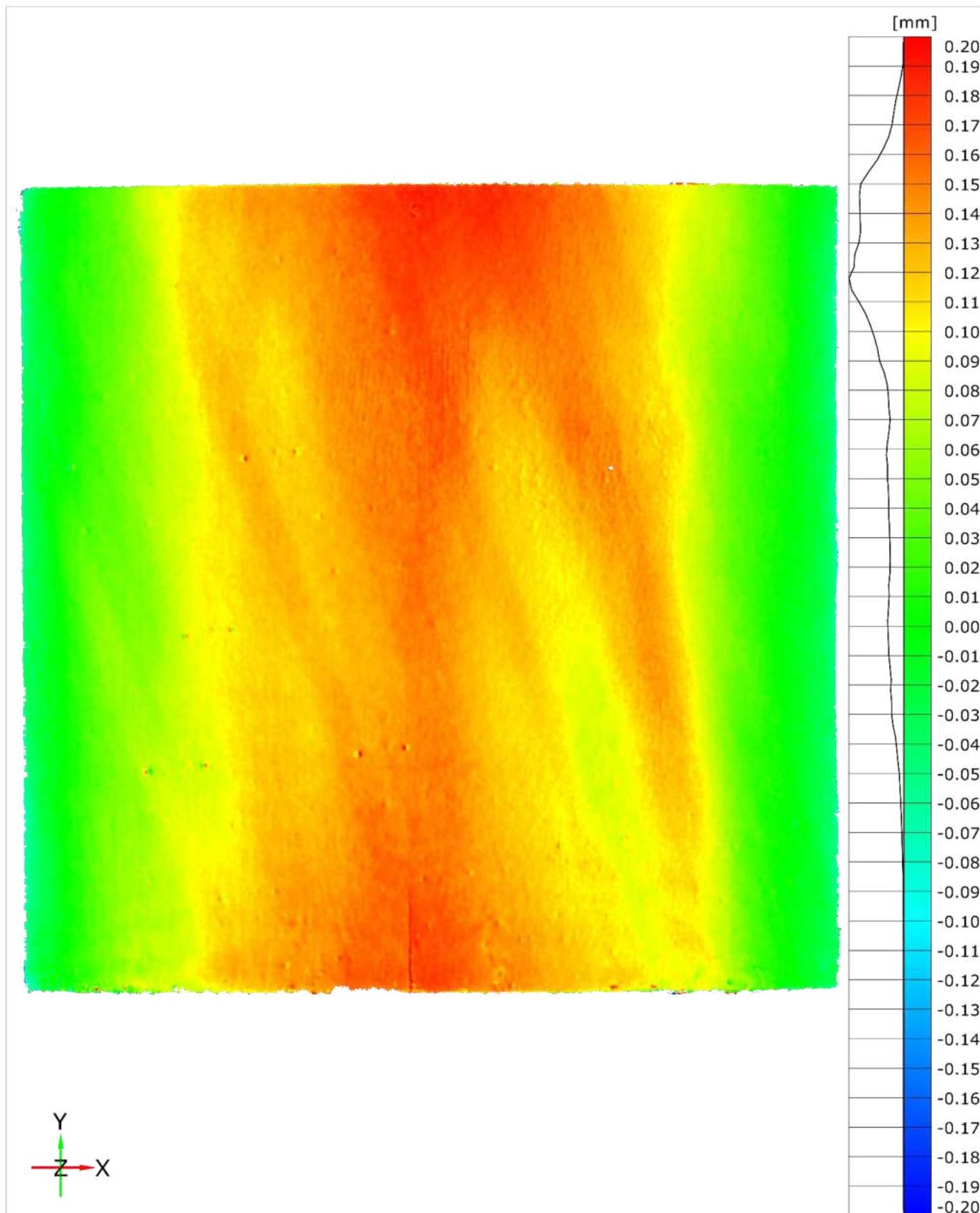
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-03, 12:00 und 2023-08-04, 09:30



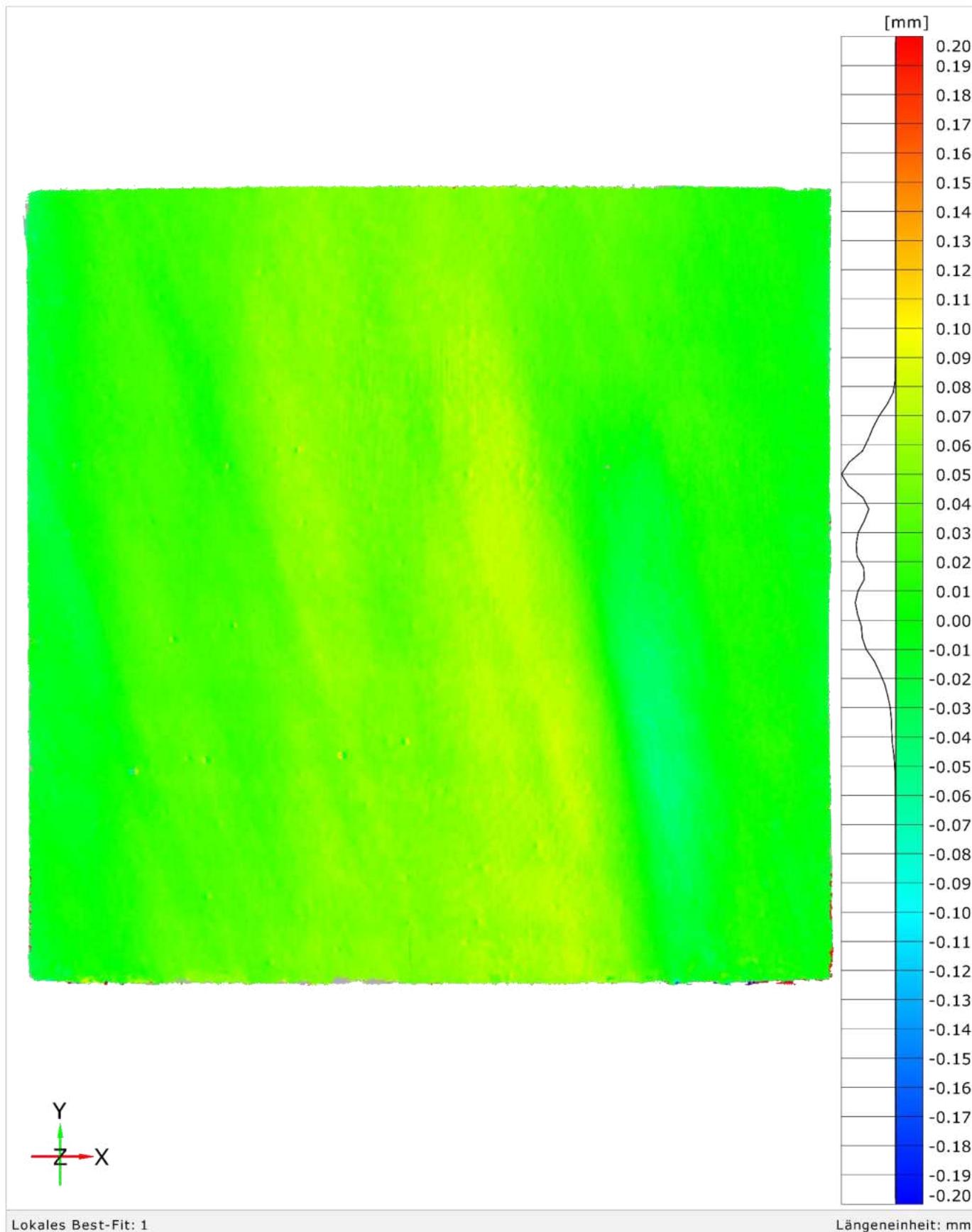
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

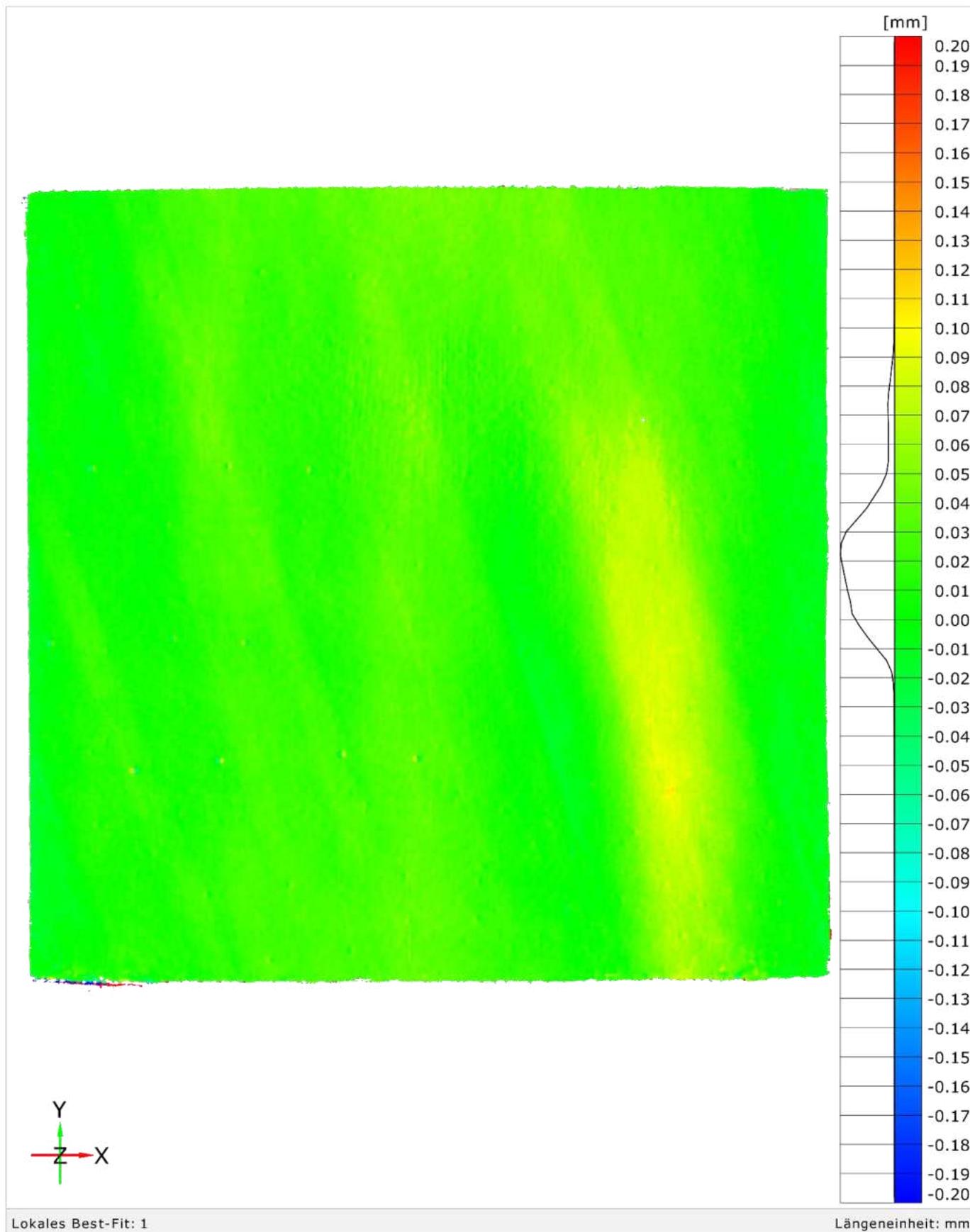
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-04, 09:30 und 2023-08-07, 11:50



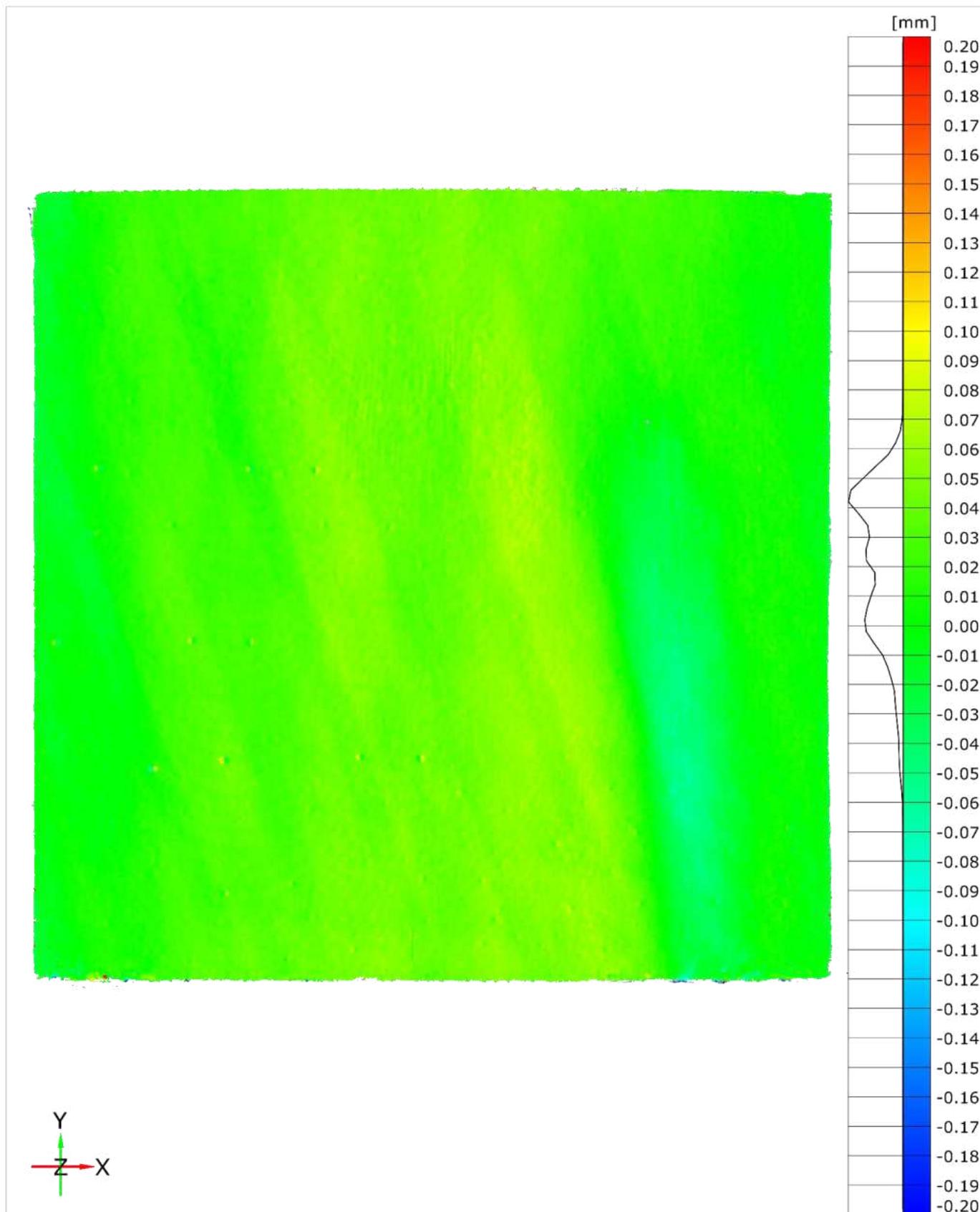
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-07, 11:50 und 2023-08-08, 10:30



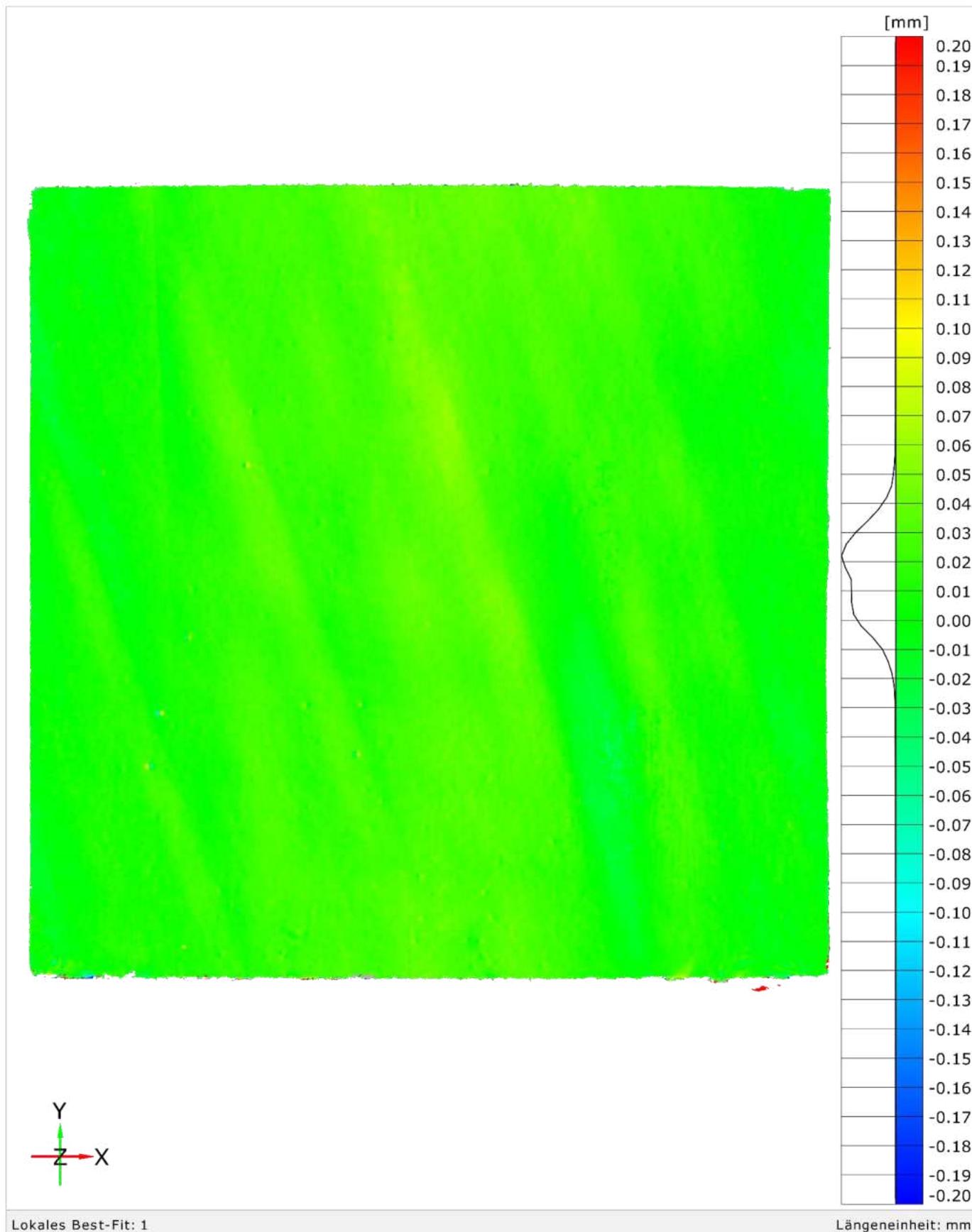
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-08, 10:30 und 2023-08-09, 12:00



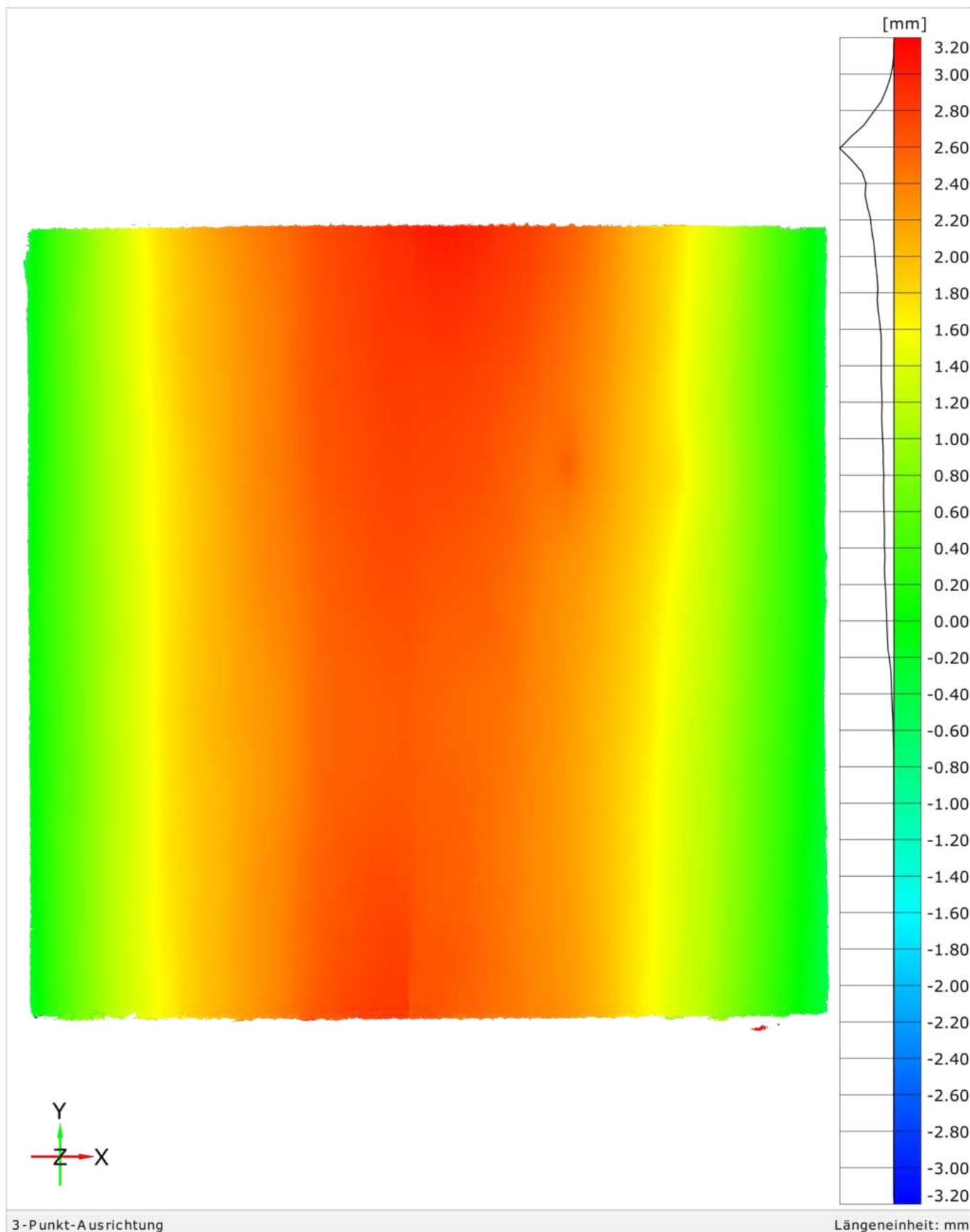
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-09, 12:00 und 2023-08-10, 11:09



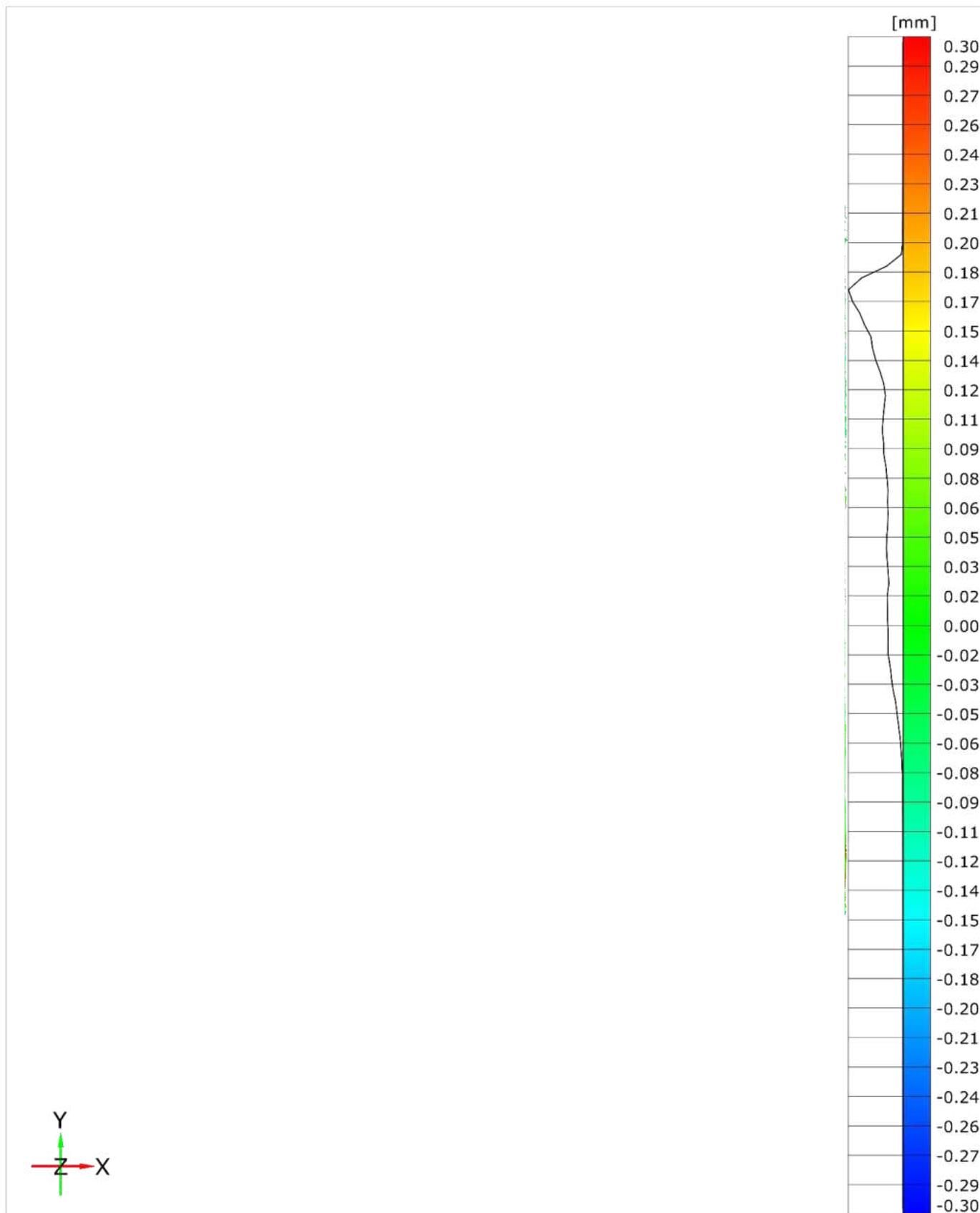
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-08-10, 11:09 und 2023-08-11, 09:30



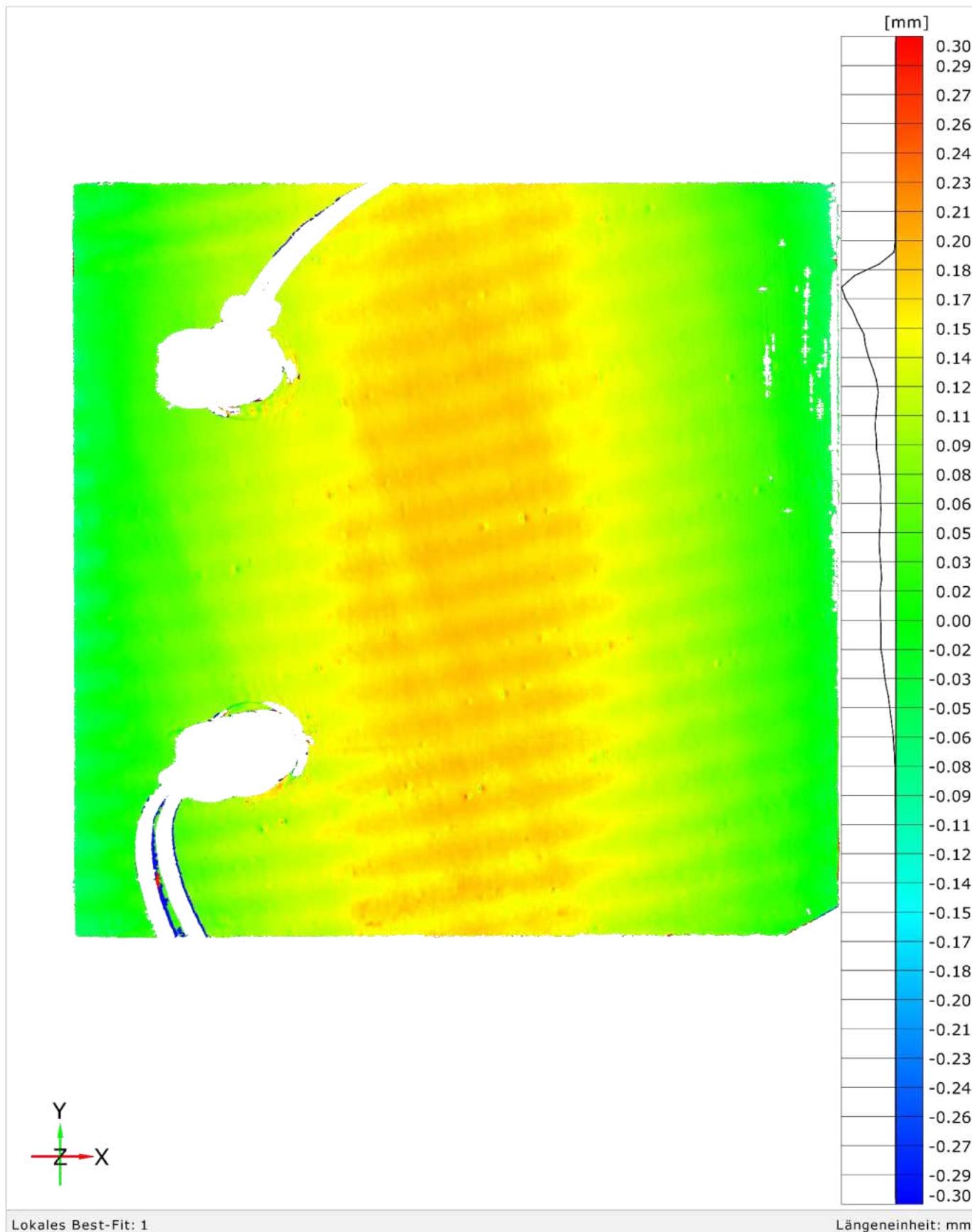
Klimakammertest | VG-M-2 | 2023-07-24, 11:50 und 2023-08-11, 09:30



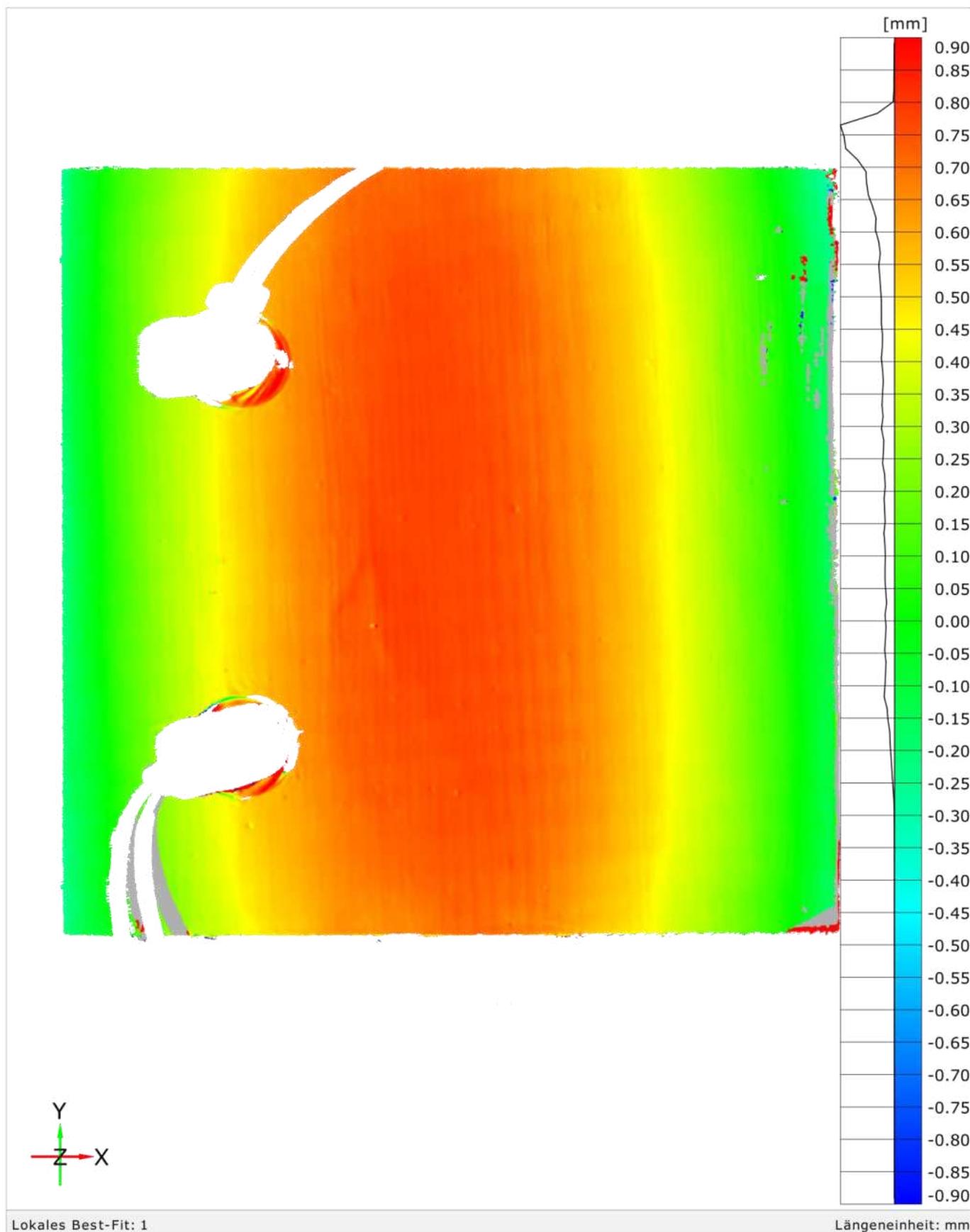
Klimakammertest | B-M-3 |



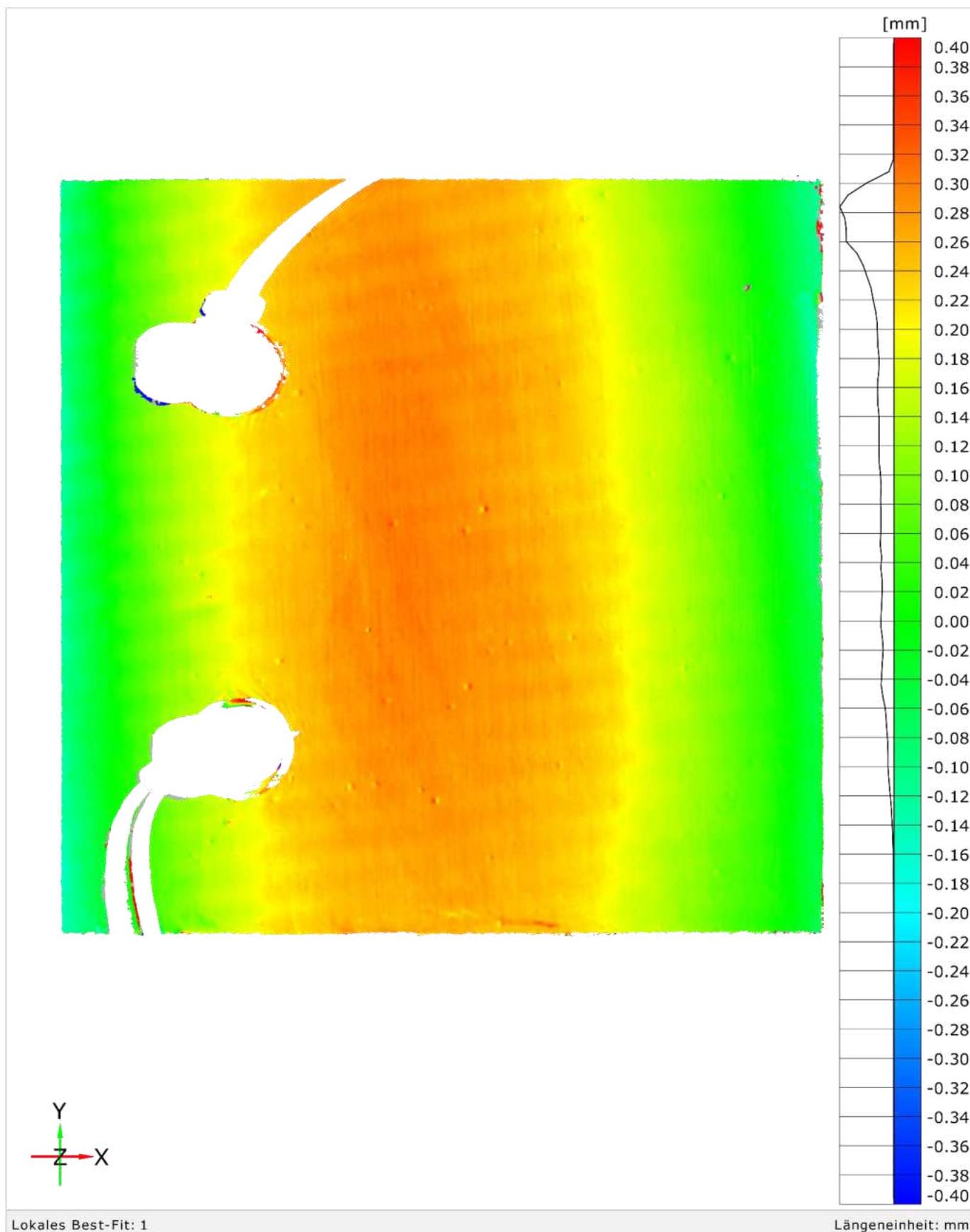
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-04, 09:00



Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-04, 09:00 und 2023-07-05, 09:10



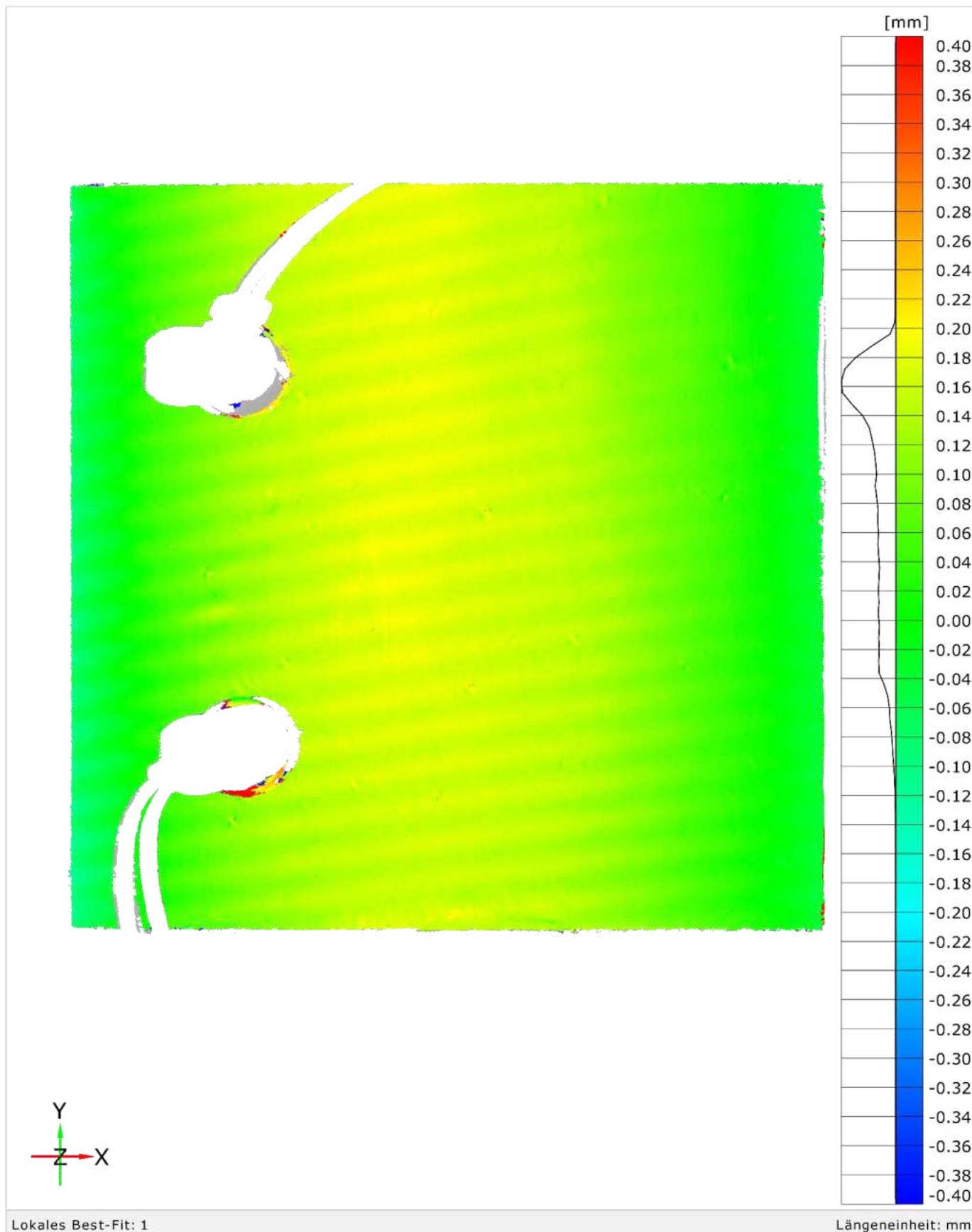
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-05, 09:10 und 2023-07-06, 09:45



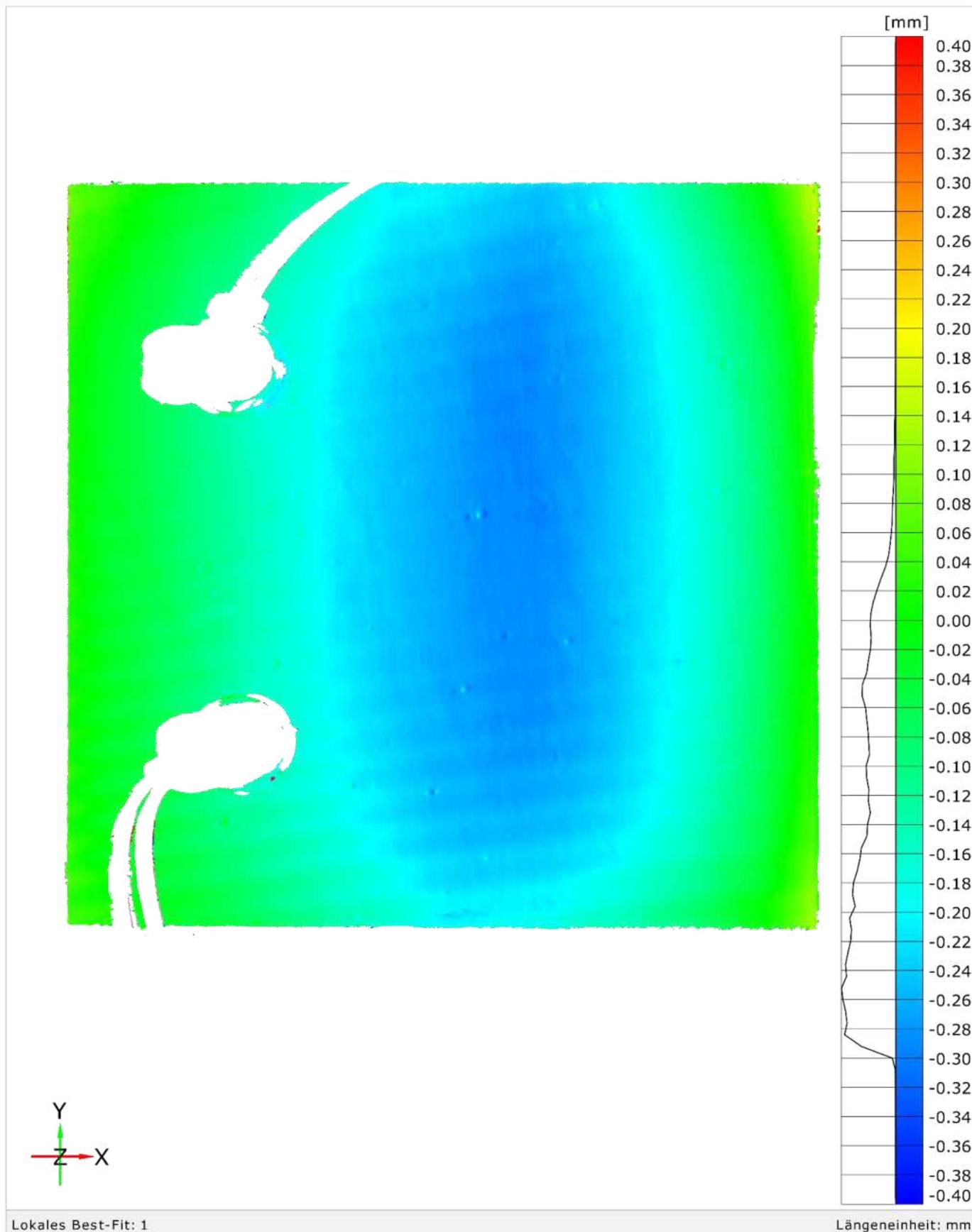
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

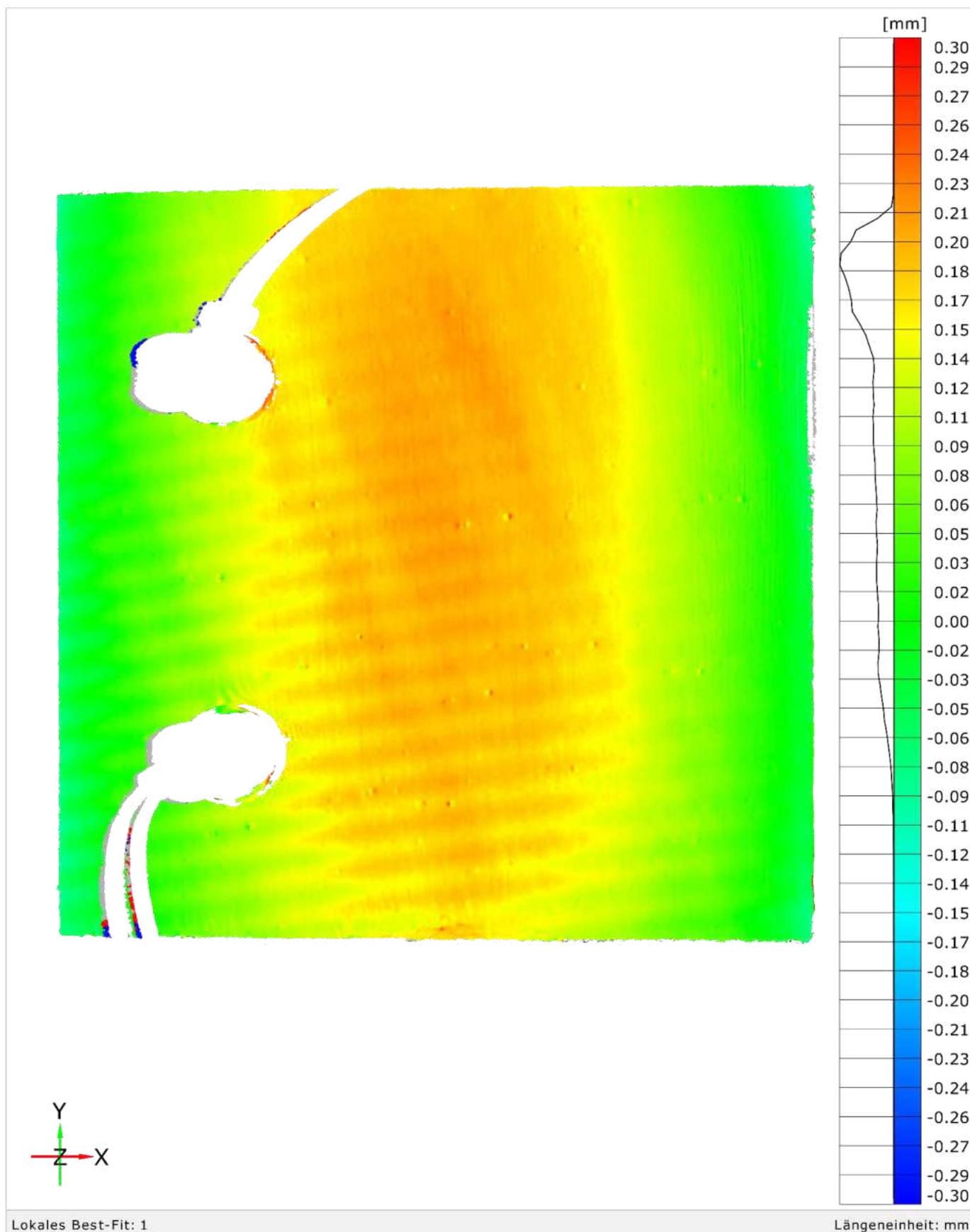
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-06, 09:45 und 2023-07-07, 10:35



Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-07, 10:35 und 2023-07-10, 10:00



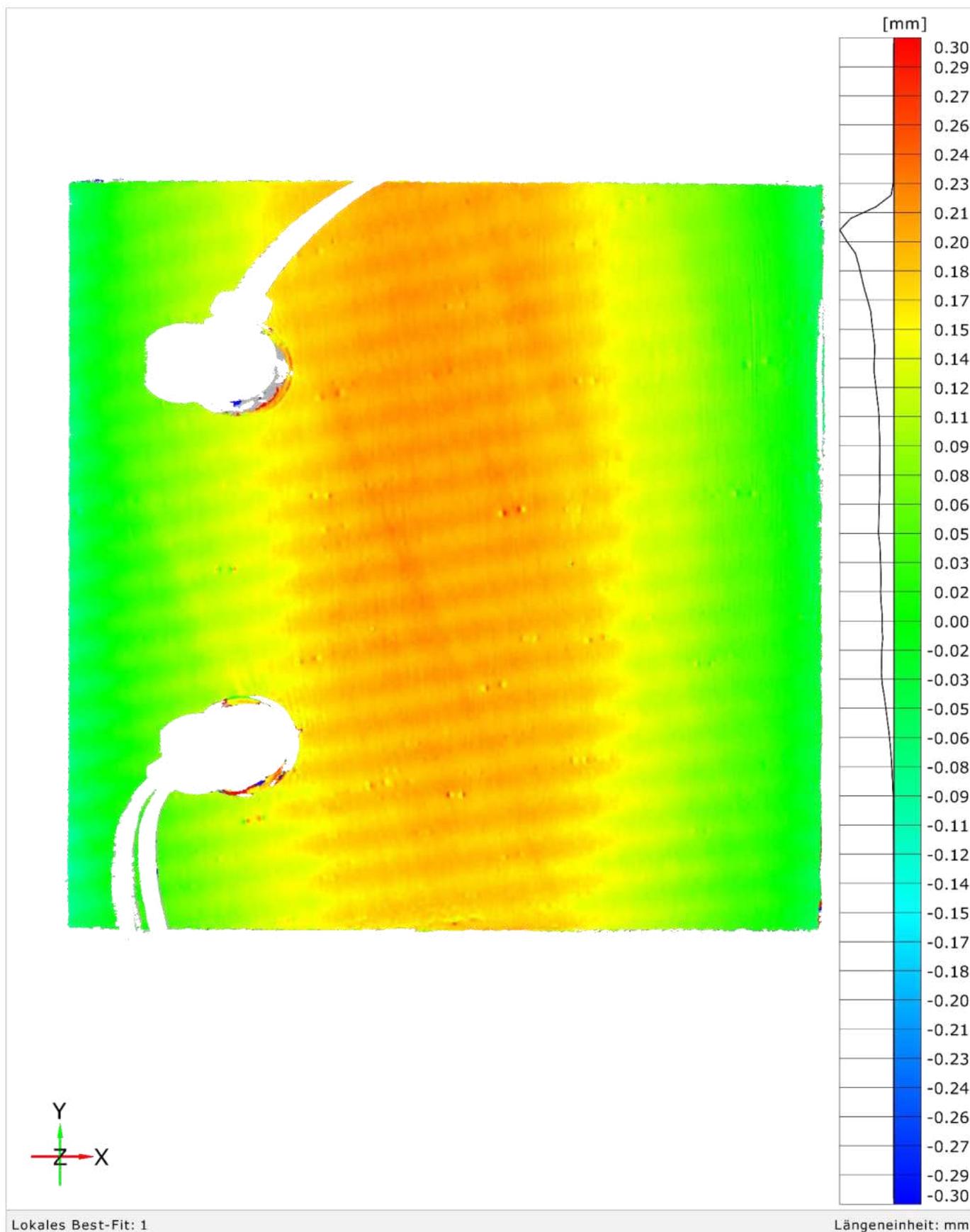
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-10, 10:00 und 2023-07-10, 16:25



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

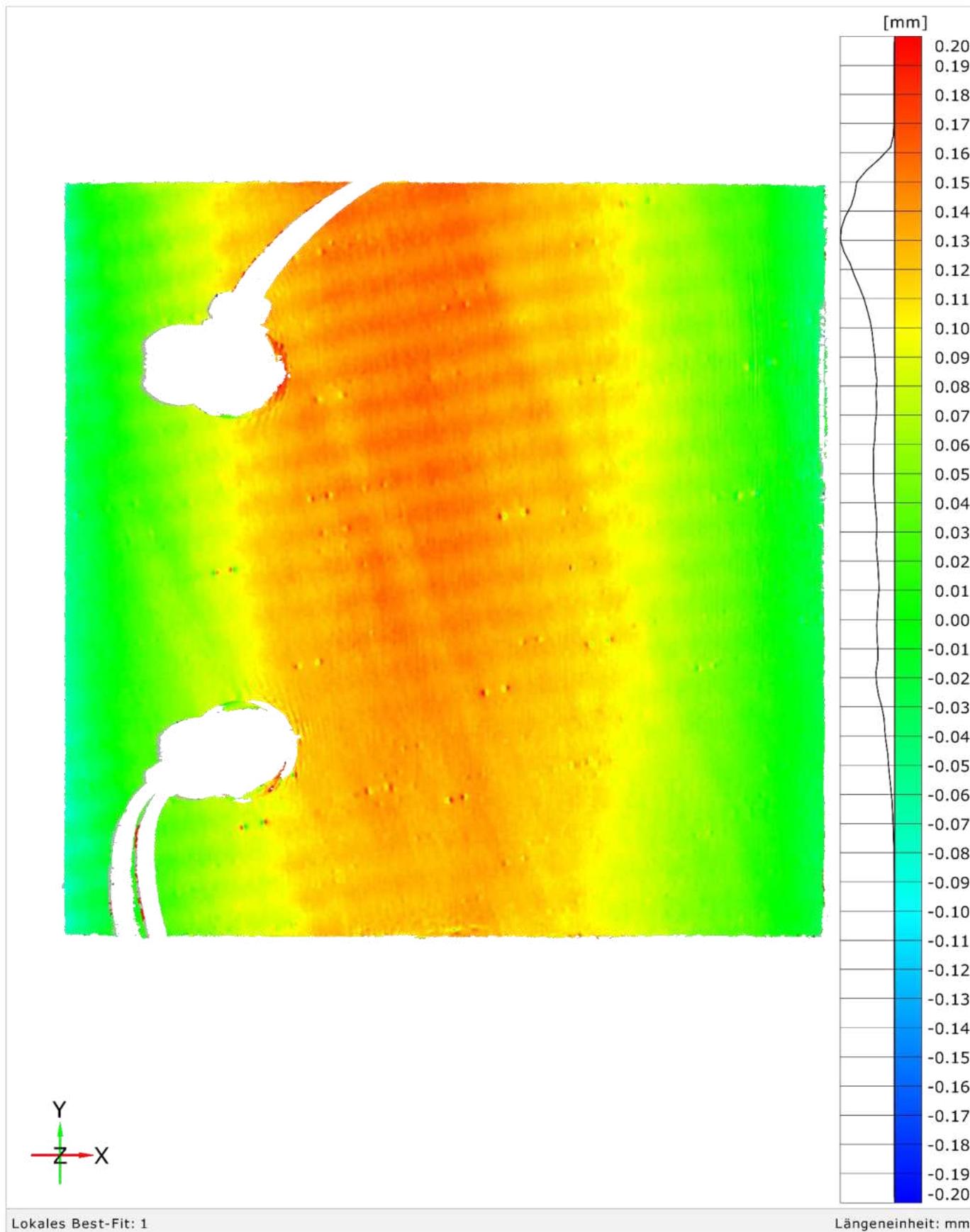
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-10, 16:25 und 2023-07-11, 10:29



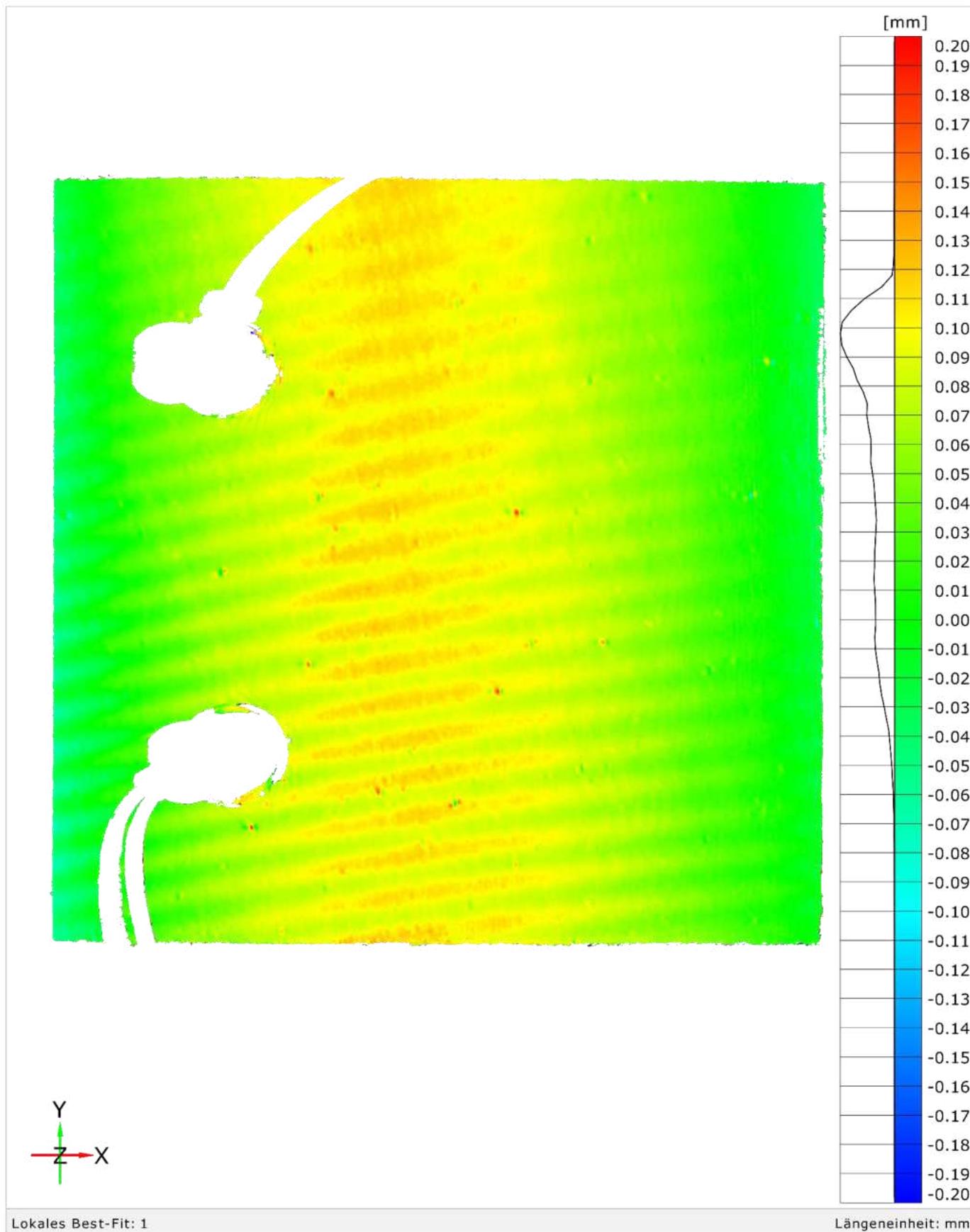
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-11, 10:29 und 2023-07-12, 09:50



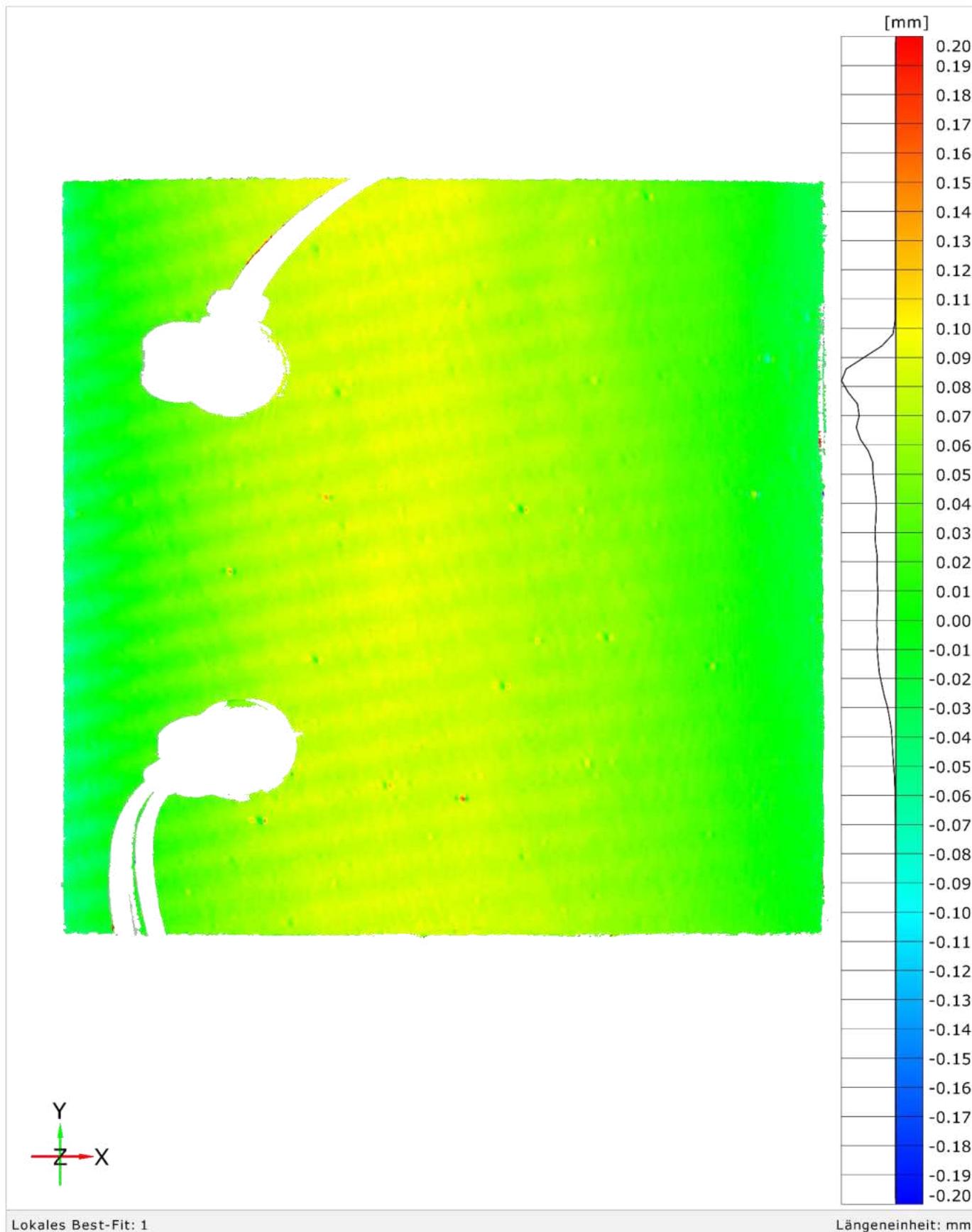
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-12, 09:50 und 2023-07-13, 08:30



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

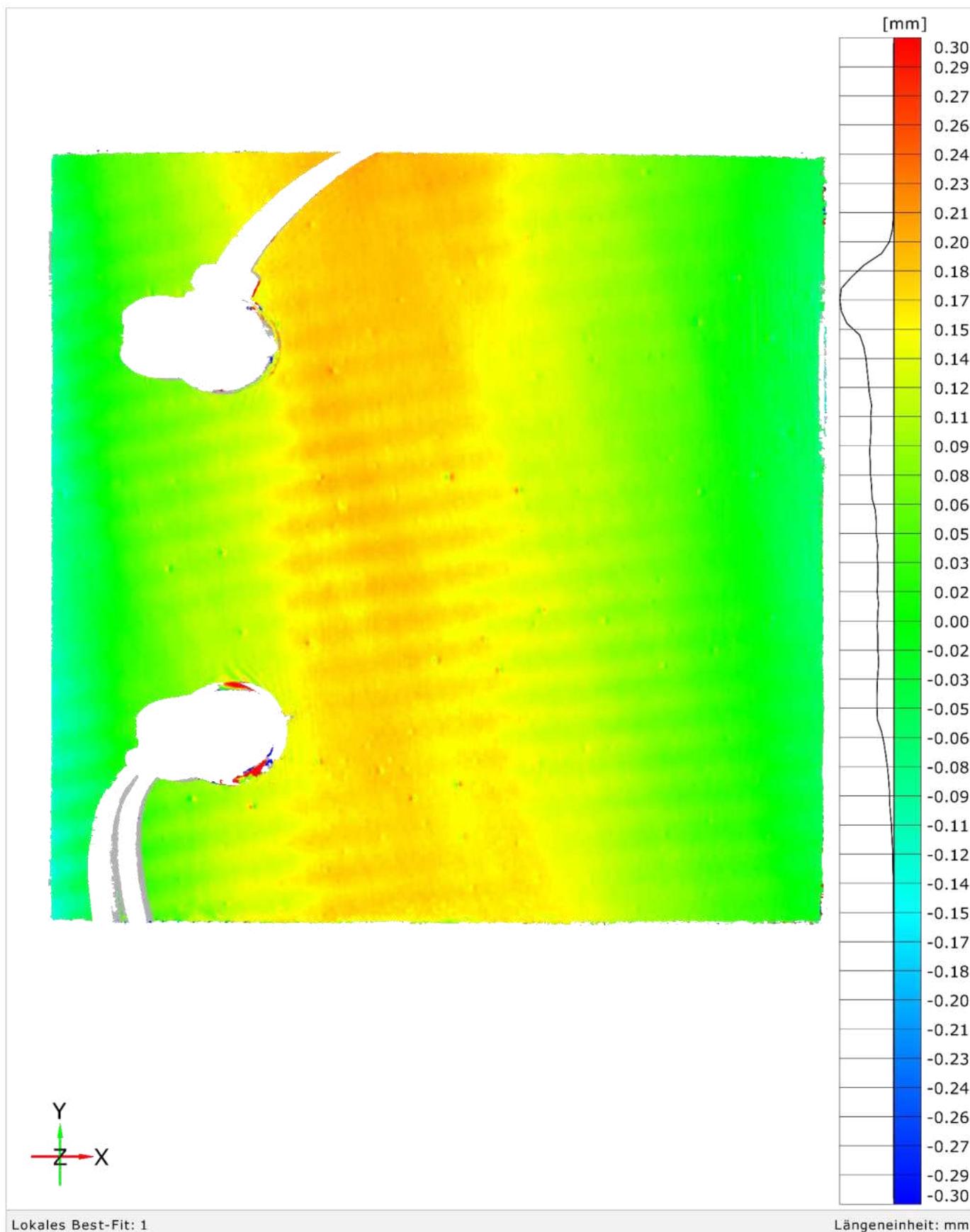
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-13, 08:30 und 2023-07-14, 09:50



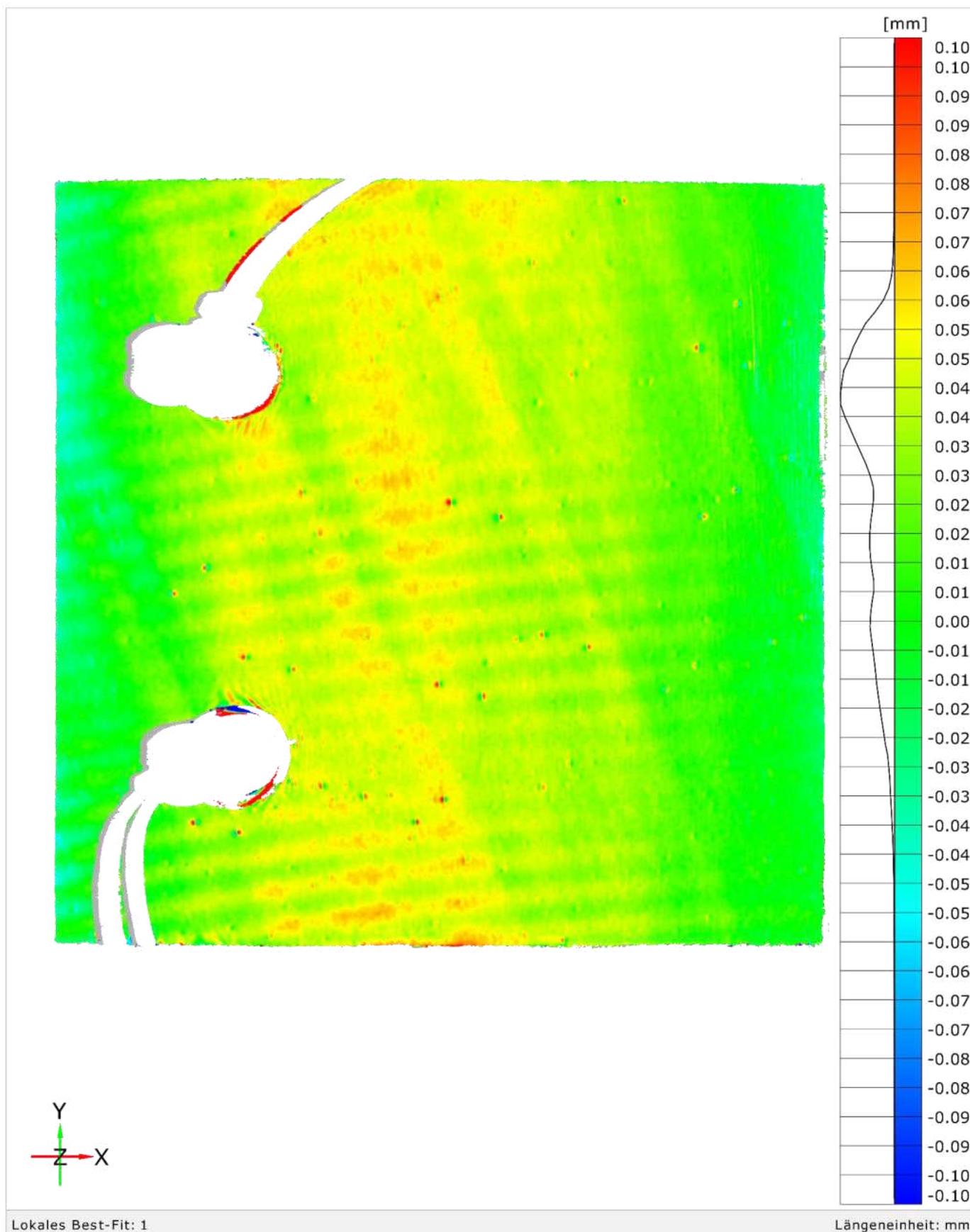
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

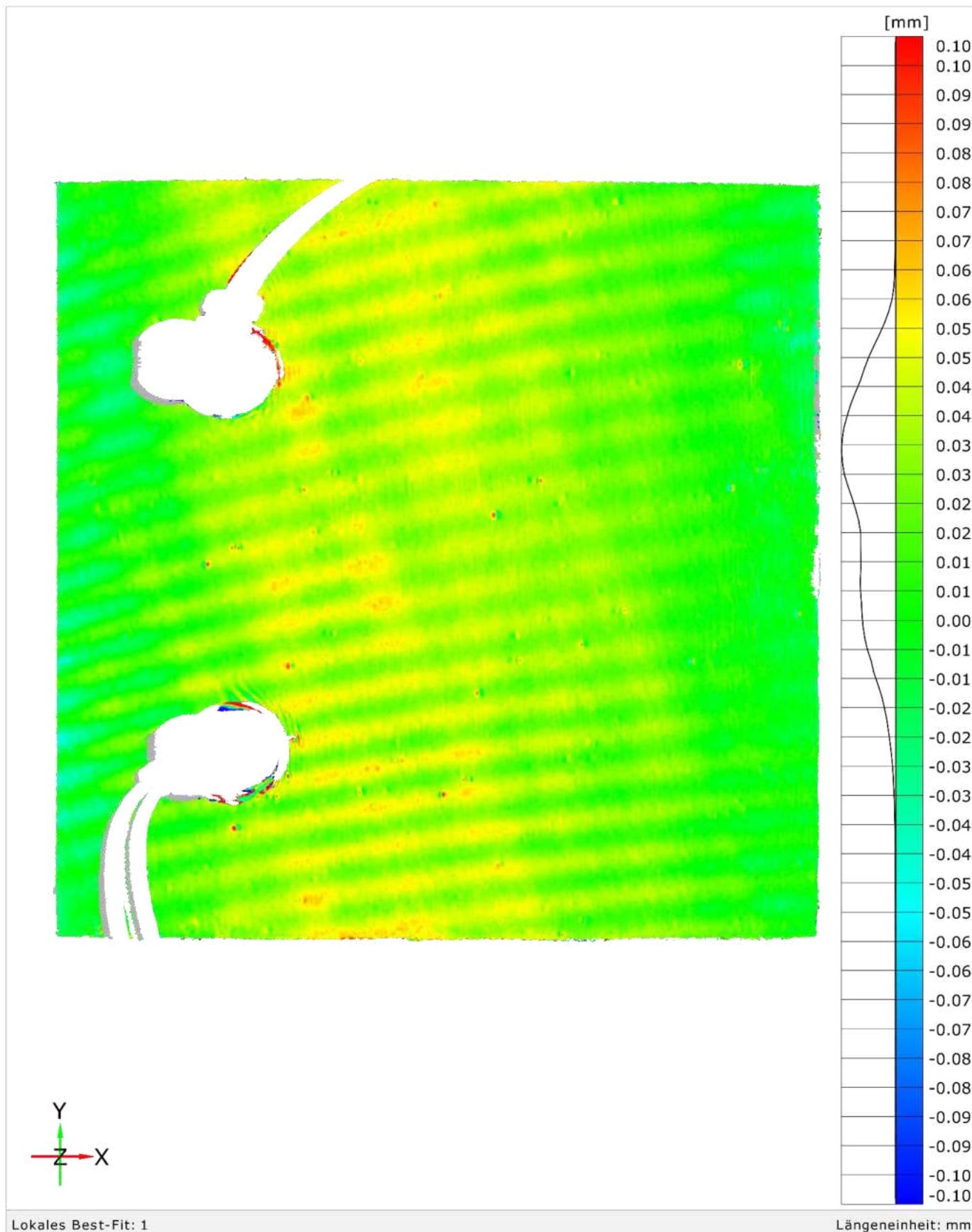
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-14, 09:50 und 2023-07-17, 11:10



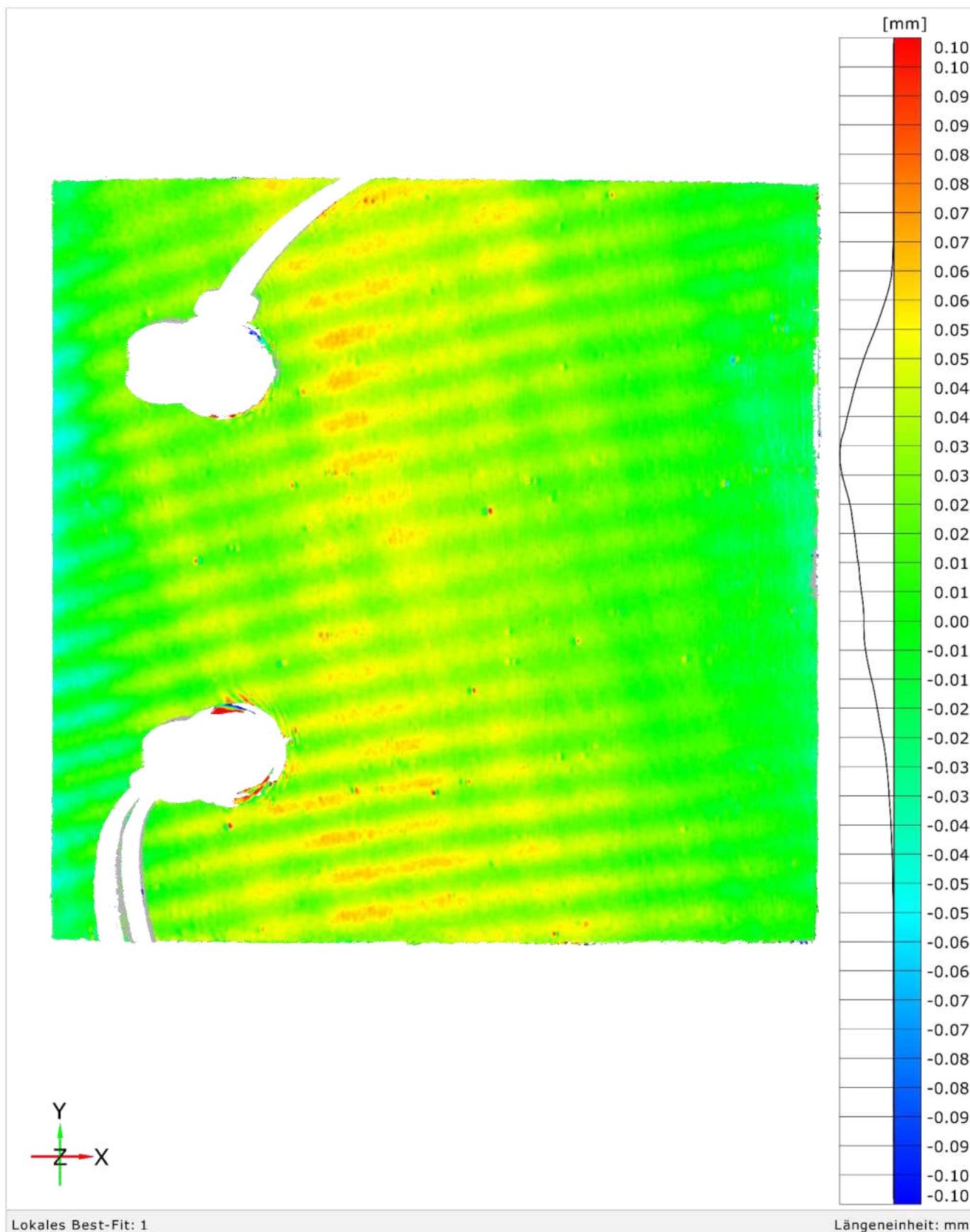
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-17, 11:10 und 2023-07-18, 10:40



Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-18, 10:40 und 2023-07-19, 10:04



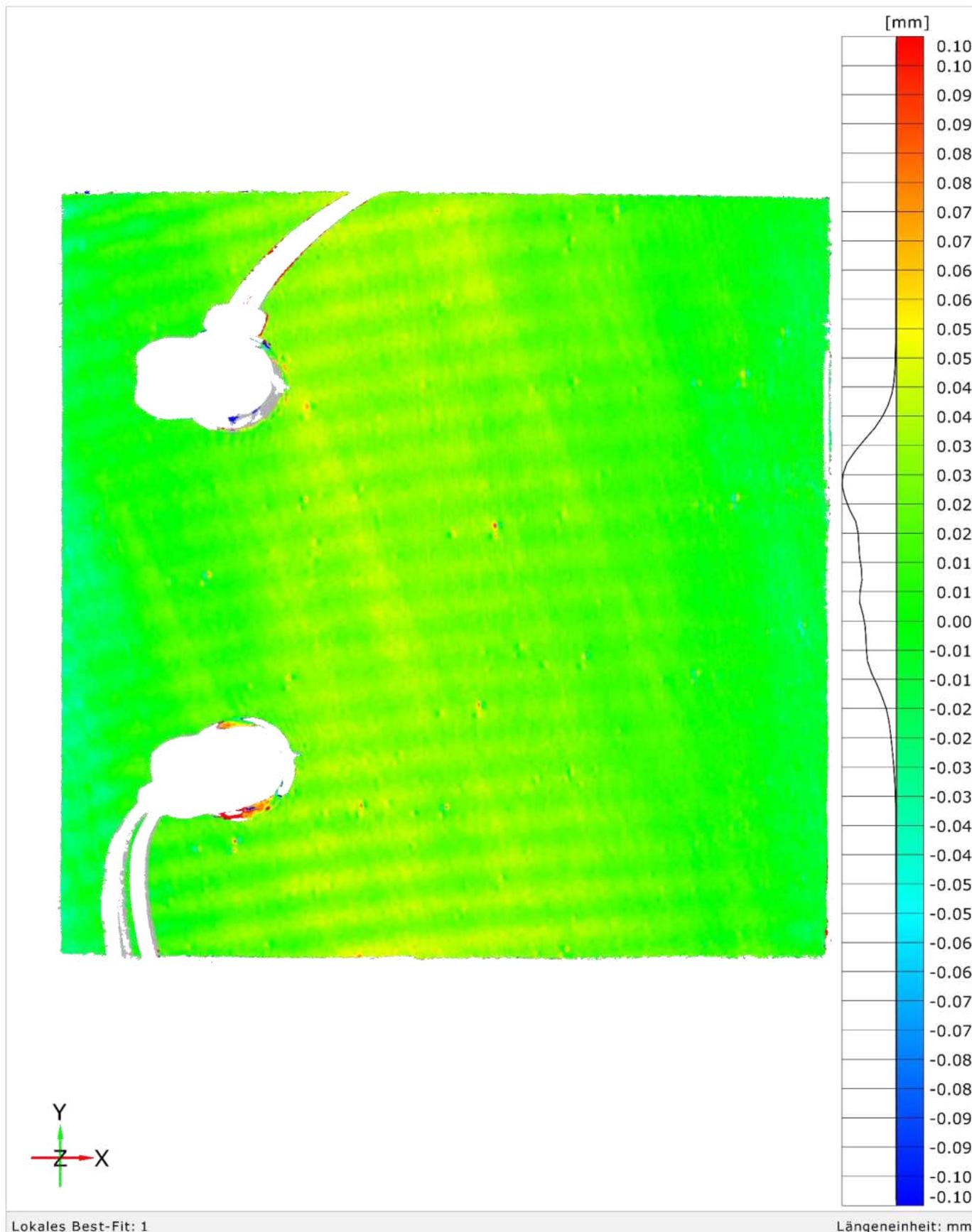
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-19, 10:04 und 2023-07-20, 12:00



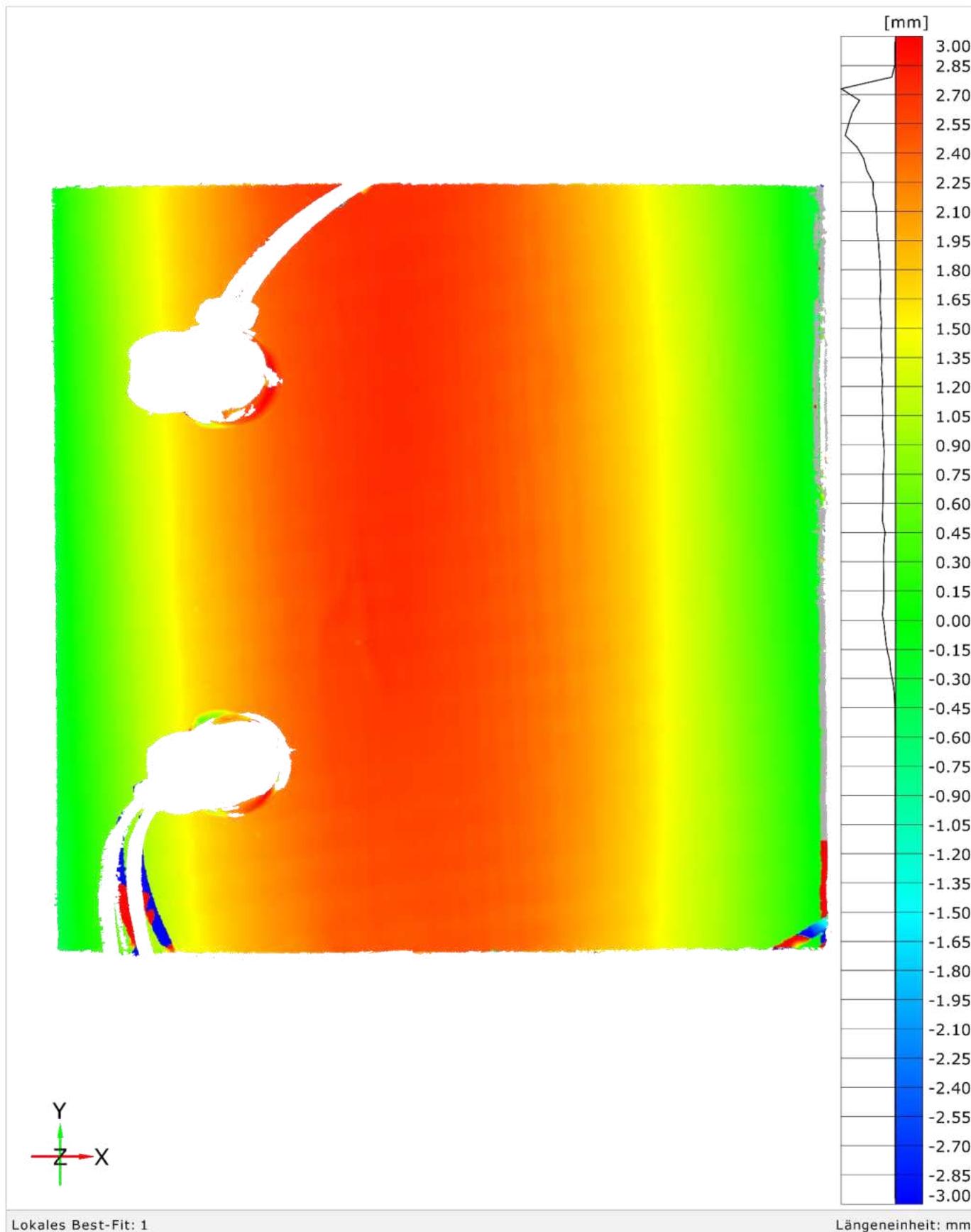
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-20, 12:00 und 2023-07-21, 10:14



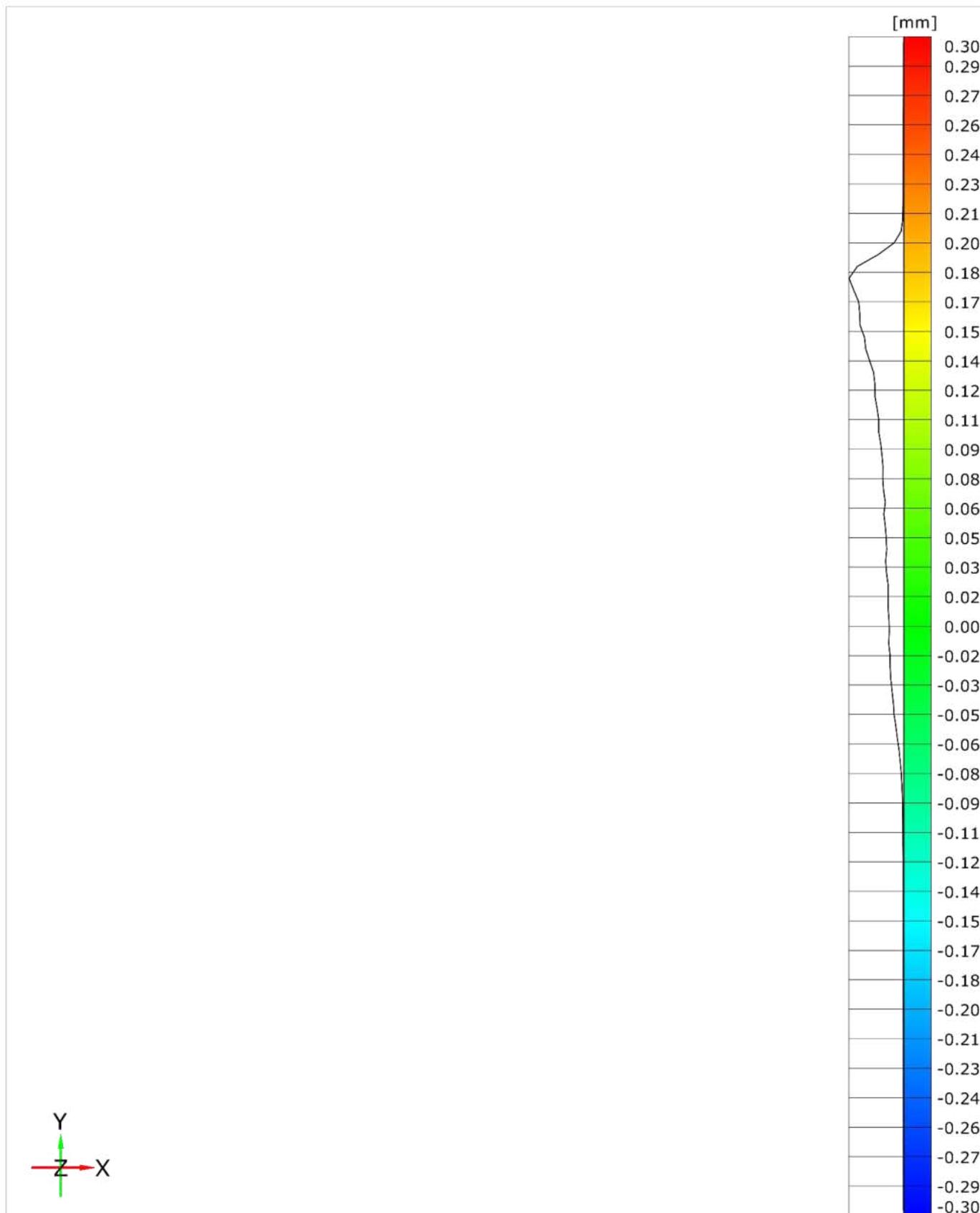
Klimakammertest | B-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-21, 10:14



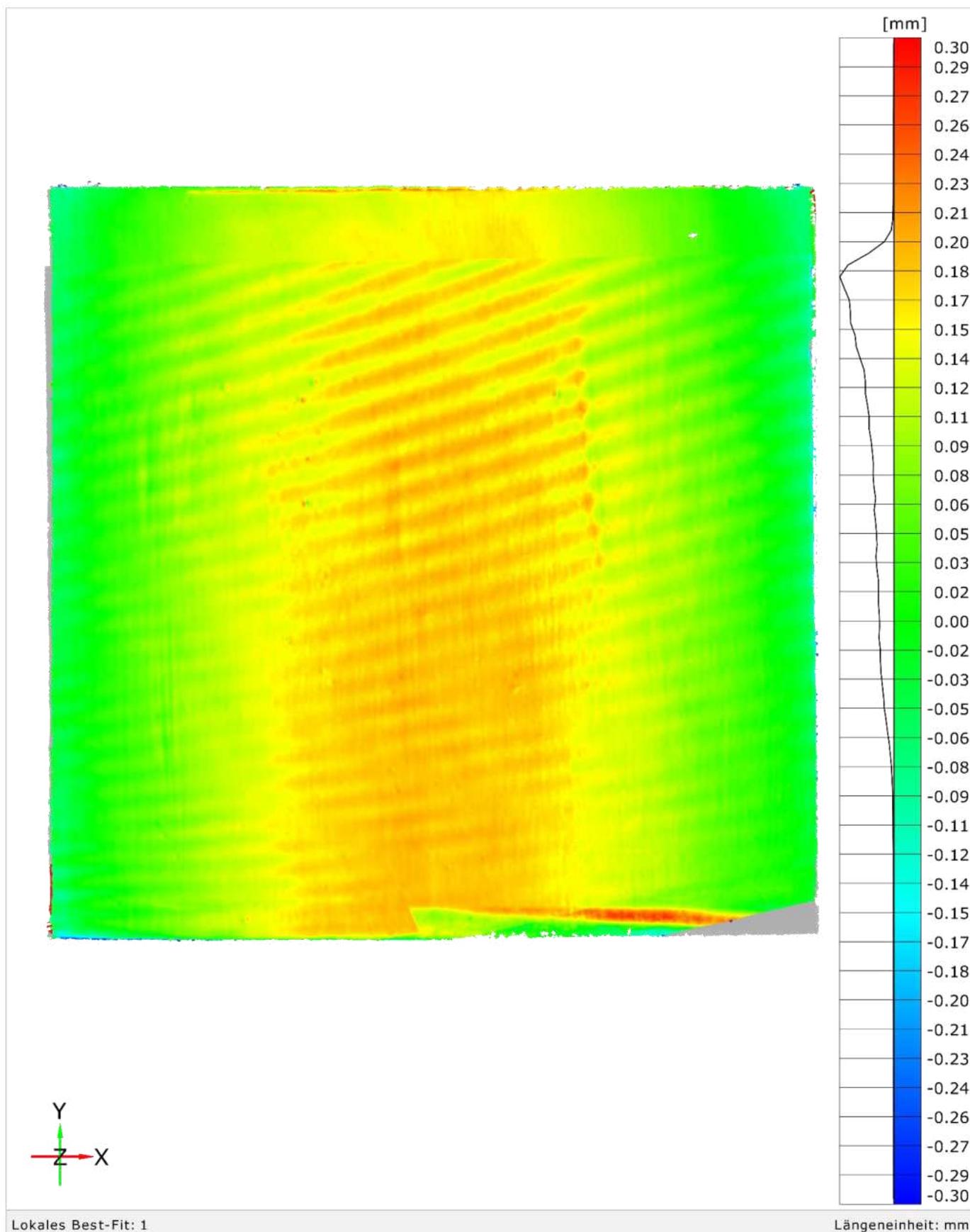
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

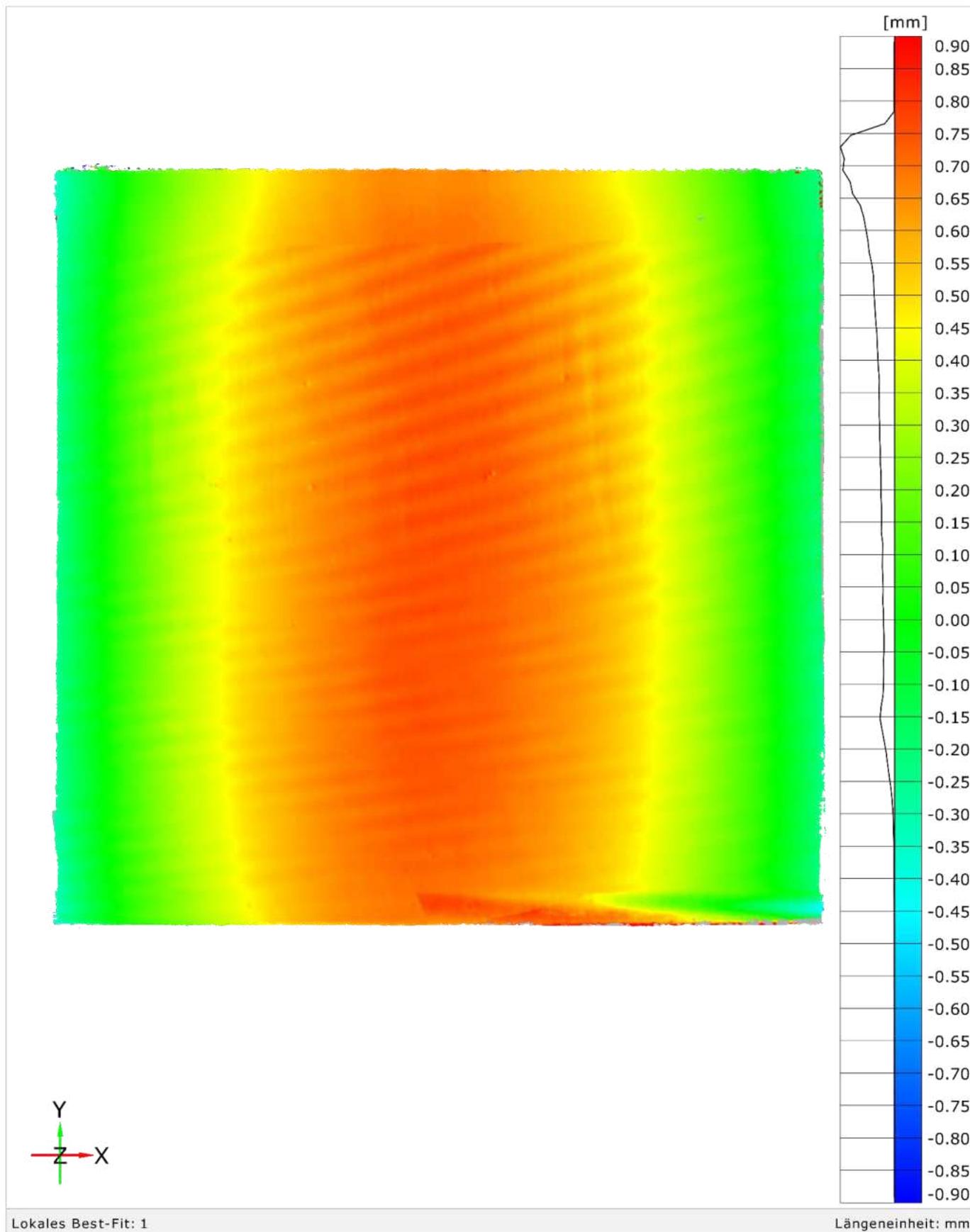
Klimakammertest | S-M-3 |



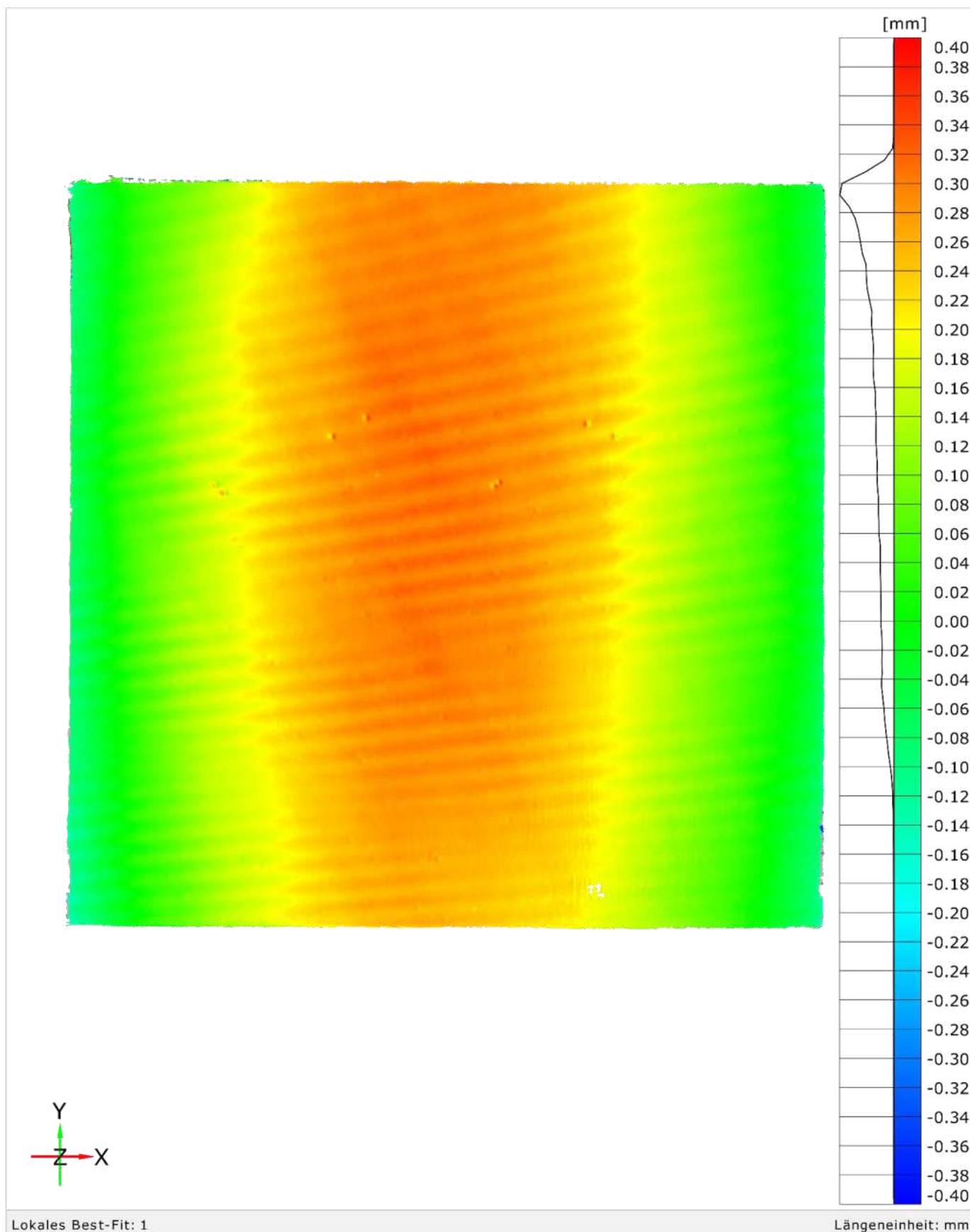
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-04, 09:00



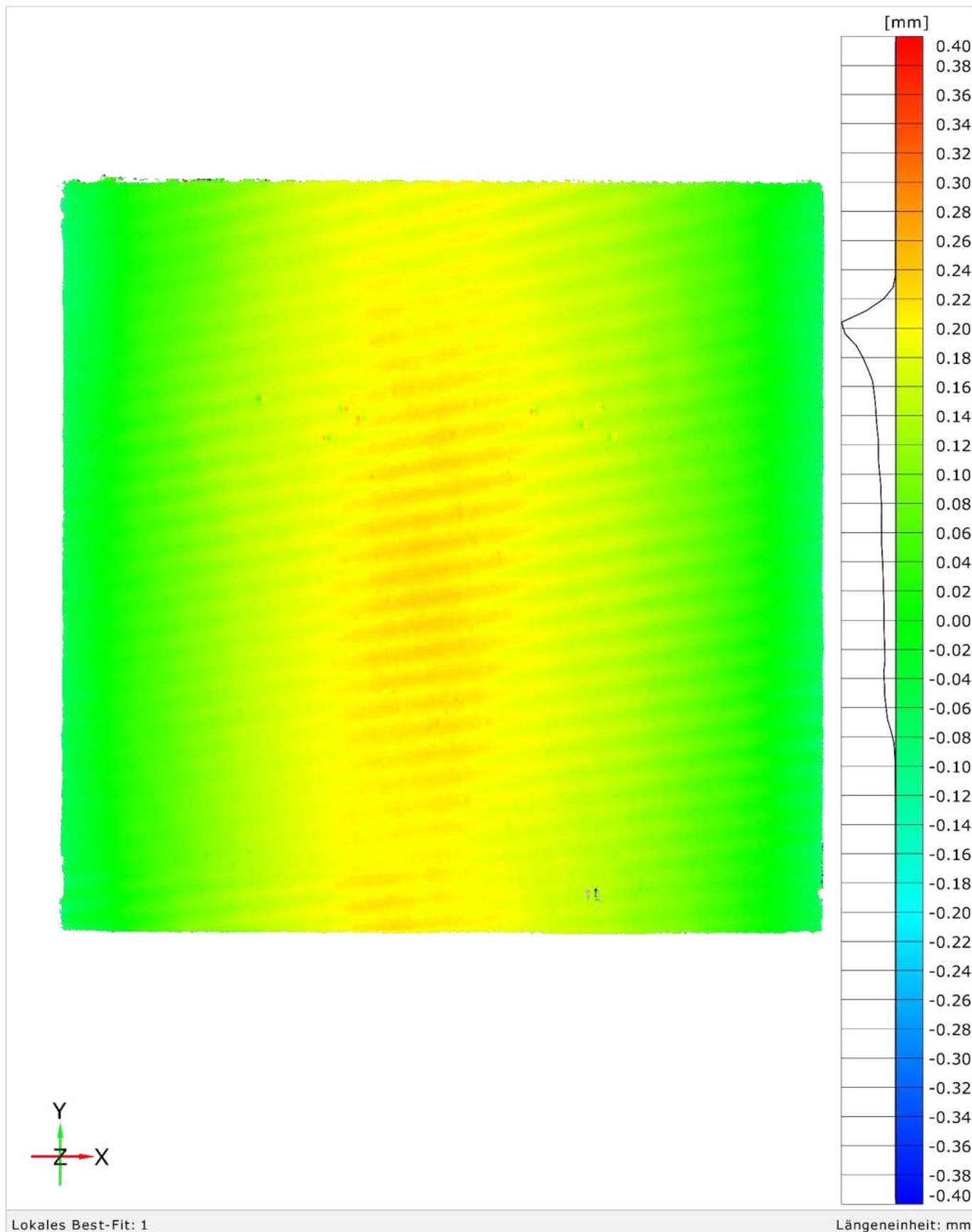
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-04, 09:00 und 2023-07-05, 09:10



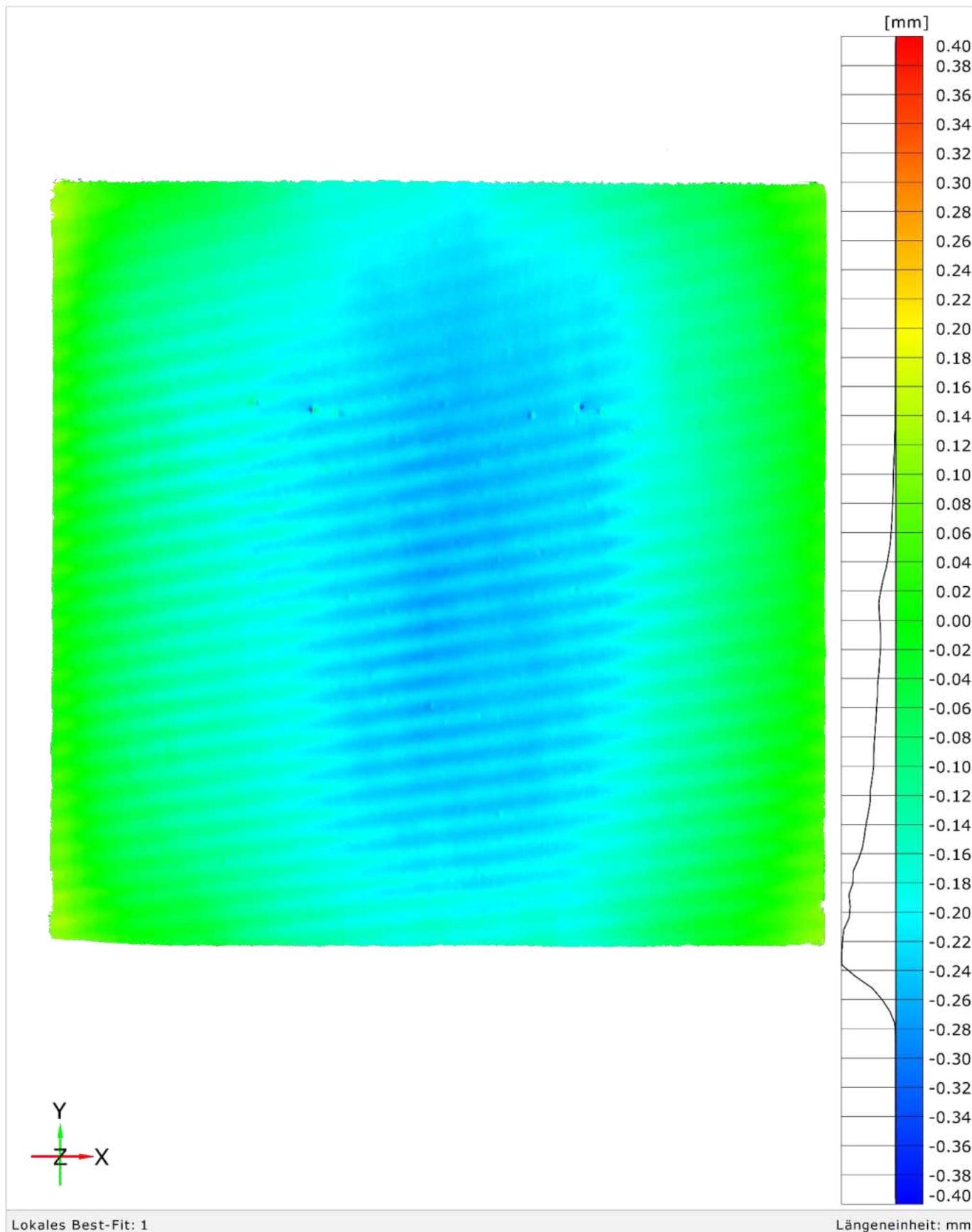
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-05, 09:10 und 2023-07-06, 09:45



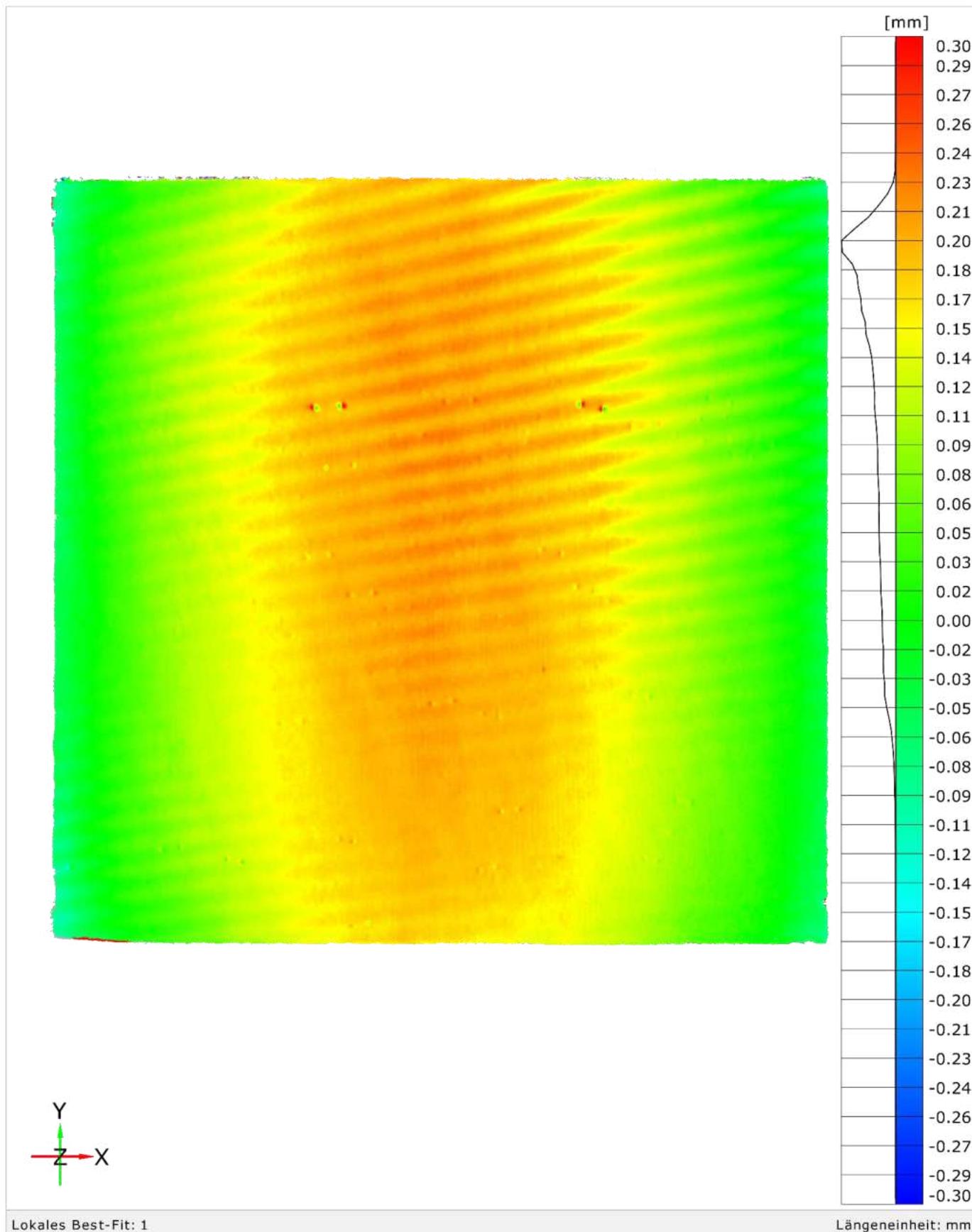
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-06, 09:45 und 2023-07-07, 10:35



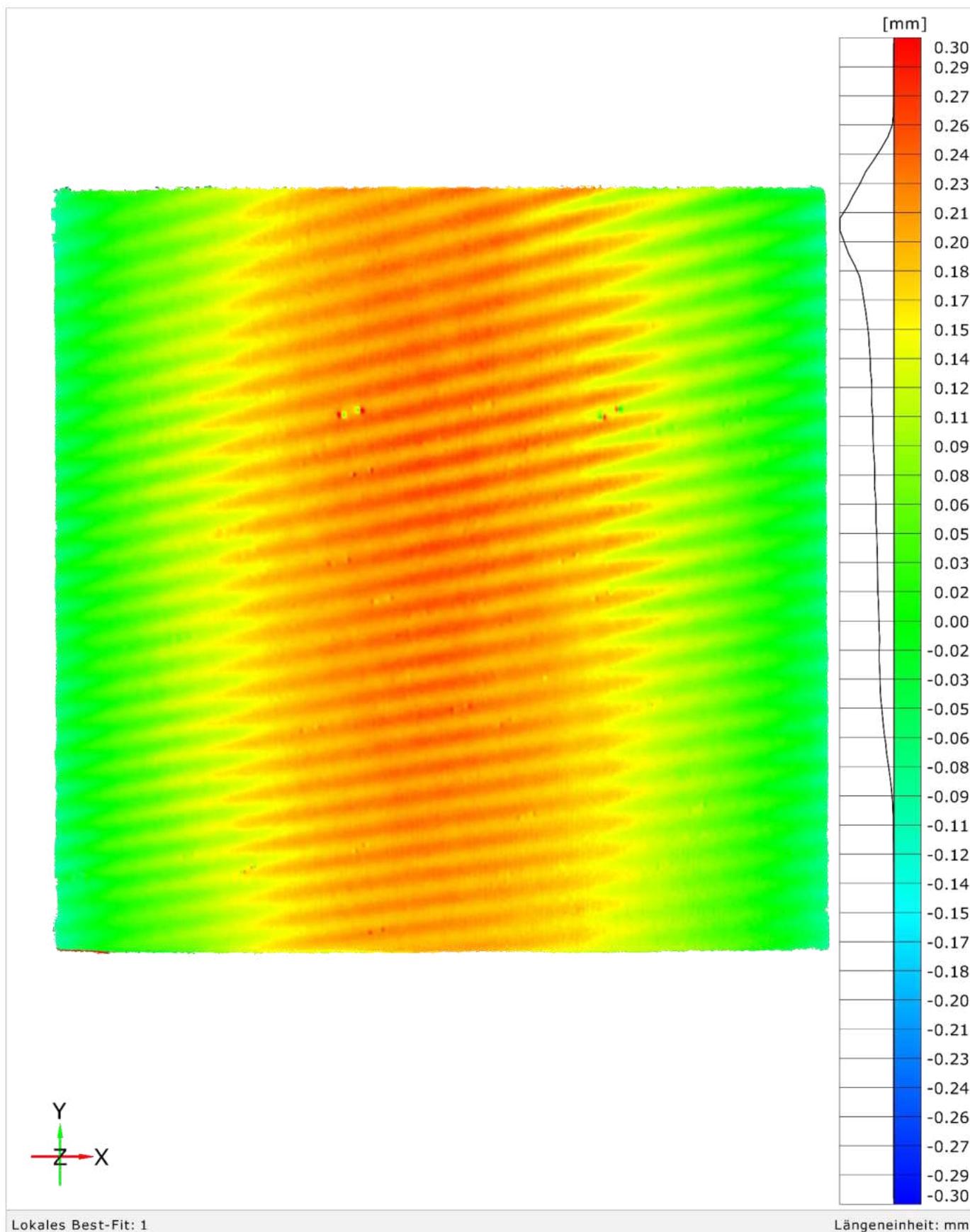
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-07, 10:35 und 2023-07-10, 09:00



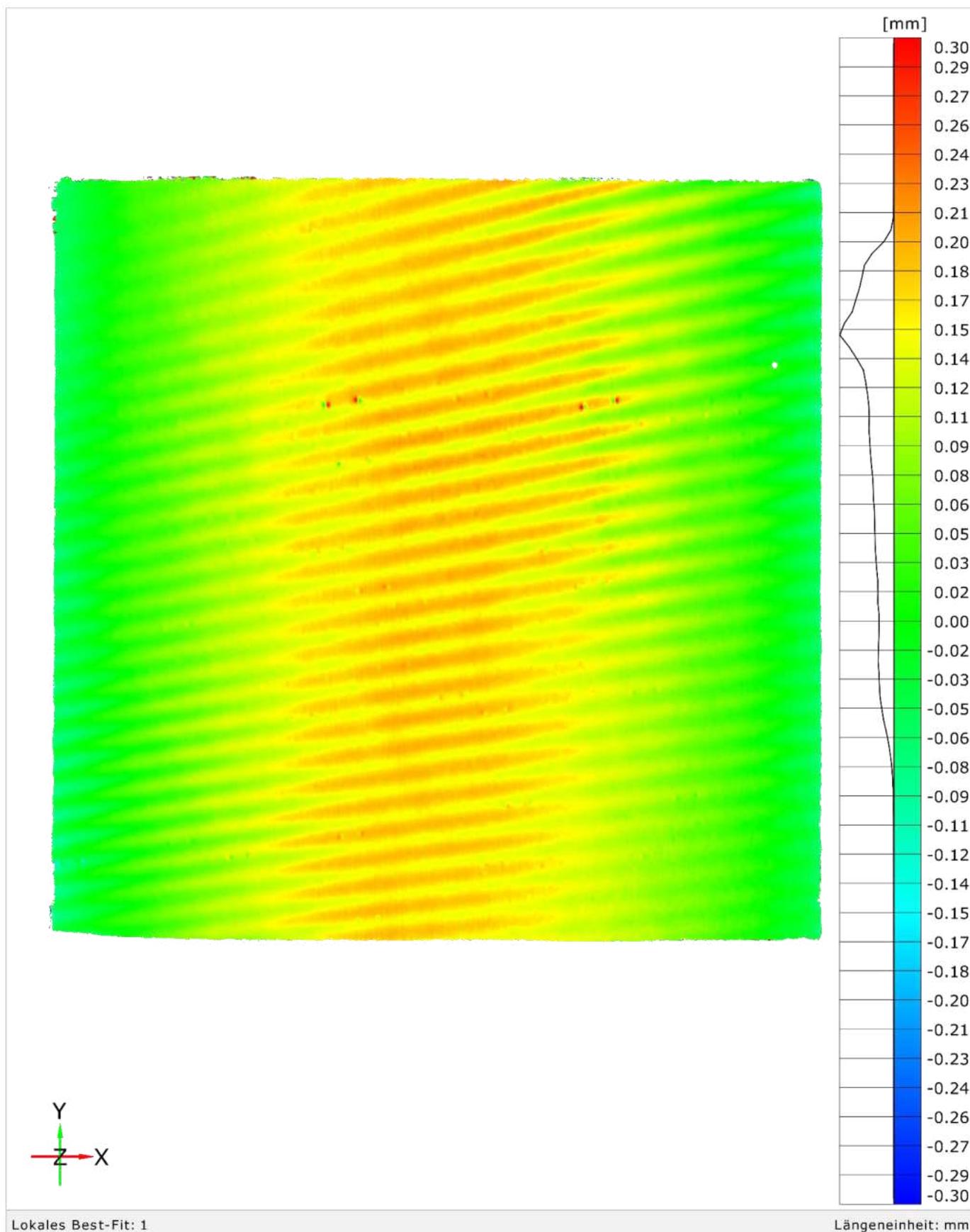
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-10, 10:00 und 2023-07-10, 16:25



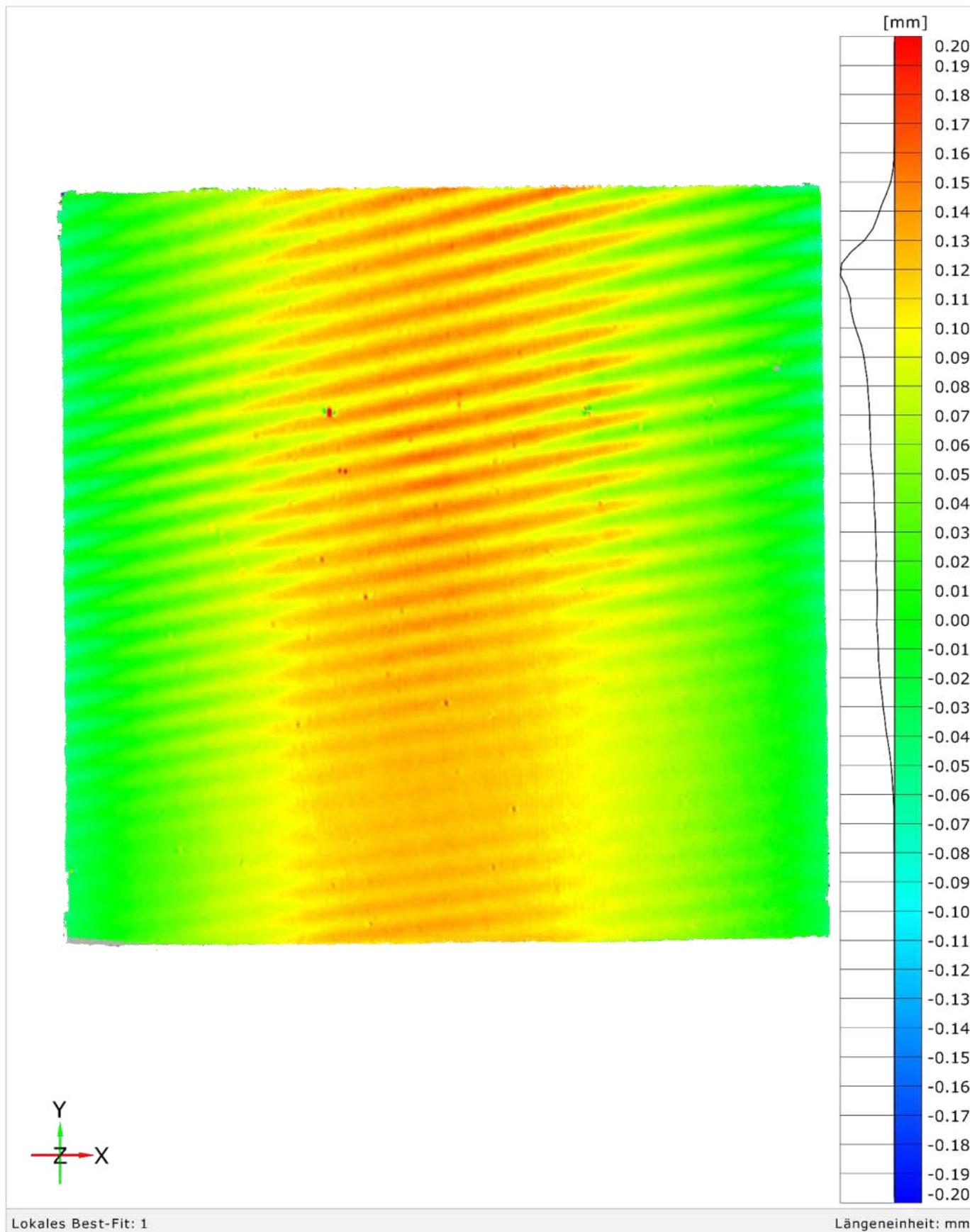
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-10, 16:25 und 2023-07-11, 10:29



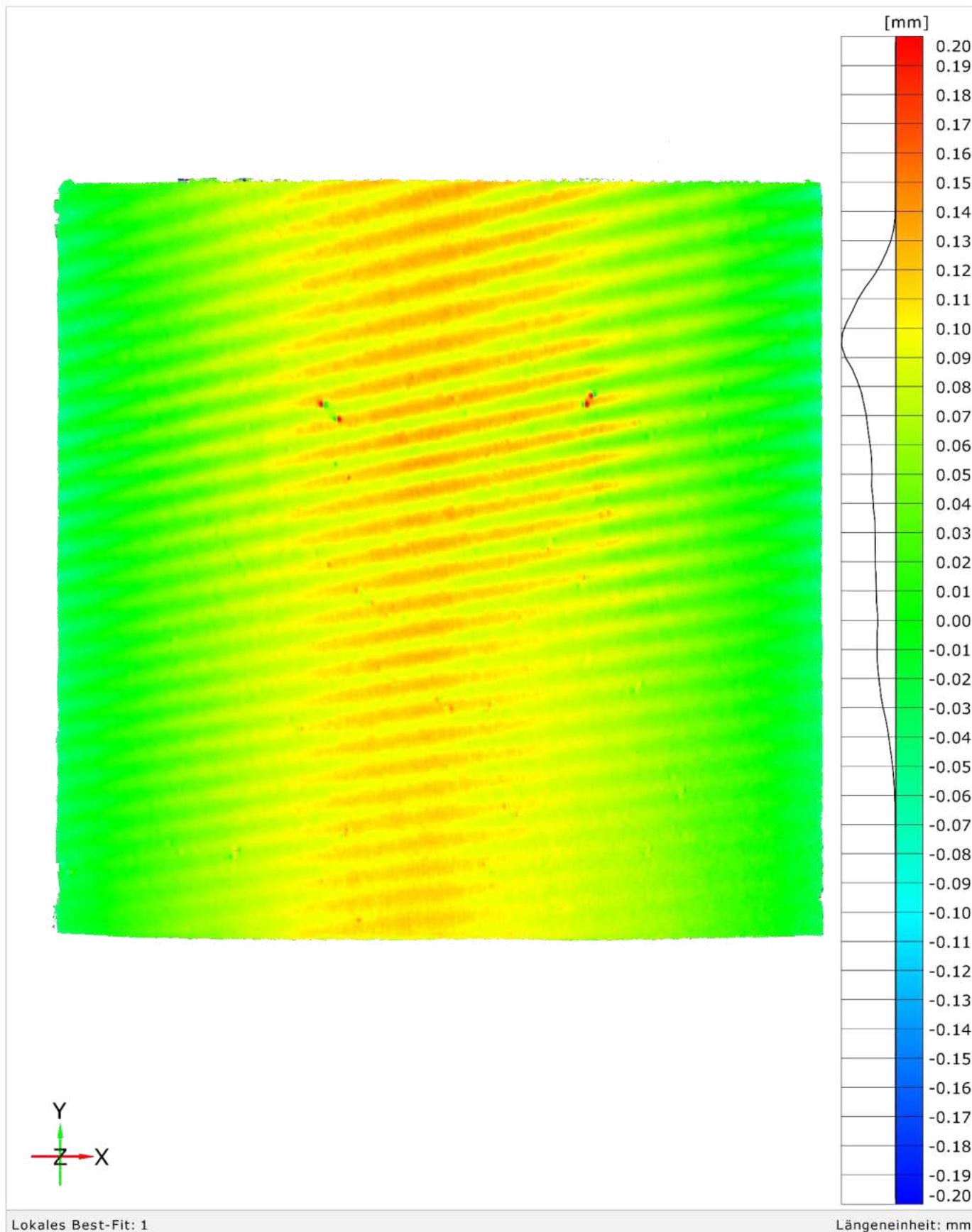
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-11, 10:29 und 2023-07-12, 09:50



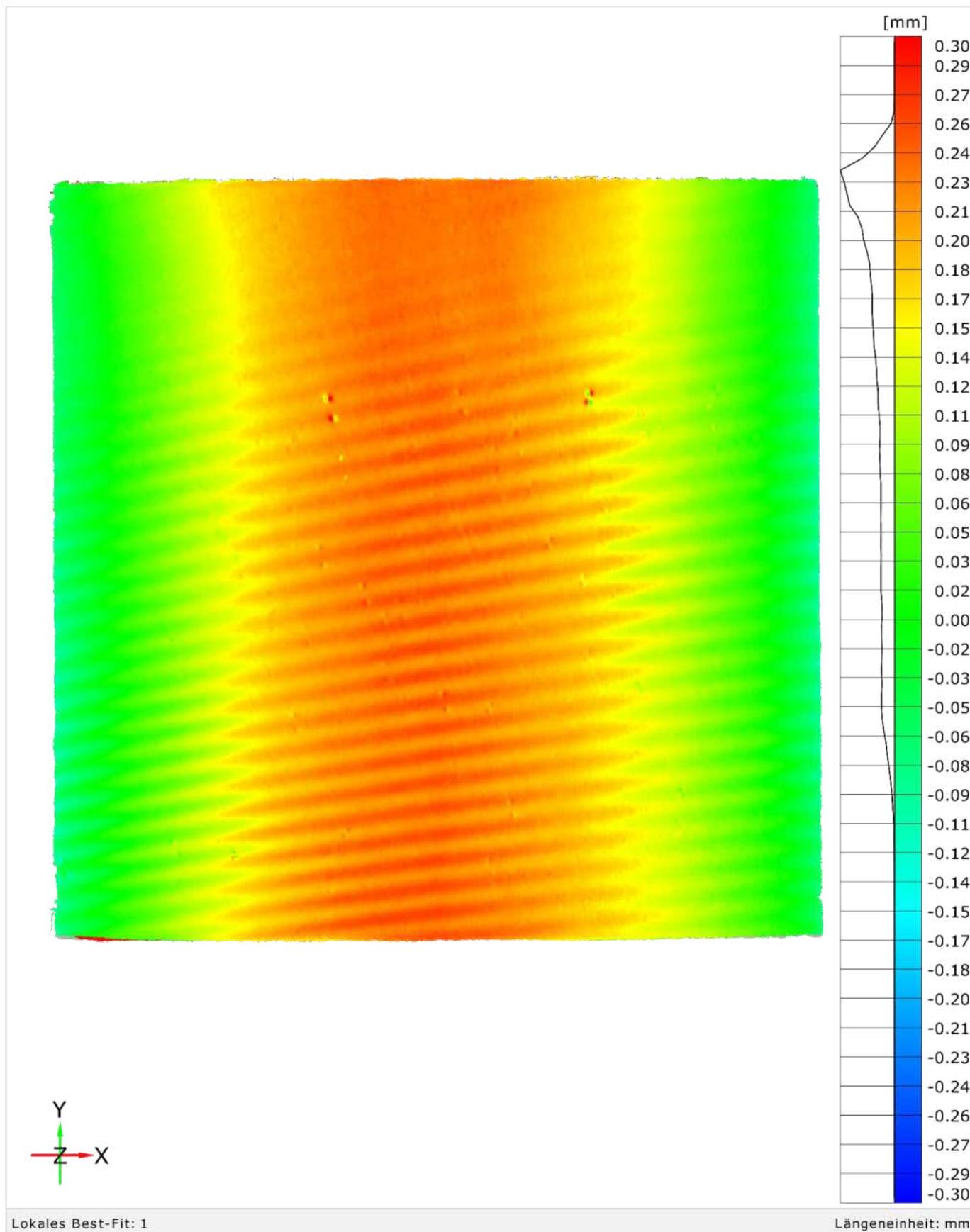
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-12, 09:50 und 2023-07-13, 08:30



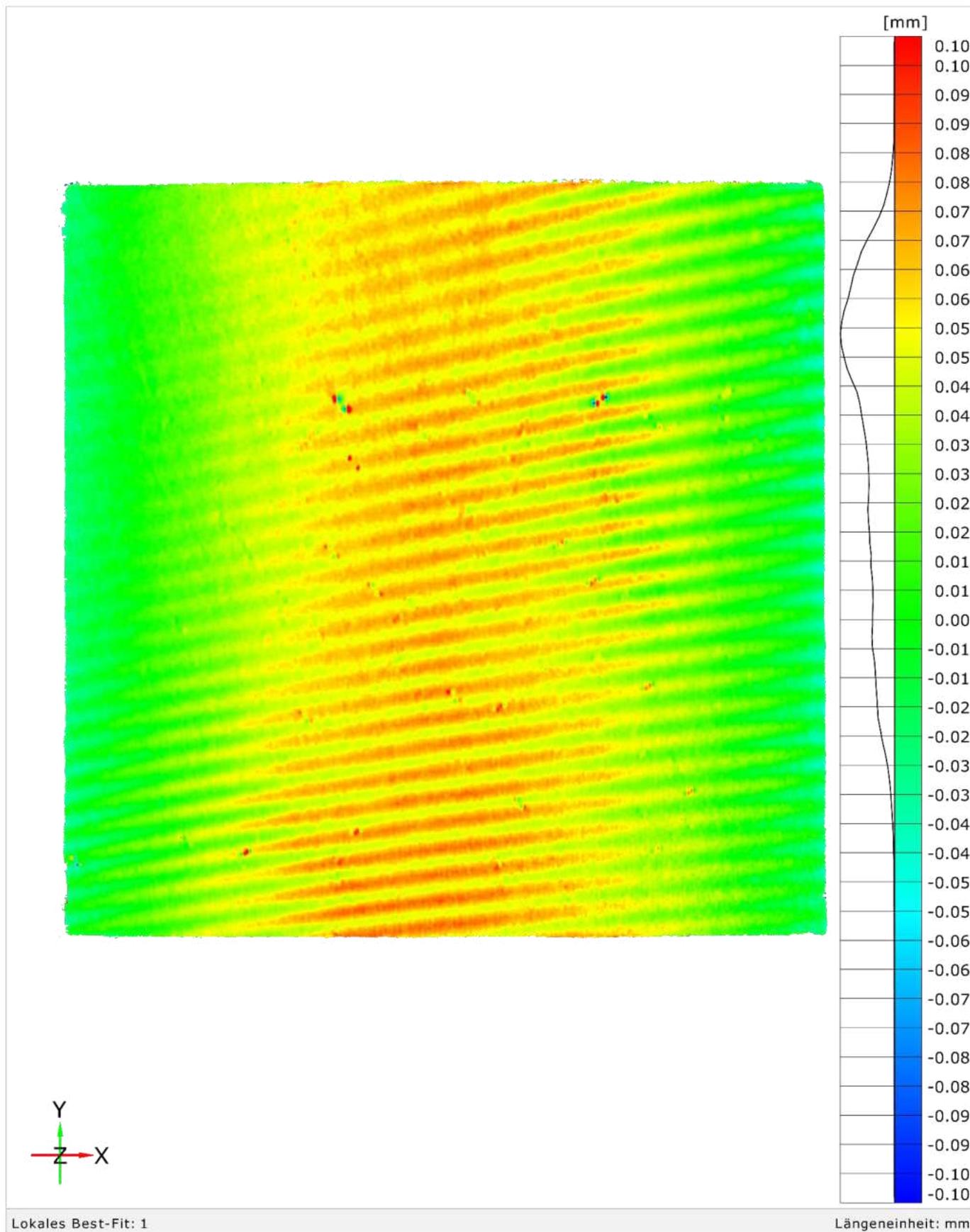
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-13, 08:30 und 2023-07-14, 09:50



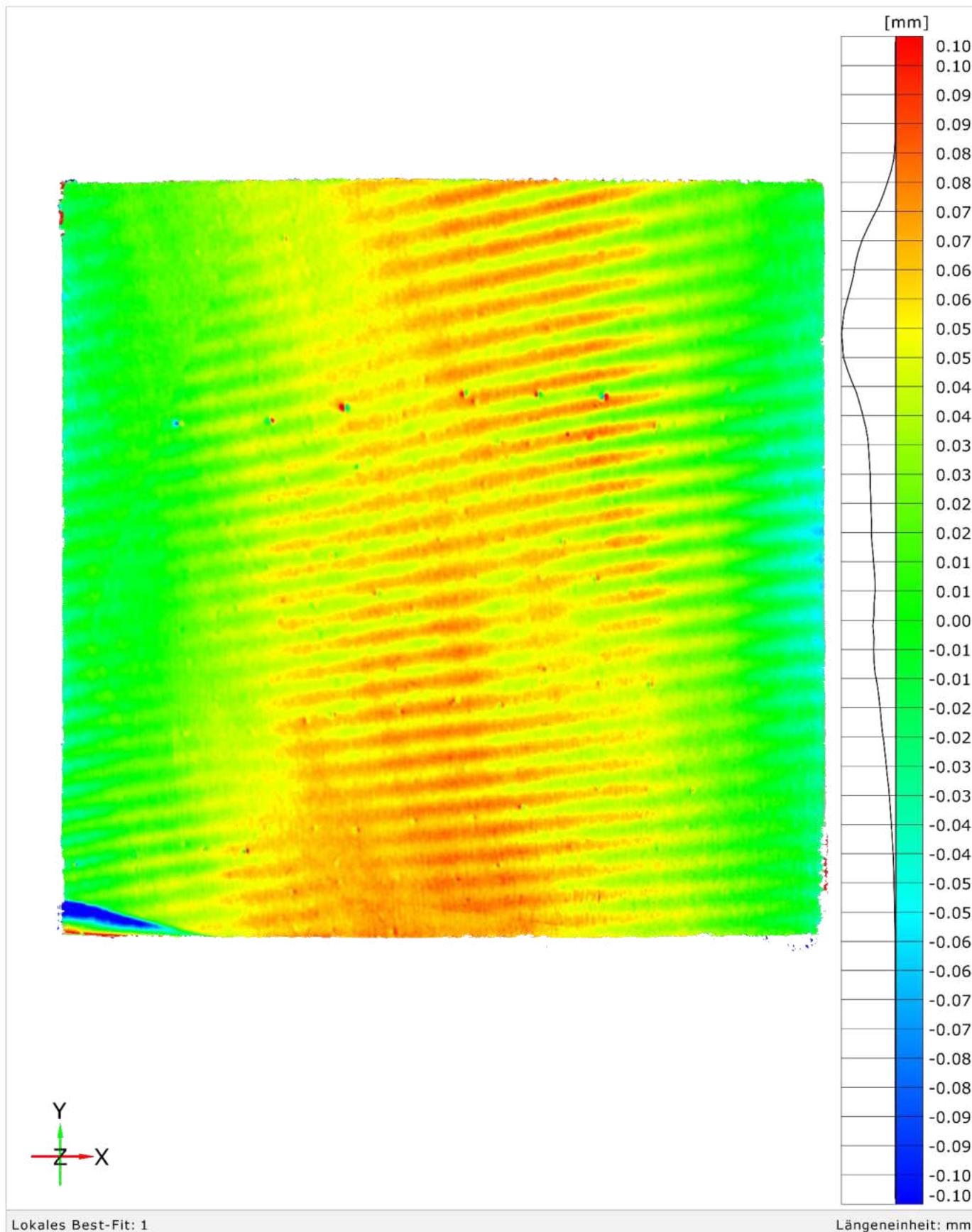
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-14, 09:50 und 2023-07-17, 11:10



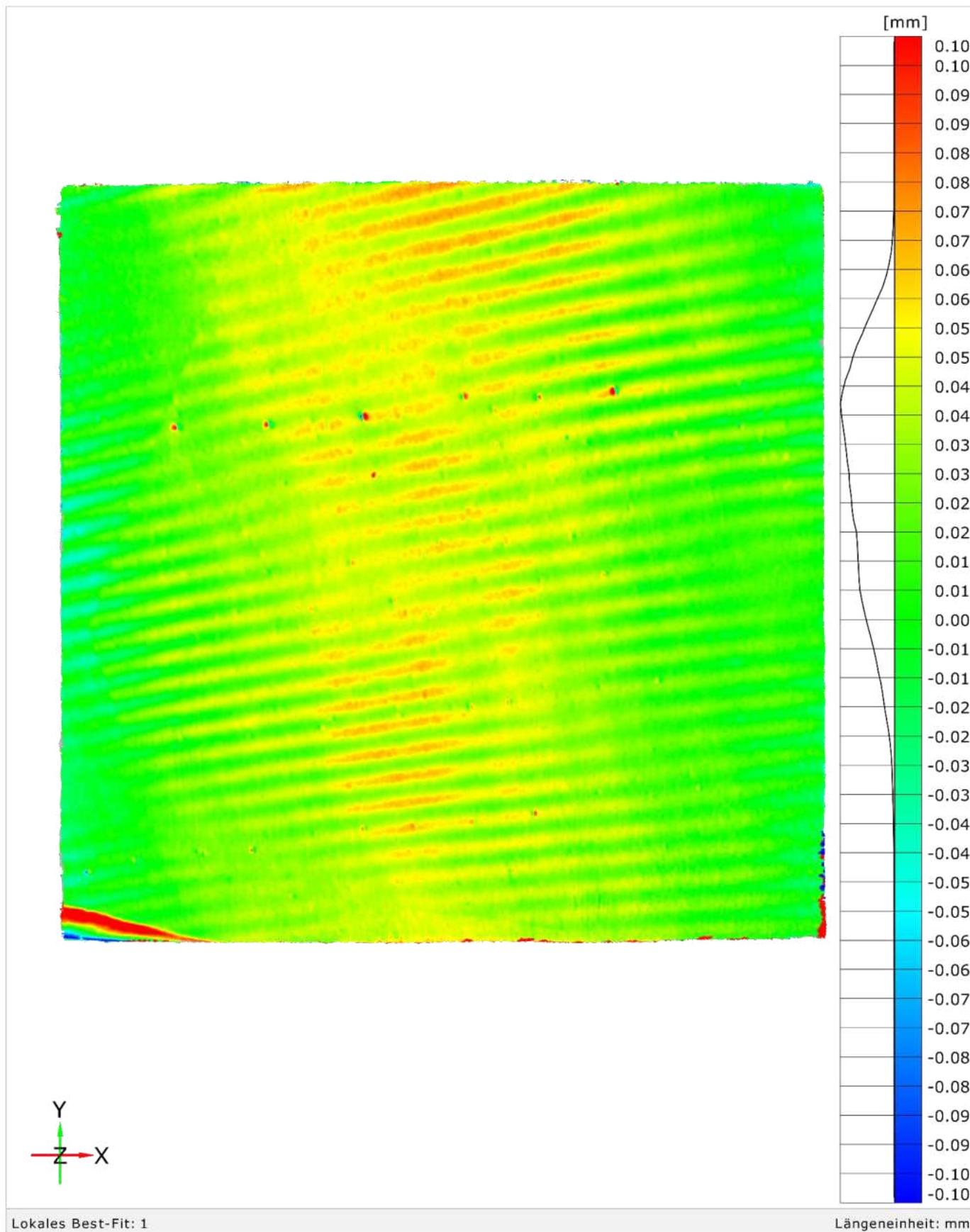
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-17, 11:10 und 2023-07-18, 10:40



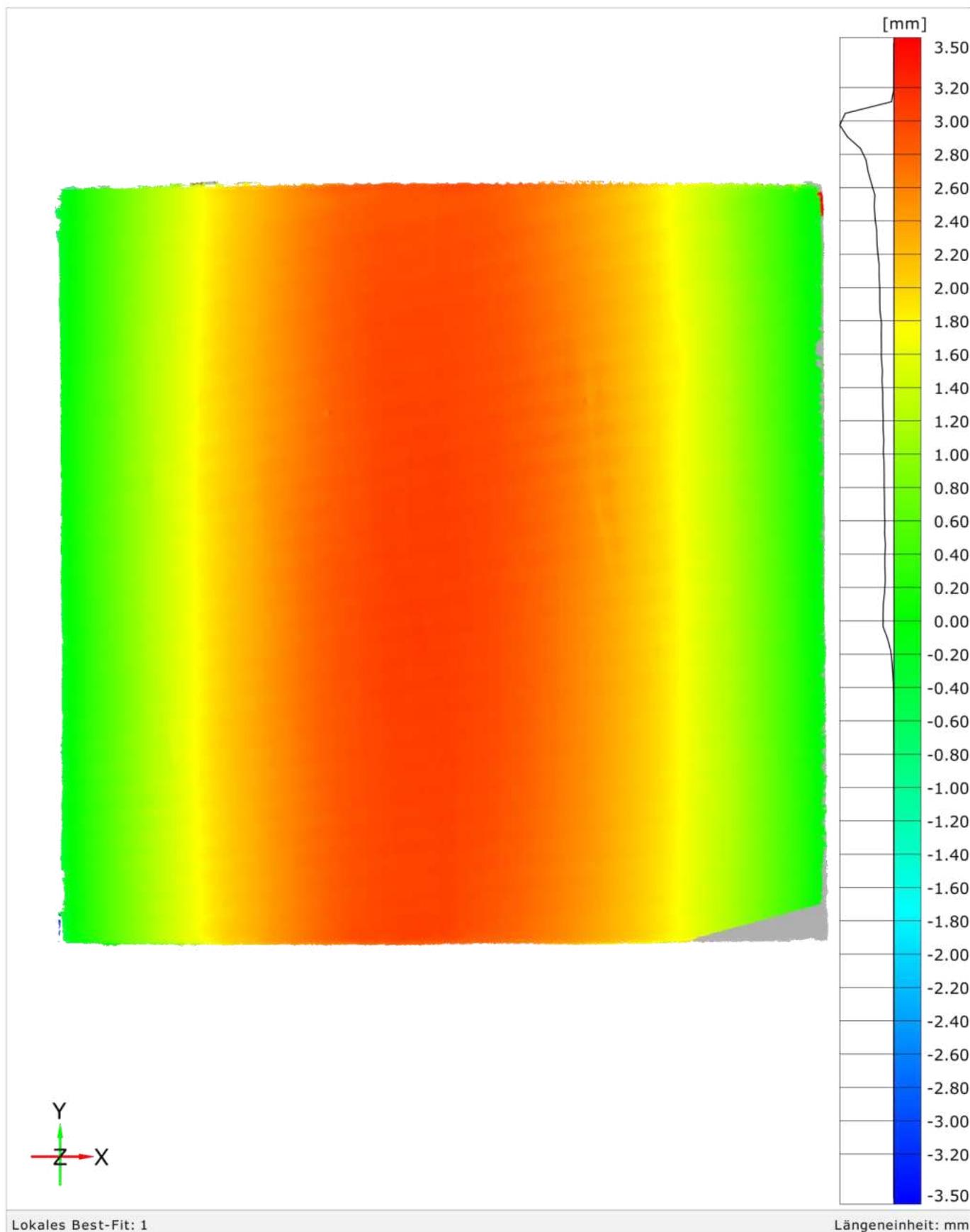
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-18, 10:40 und 2023-07-19, 10:04



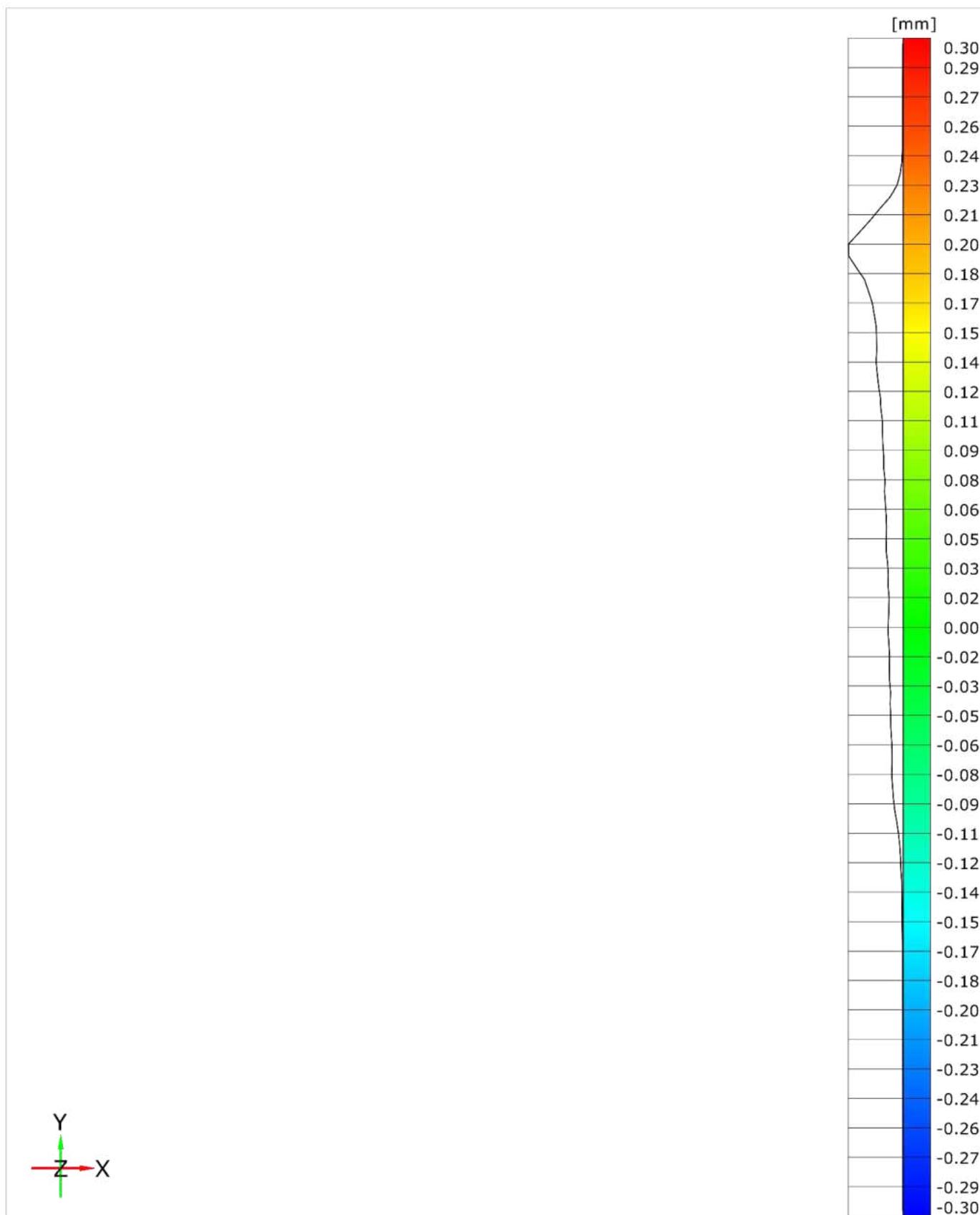
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-19, 10:04 und 2023-07-20, 12:00



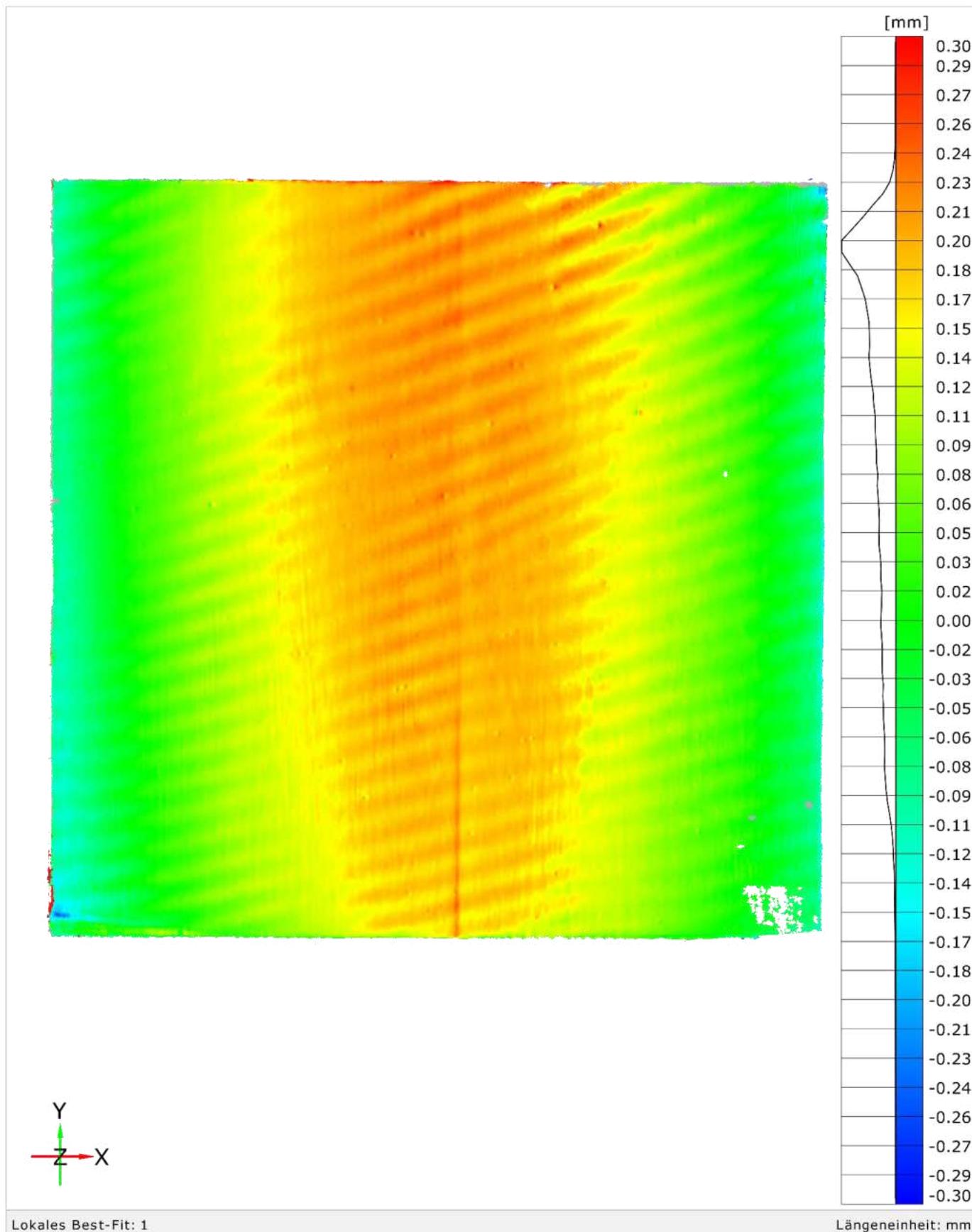
Klimakammertest | S-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-21, 10:14



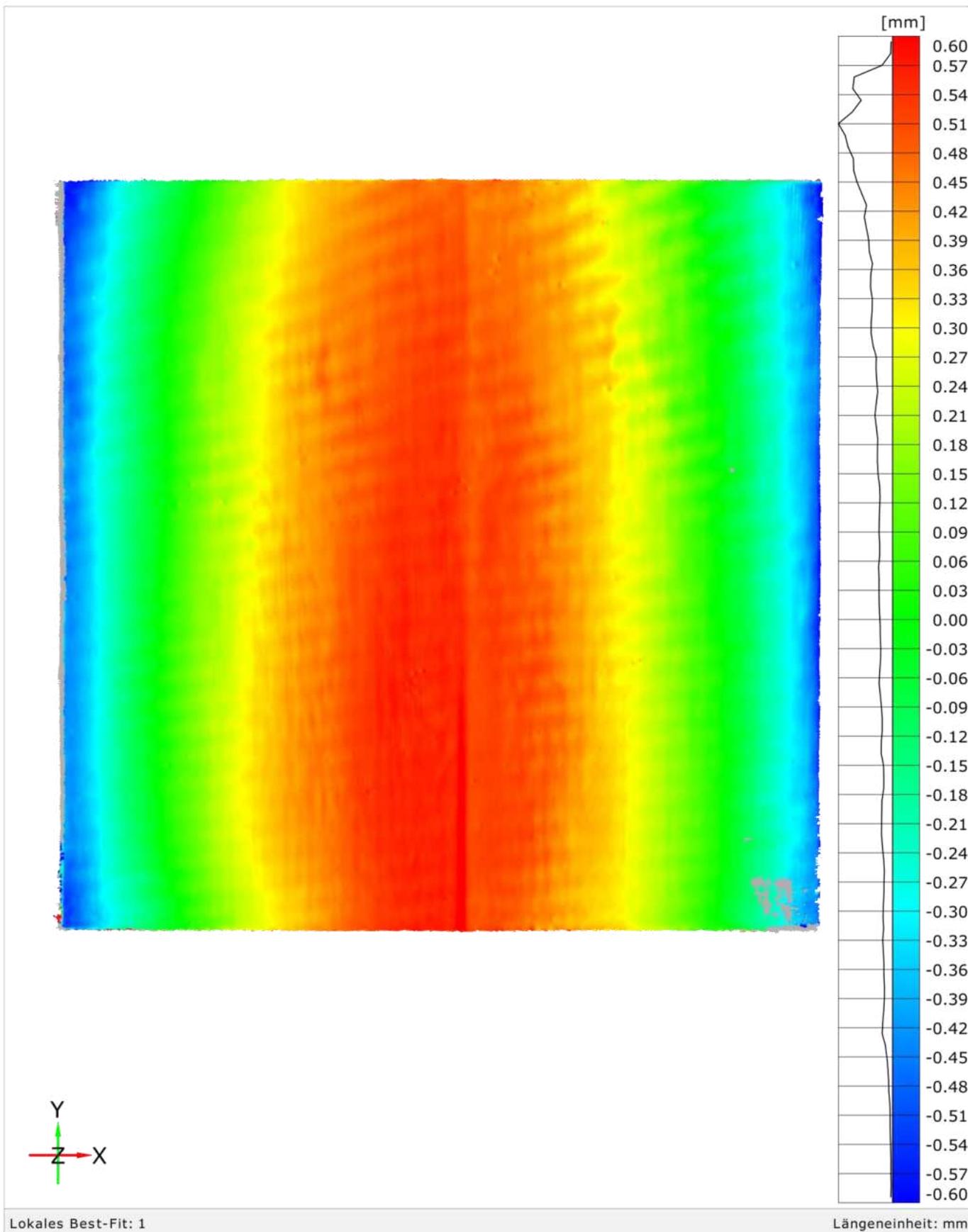
Klimakammertest | V-M-3 |



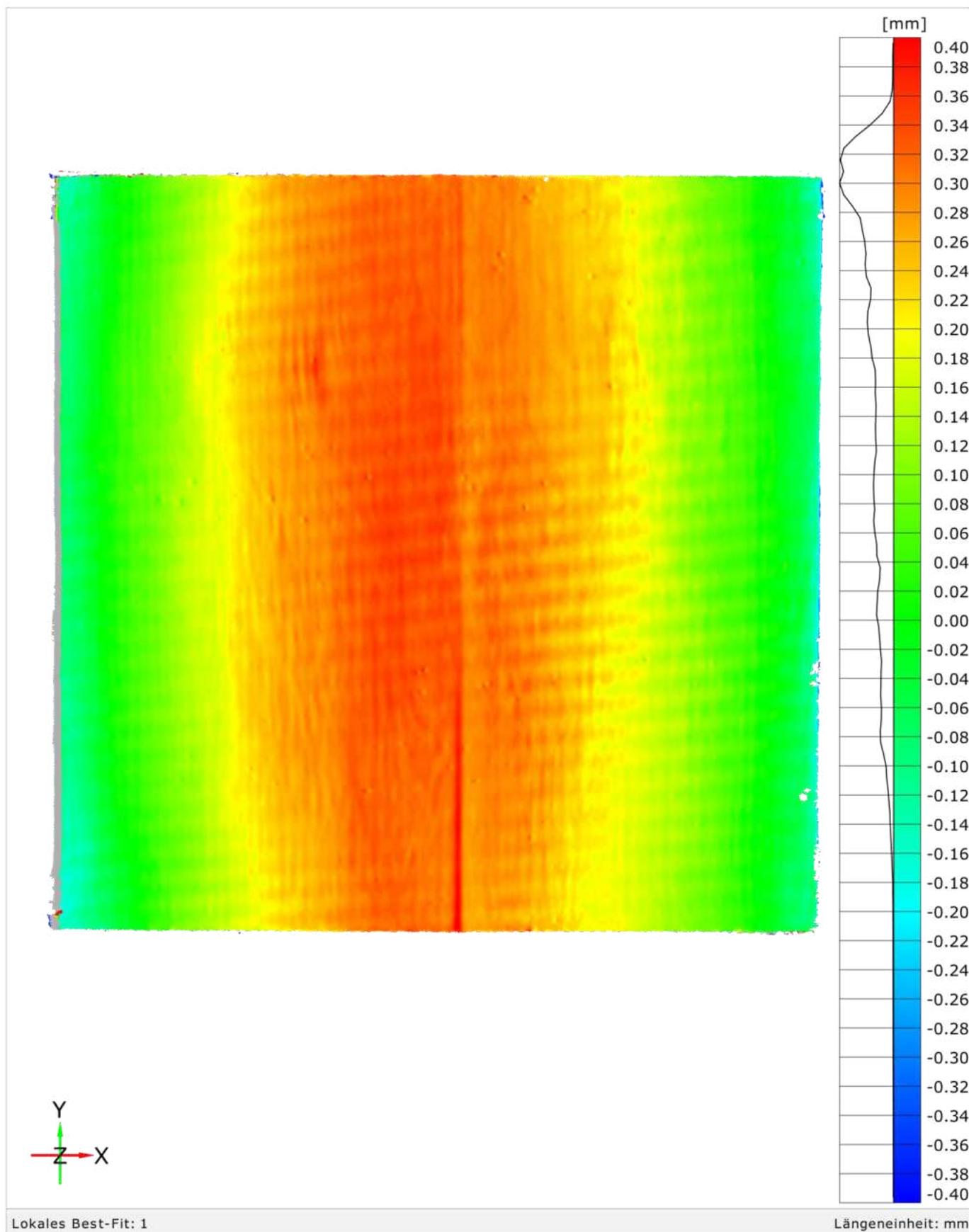
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-04, 09:00



Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-04, 09:00 und 2023-07-05, 09:10



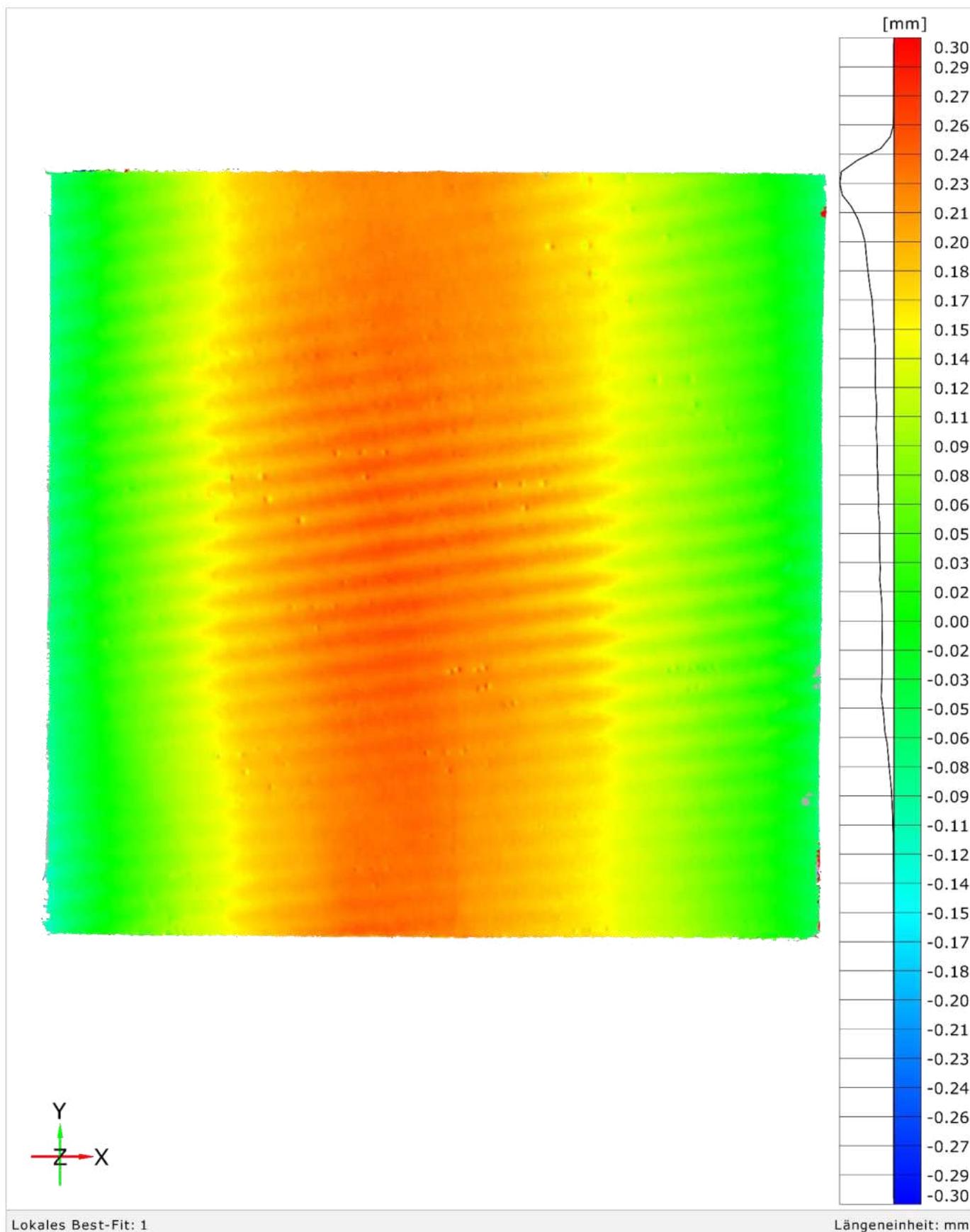
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-05, 09:10 und 2023-07-06, 09:45



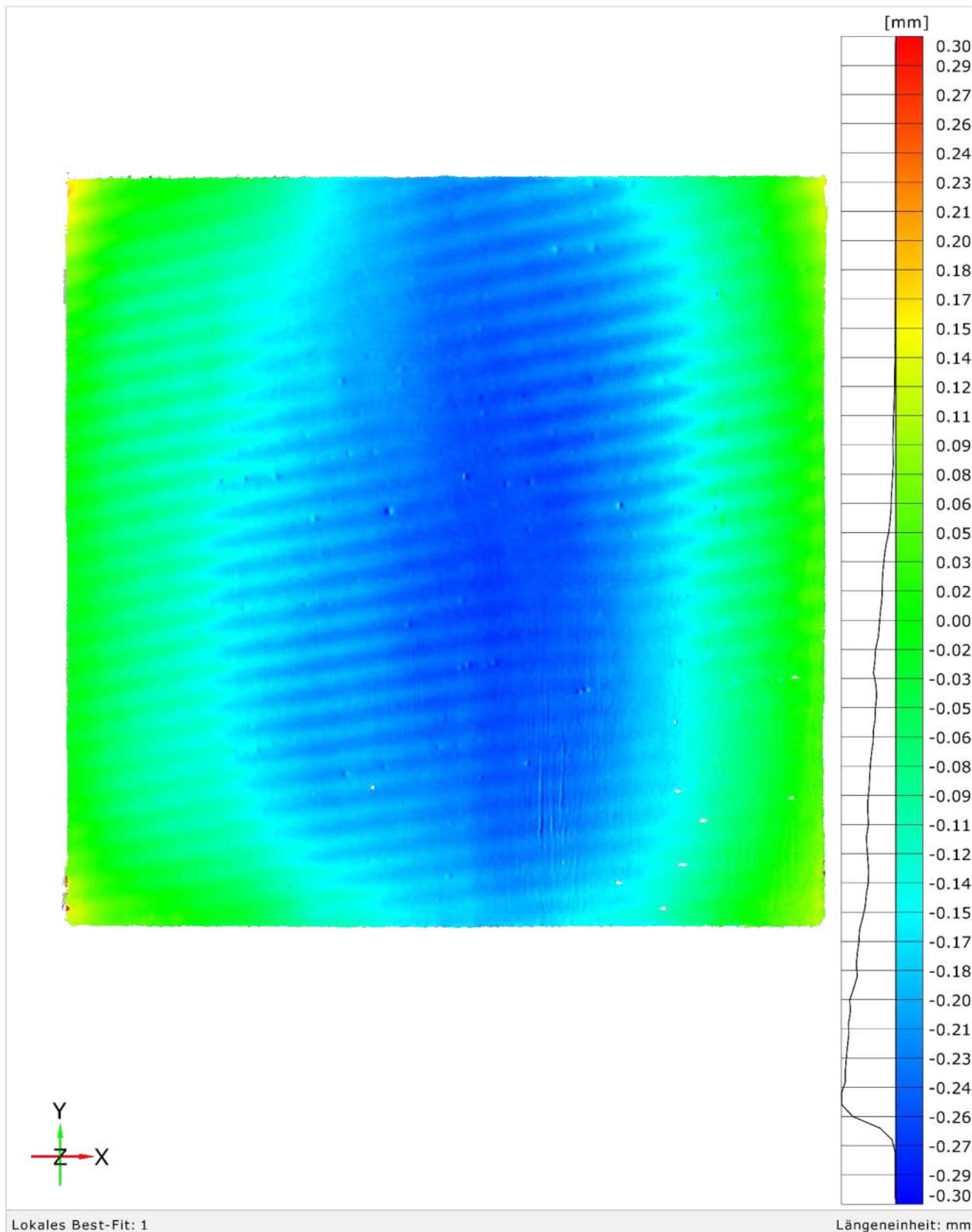
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

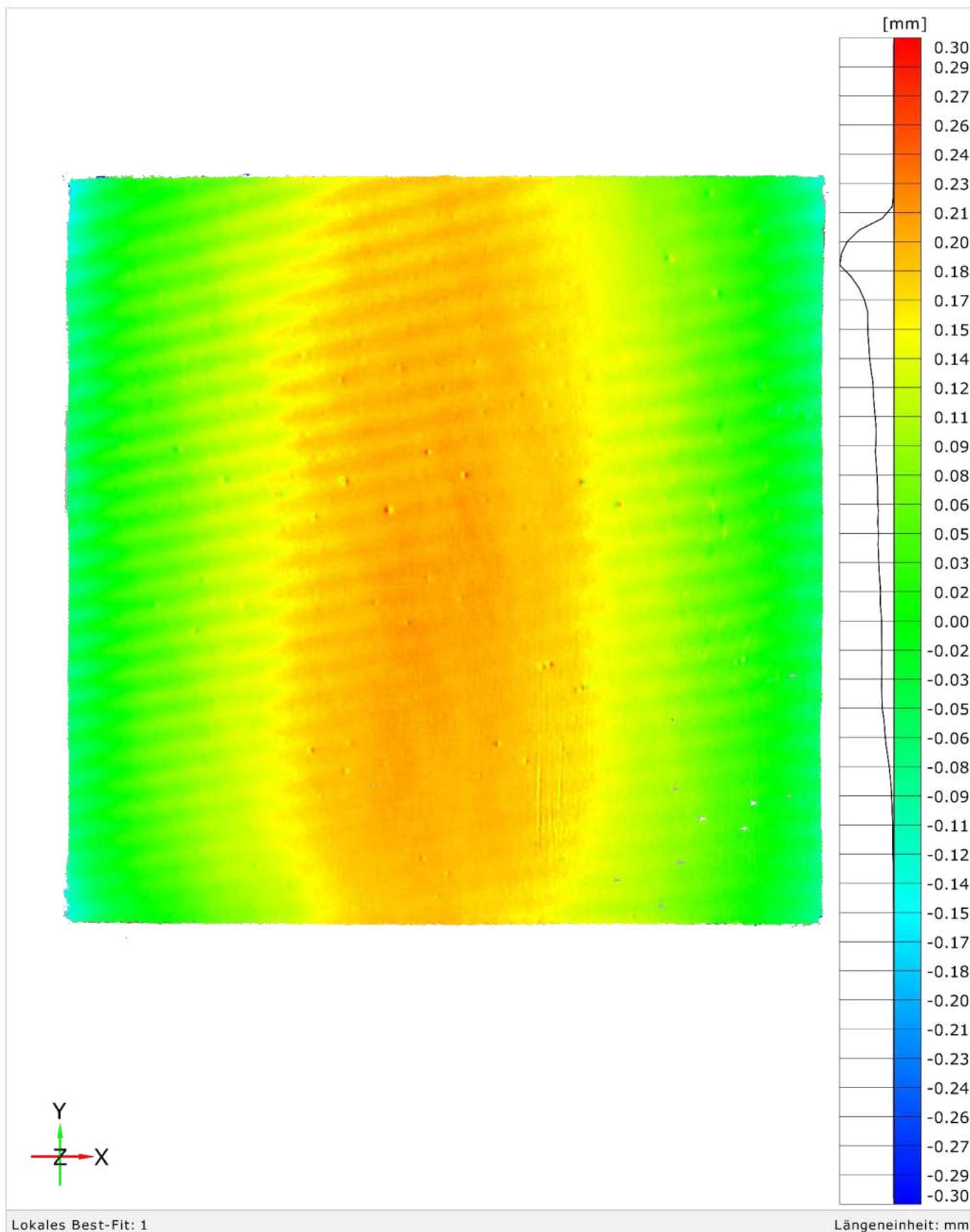
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-06, 09:45 und 2023-07-07, 10:35



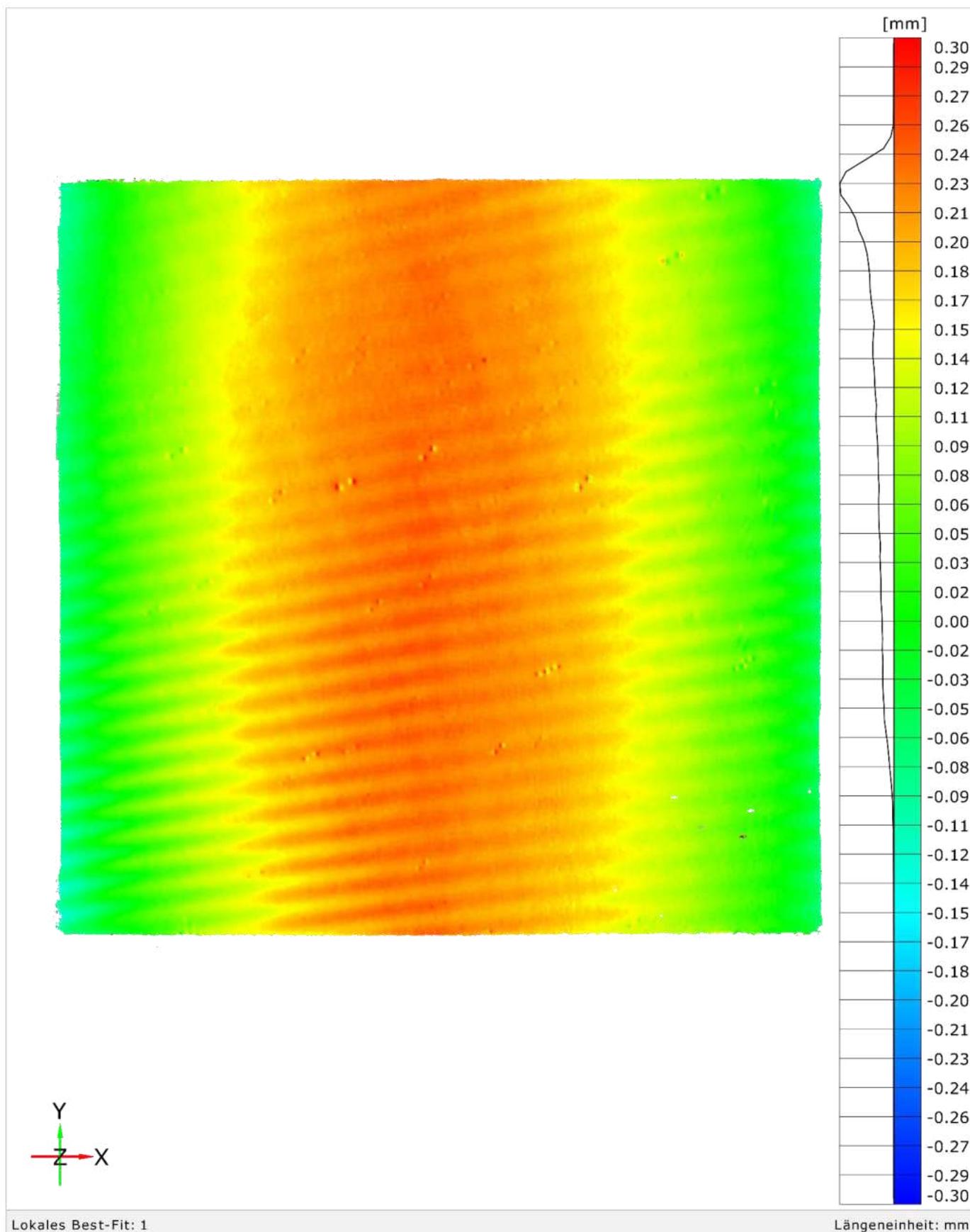
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-07, 10:35 und 2023-07-10, 10:00



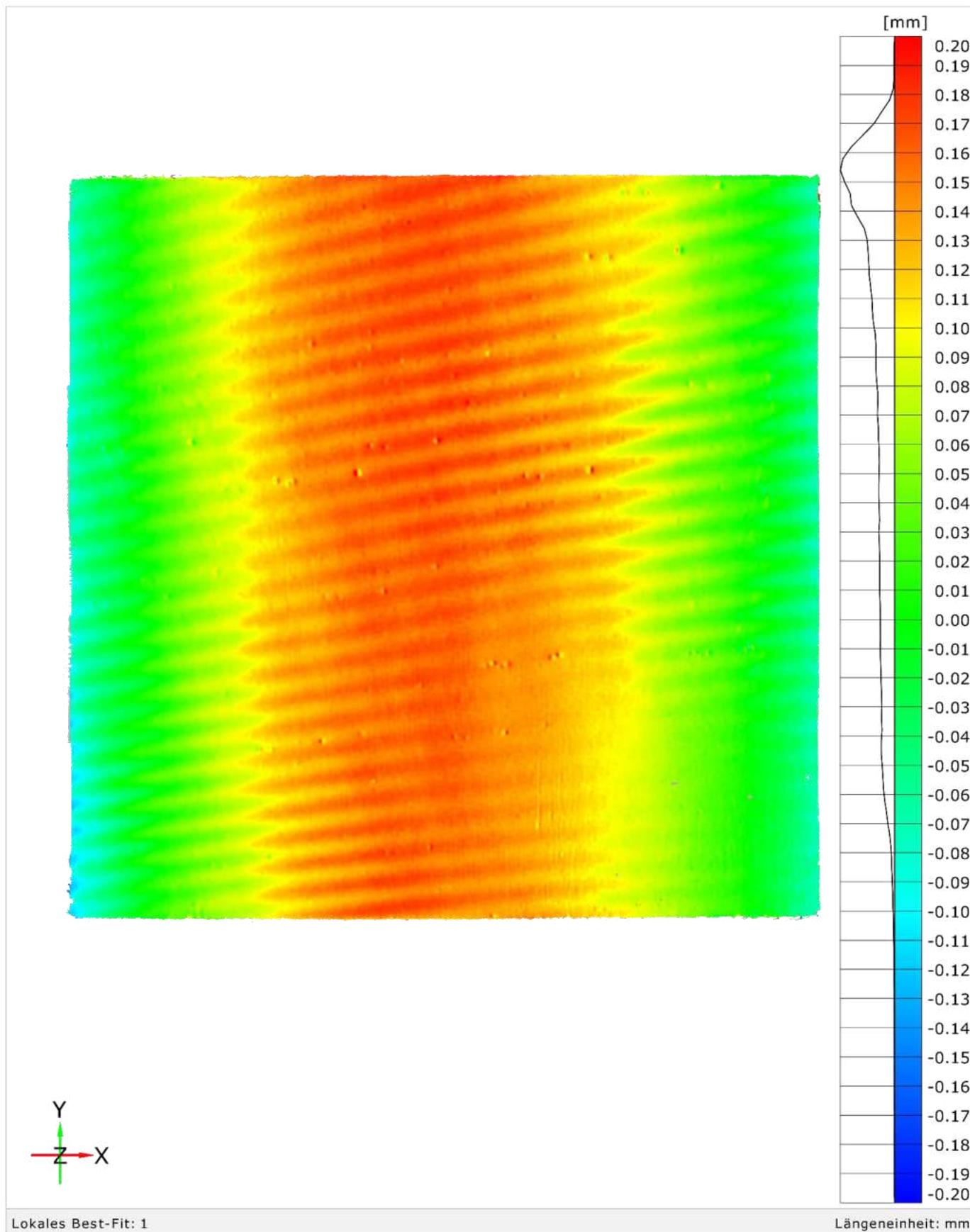
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-10, 10:00 und 2023-07-10, 16:25



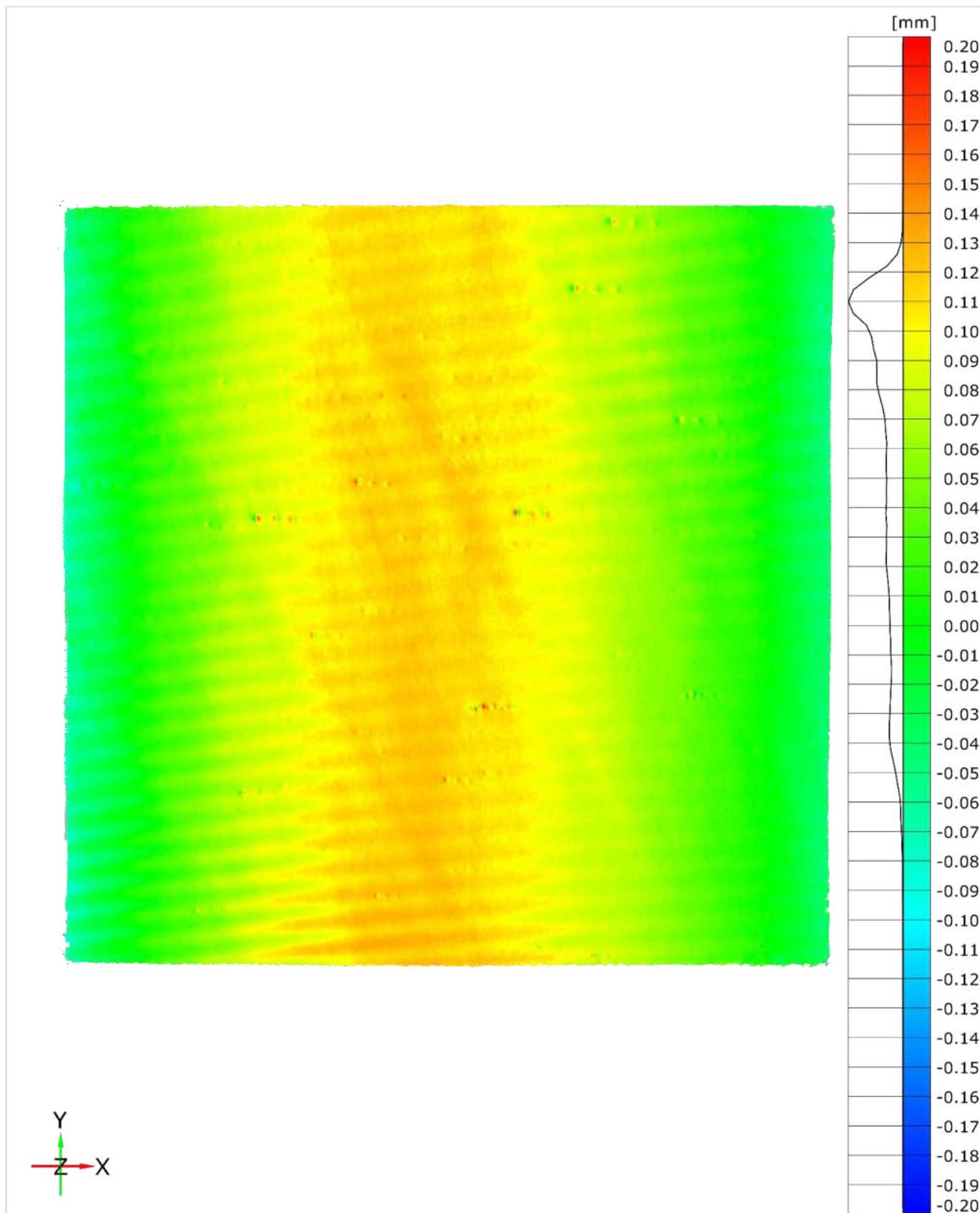
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-10, 16:25 und 2023-07-11, 10:29



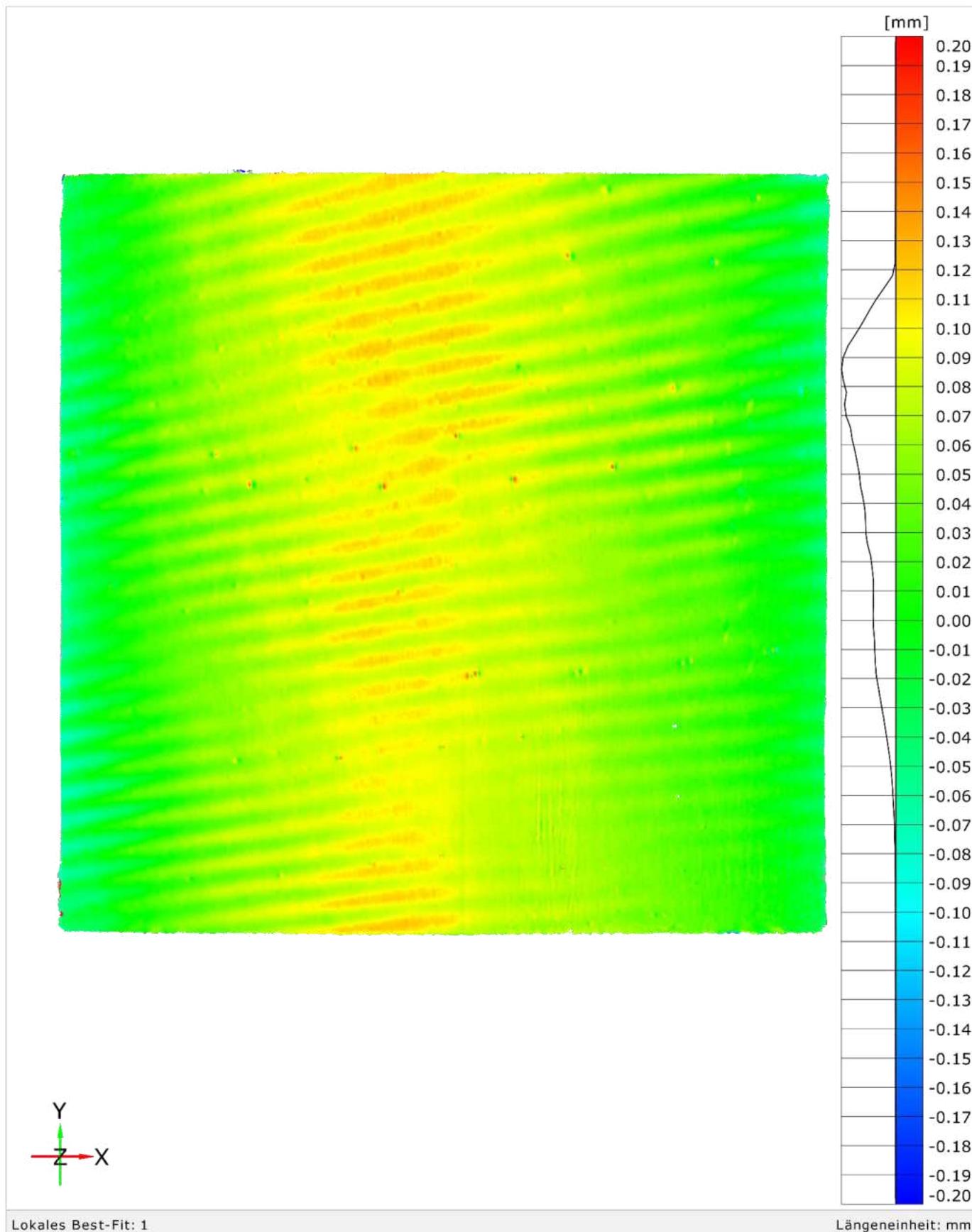
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-11, 10:29 und 2023-07-12, 09:50



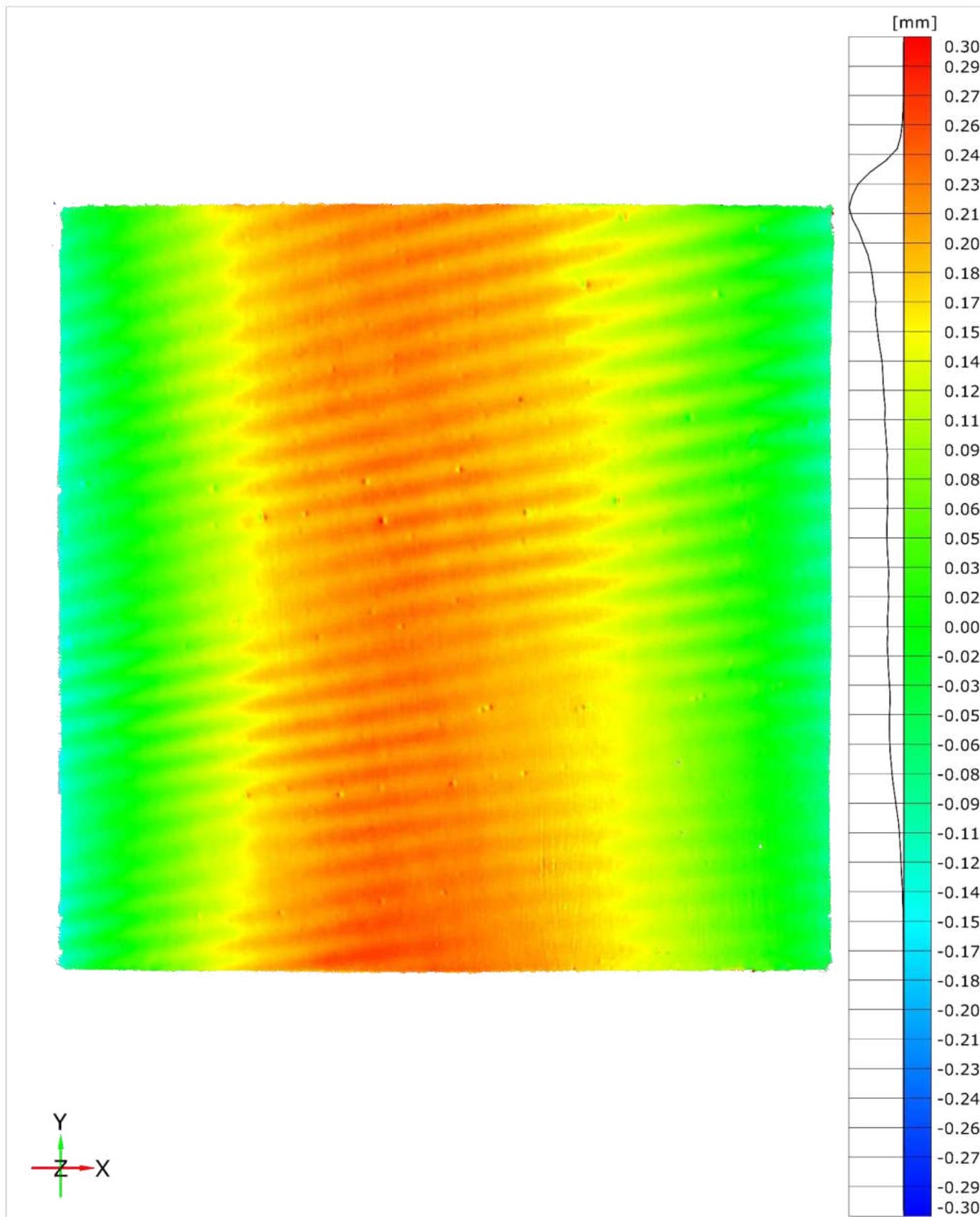
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-12, 09:50 und 2023-07-13, 08:30



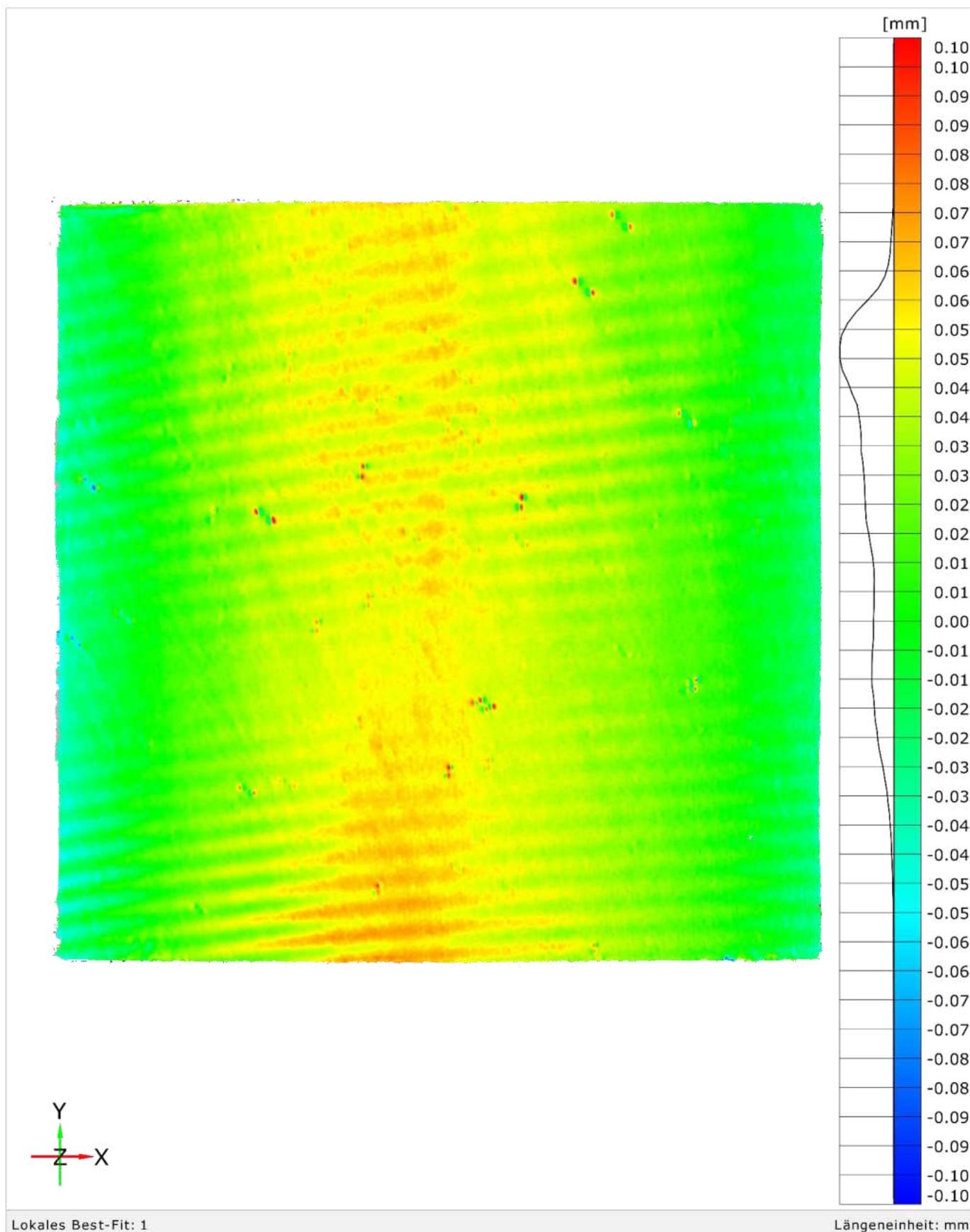
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-13, 08:30 und 2023-07-14, 09:50



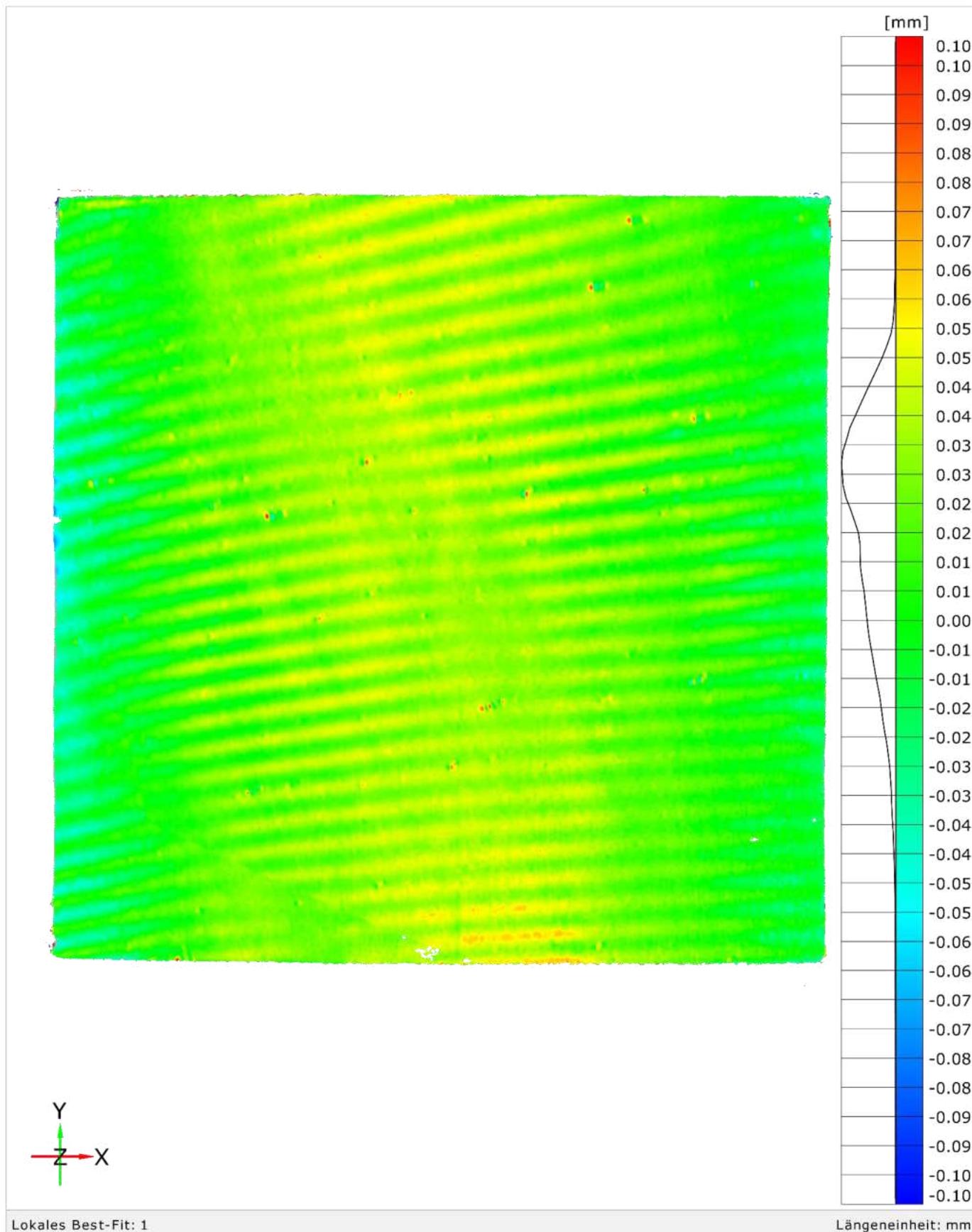
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-14, 09:50 und 2023-07-17, 11:10



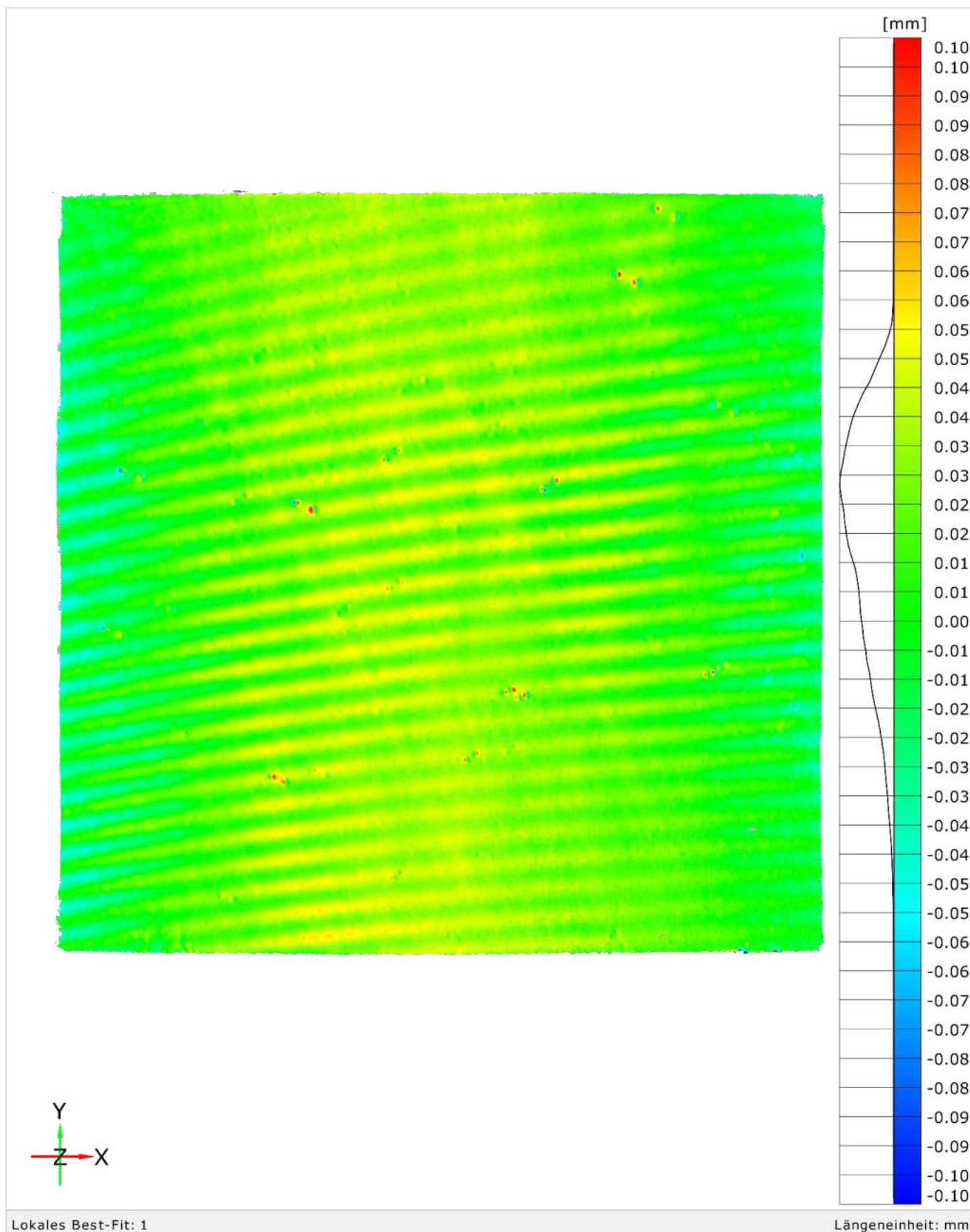
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-17, 11:10 und 2023-07-18, 10:40



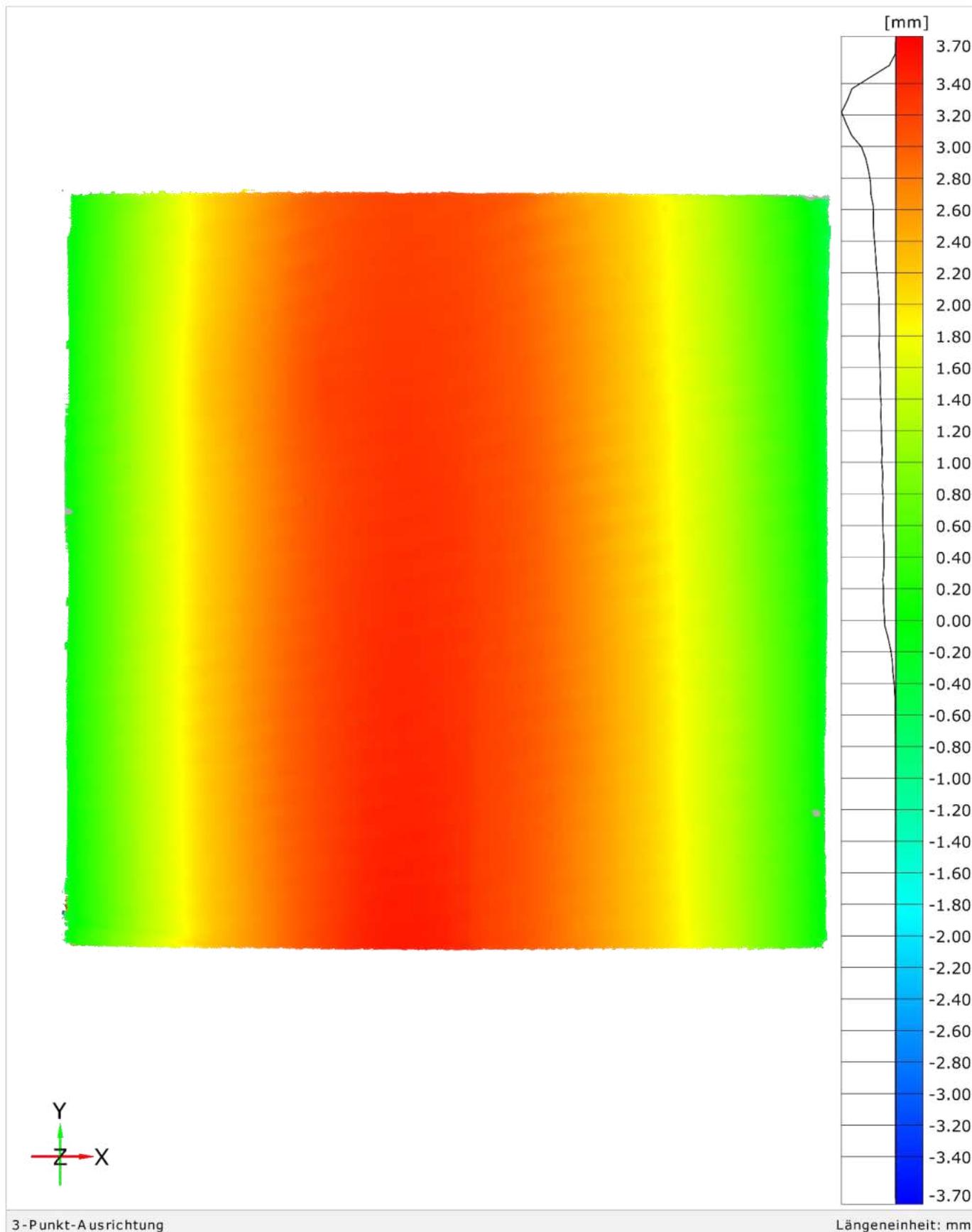
Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-18, 10:40 und 2023-07-19, 10:04



Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-20, 12:00 und 2023-07-21, 10:14

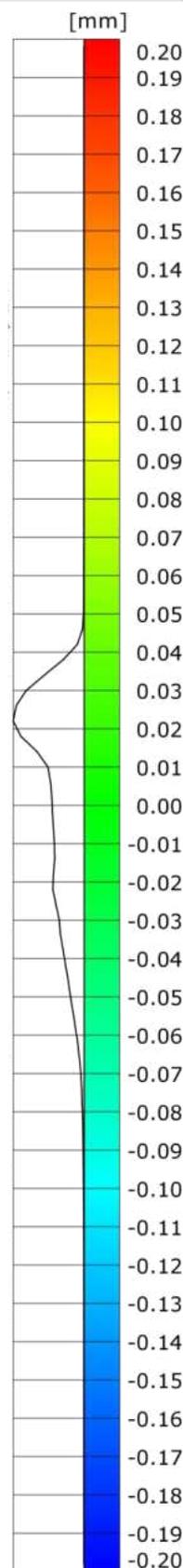
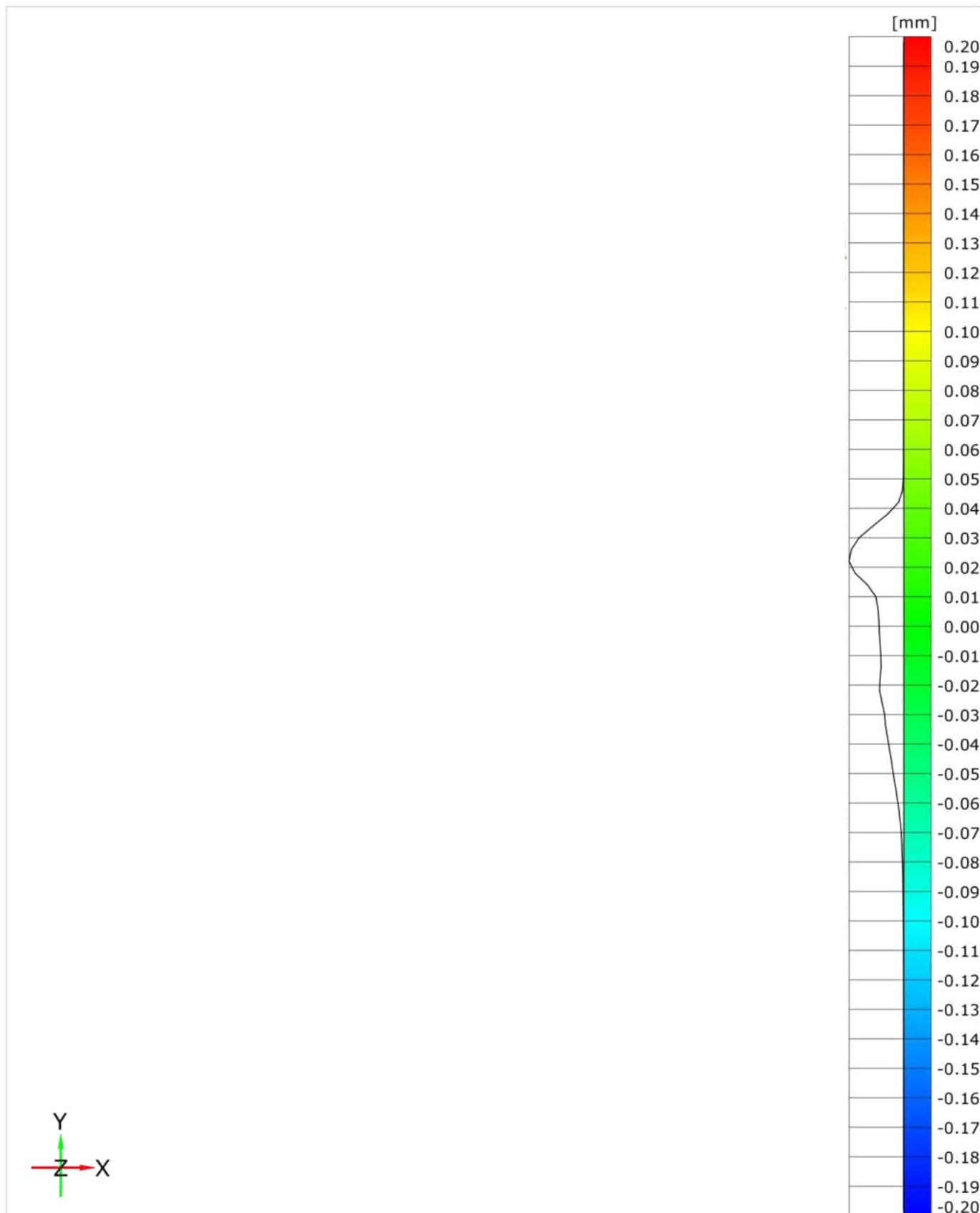


Klimakammertest | V-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-21, 10:14

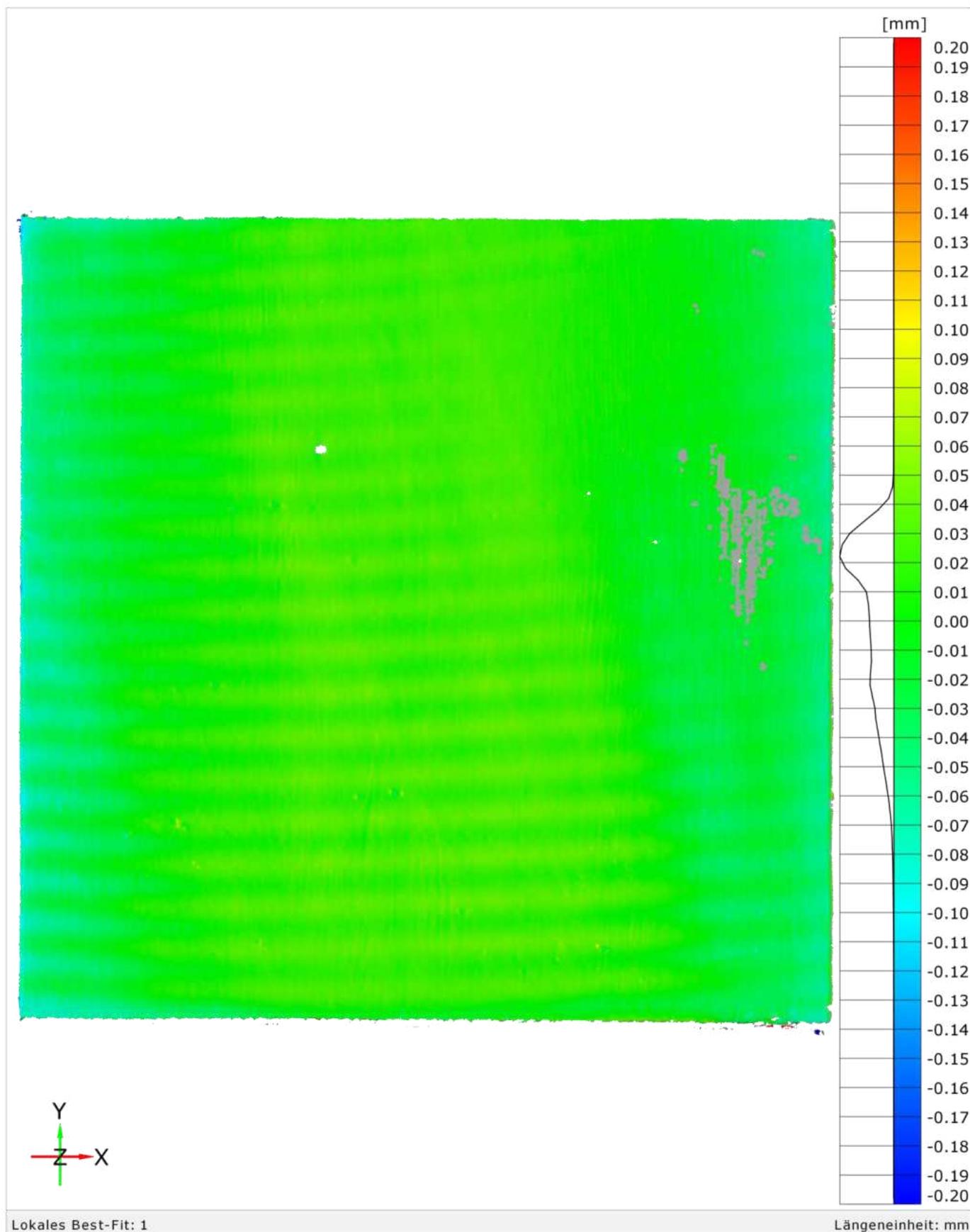


Klimakammertest | VG-M-3

0



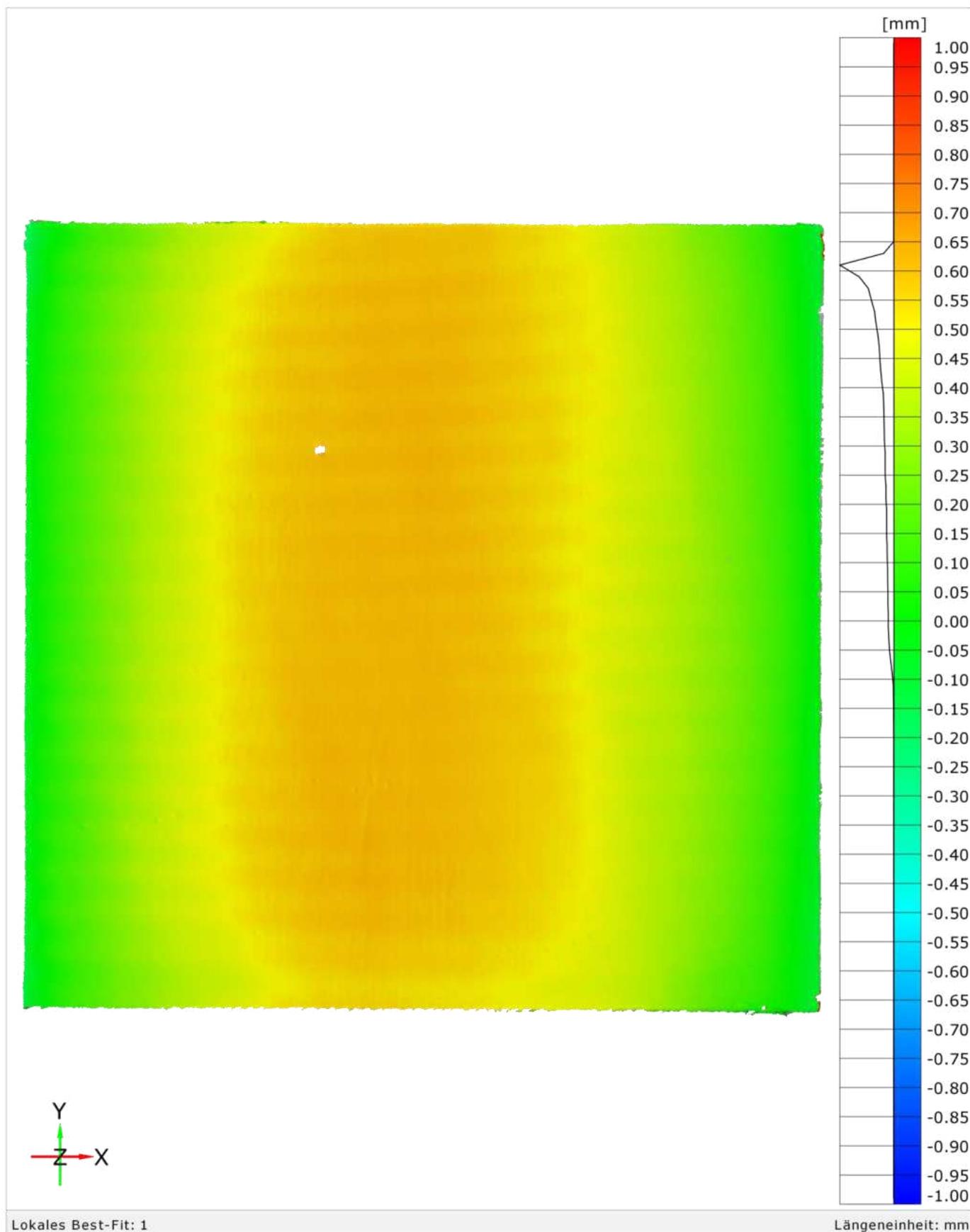
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-04, 09:00



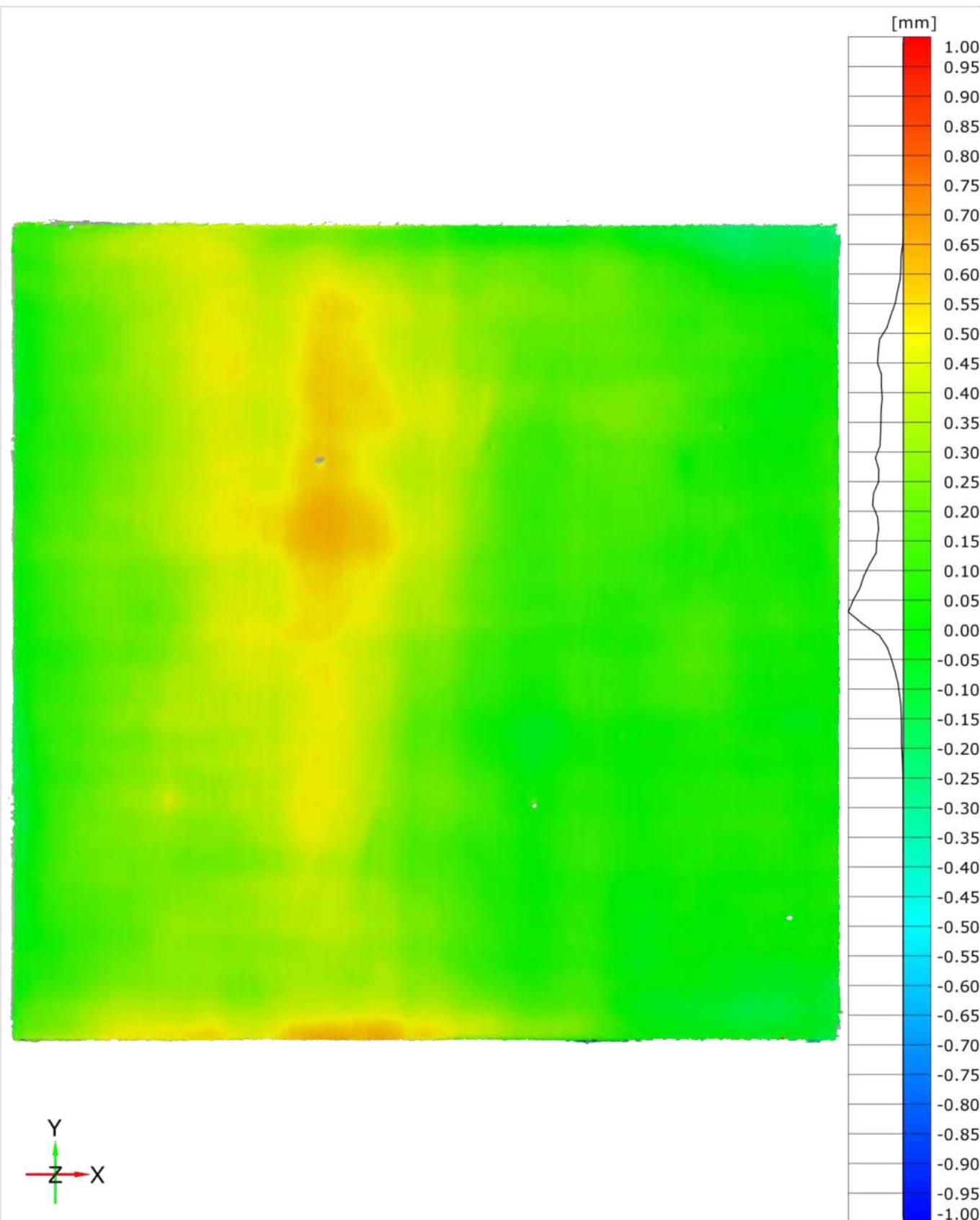
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-04, 09:00 und 2023-07-05, 09:10



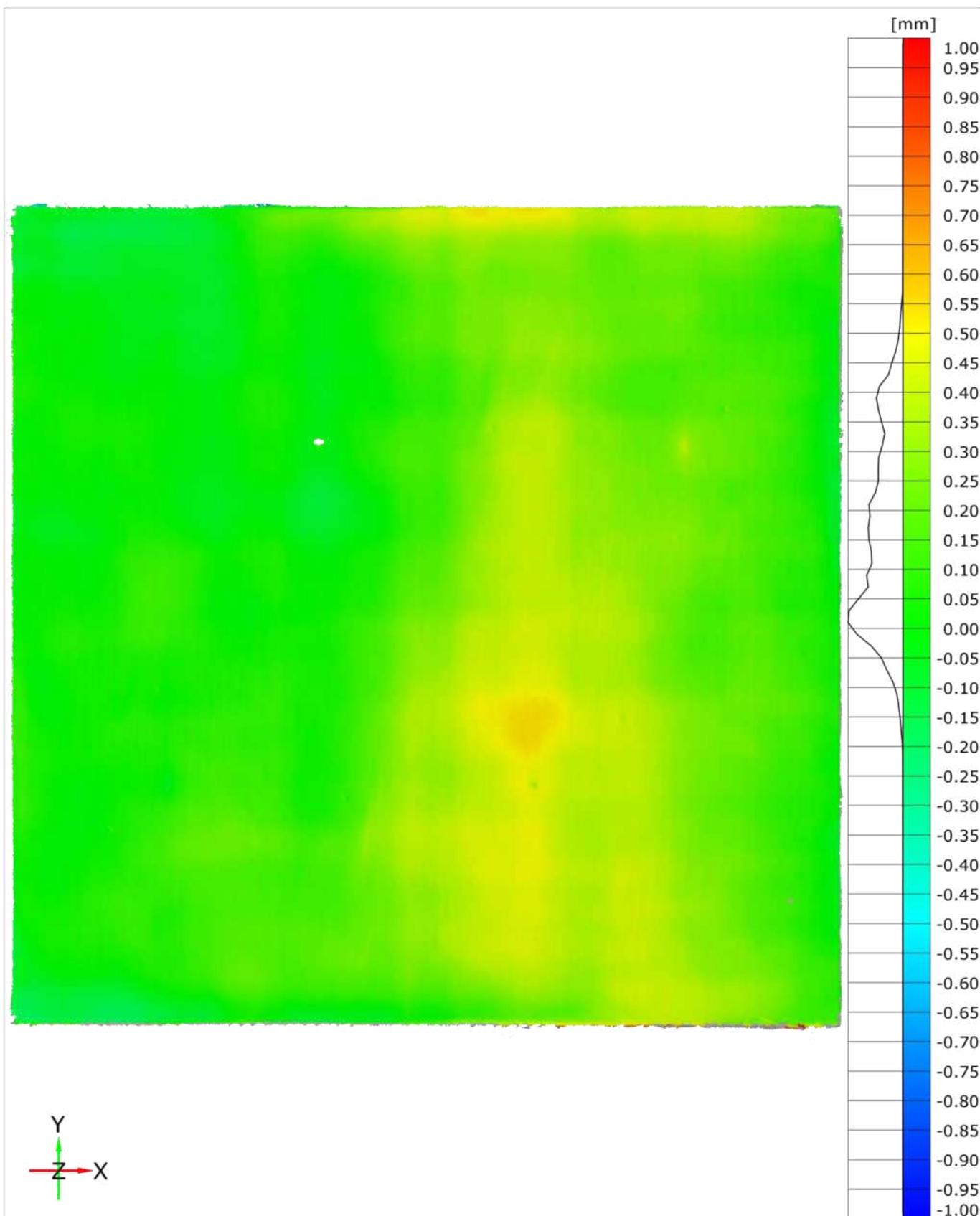
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-05, 09:00 und 2023-07-06, 09:45



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

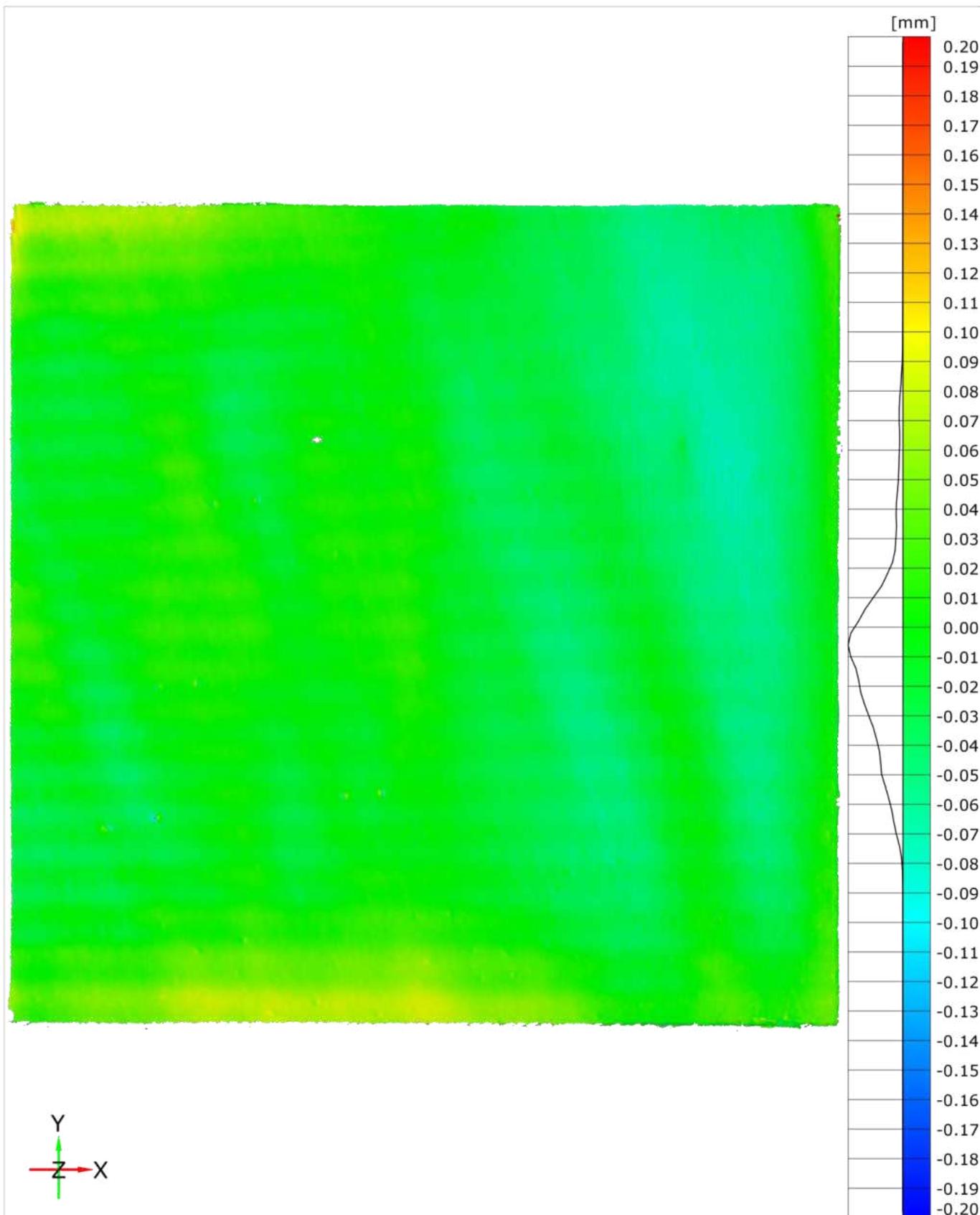
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-06, 09:45 und 2023-07-07, 09:10



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

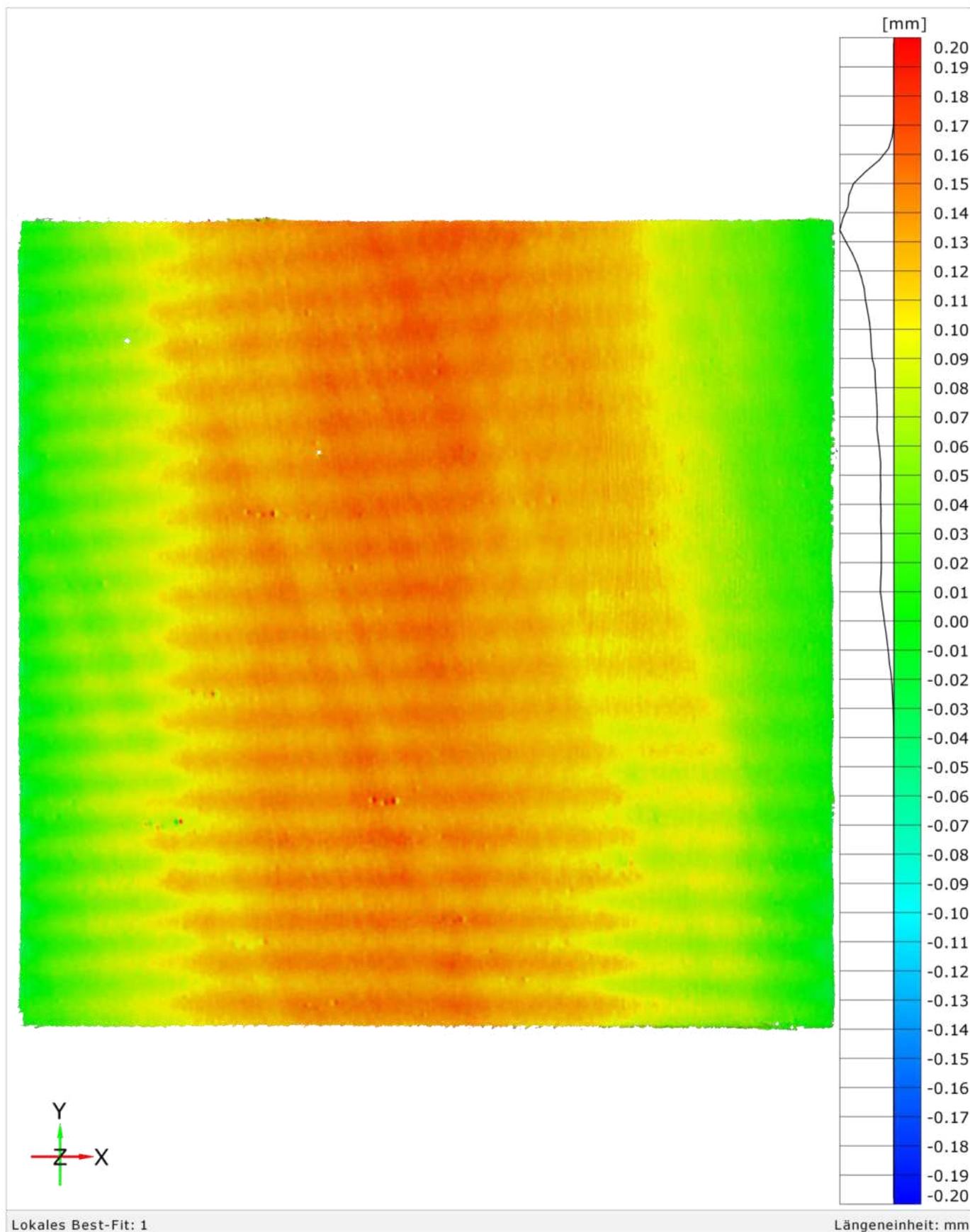
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-07, 10:35 und 2023-07-10, 10:00



Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

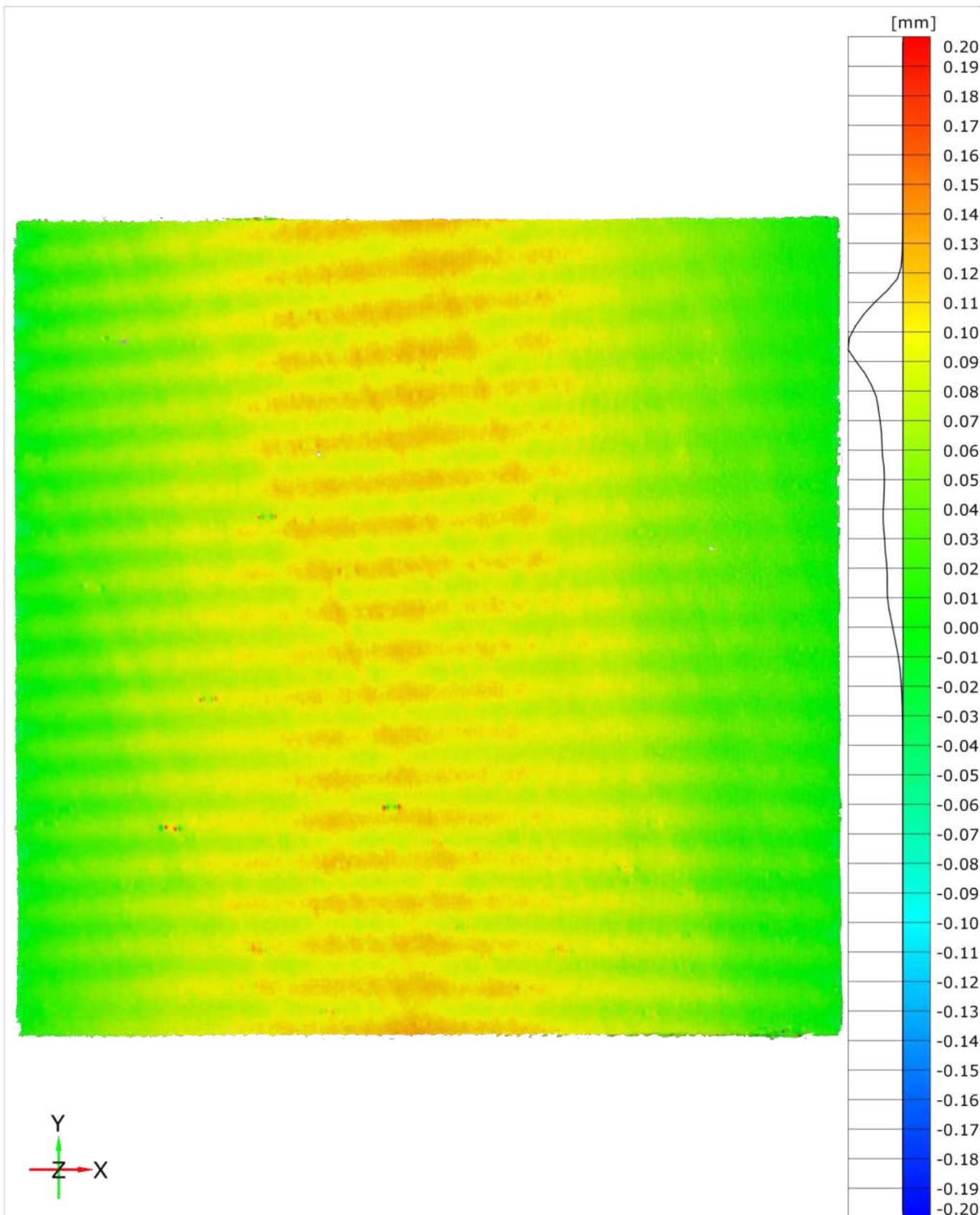
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-11, 10:29 und 2023-07-12, 09:50



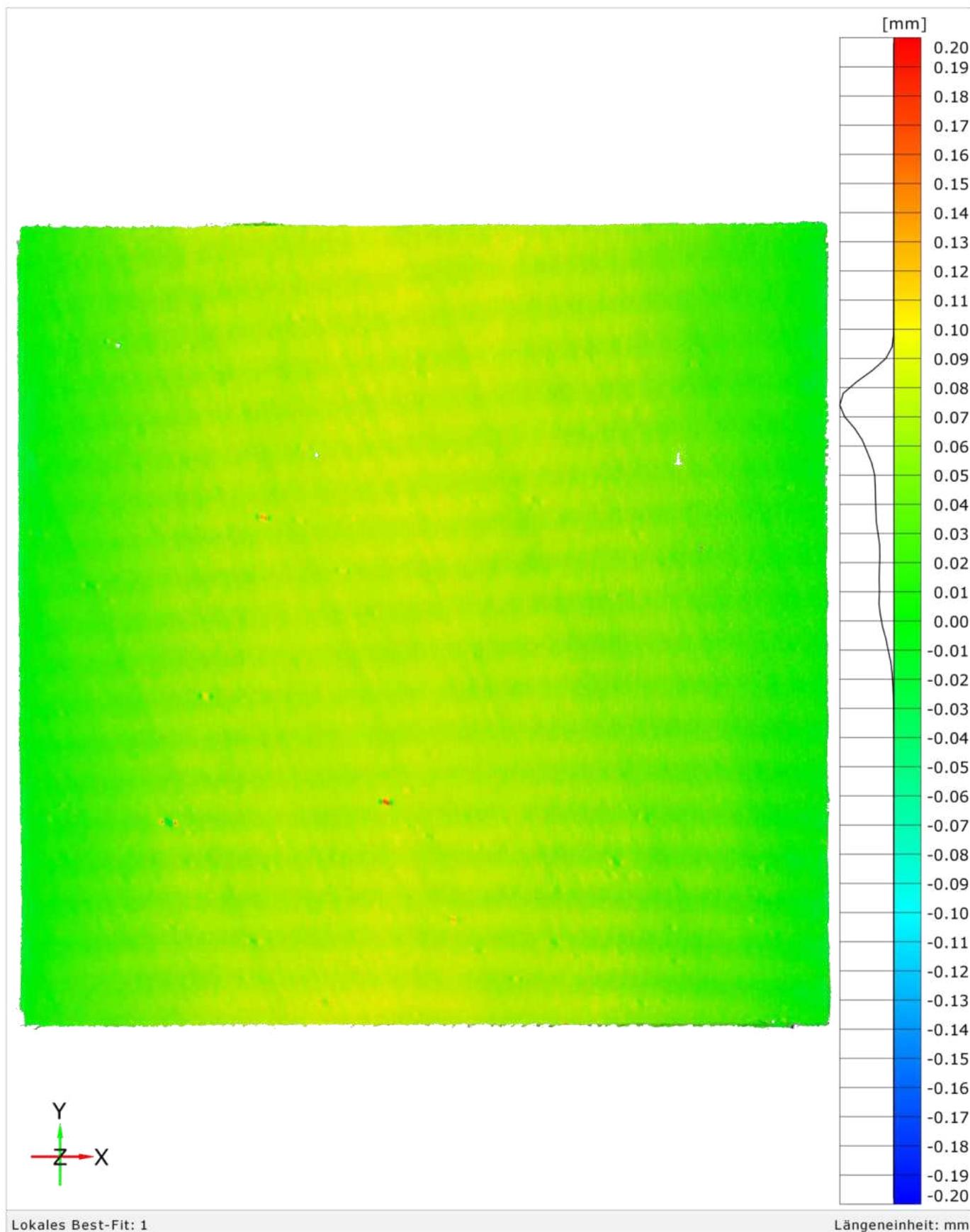
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

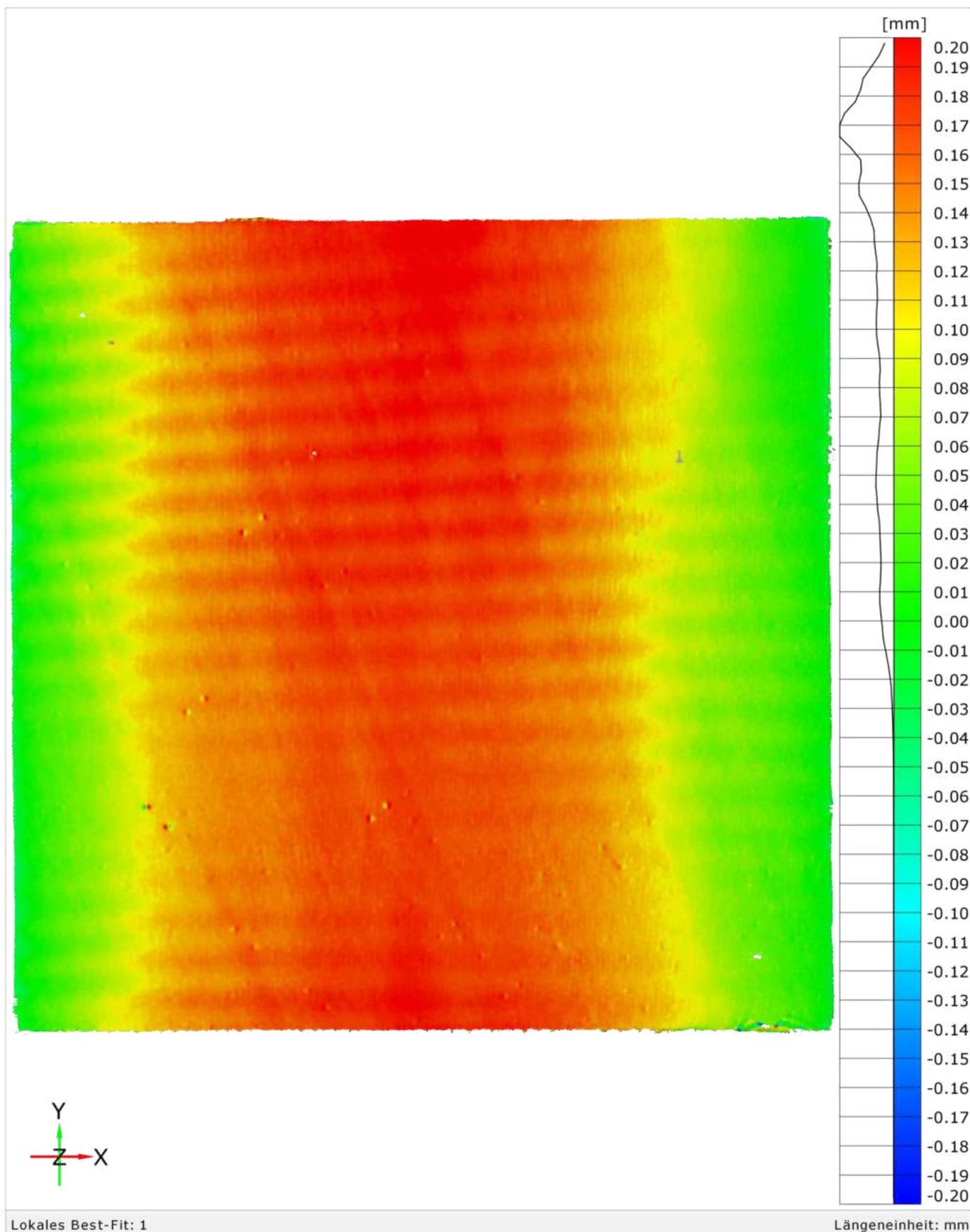
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-12, 09:50 und 2023-07-13, 08:30



Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-13, 08:30 und 2023-07-14, 09:50



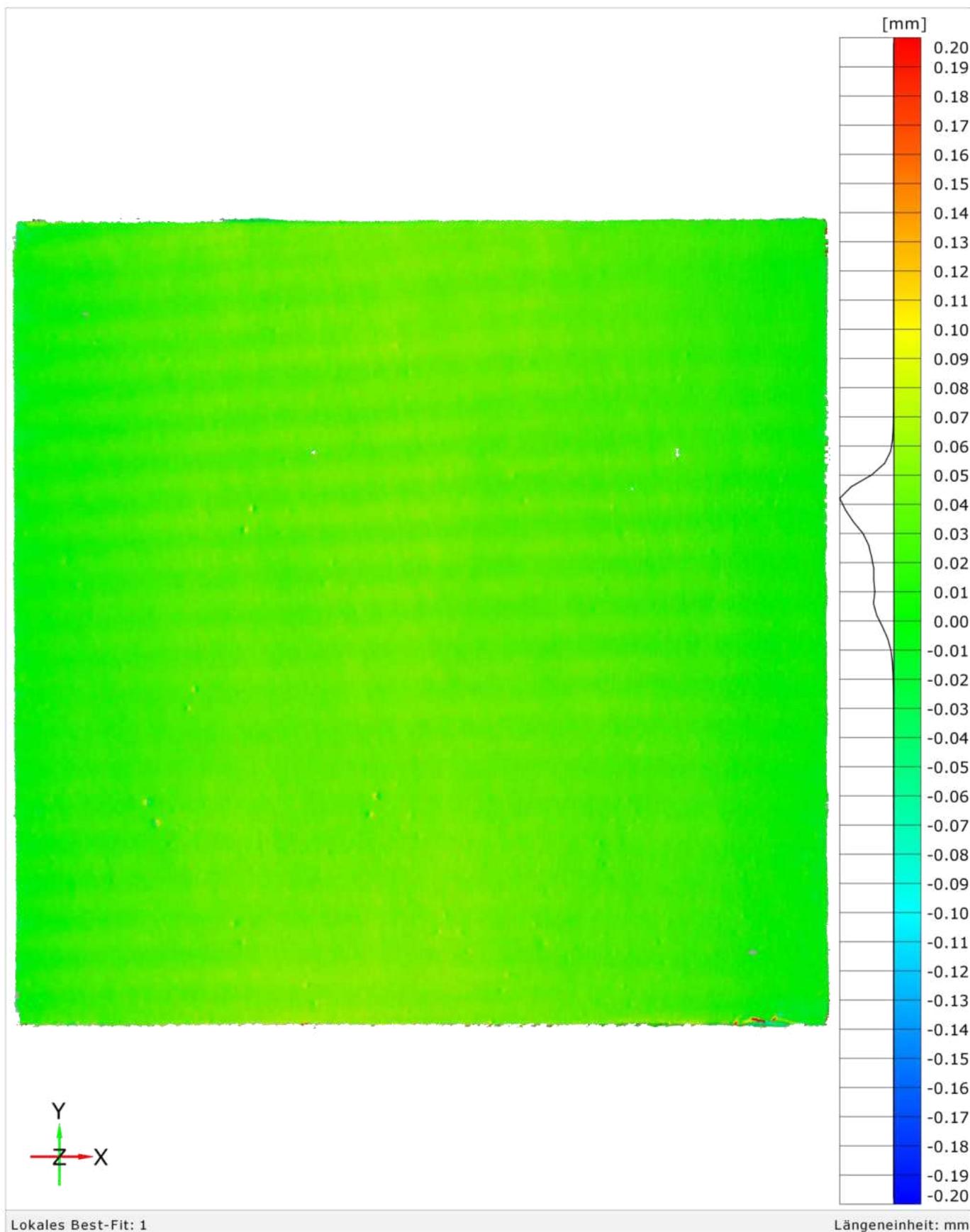
Klimakammertes | VG-M-3 | 2023-07-14, 09:50 und 2023-07-17, 11:10



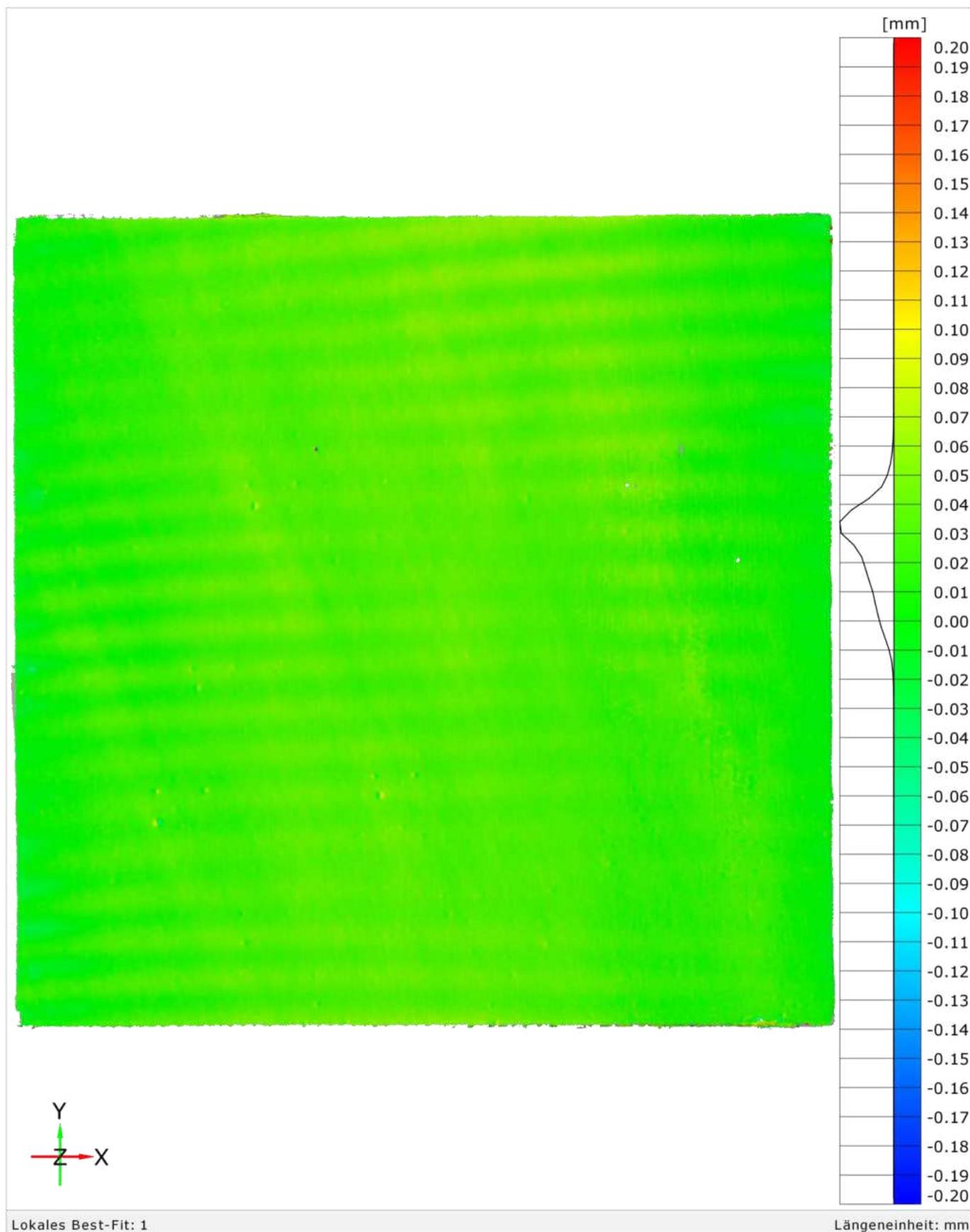
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

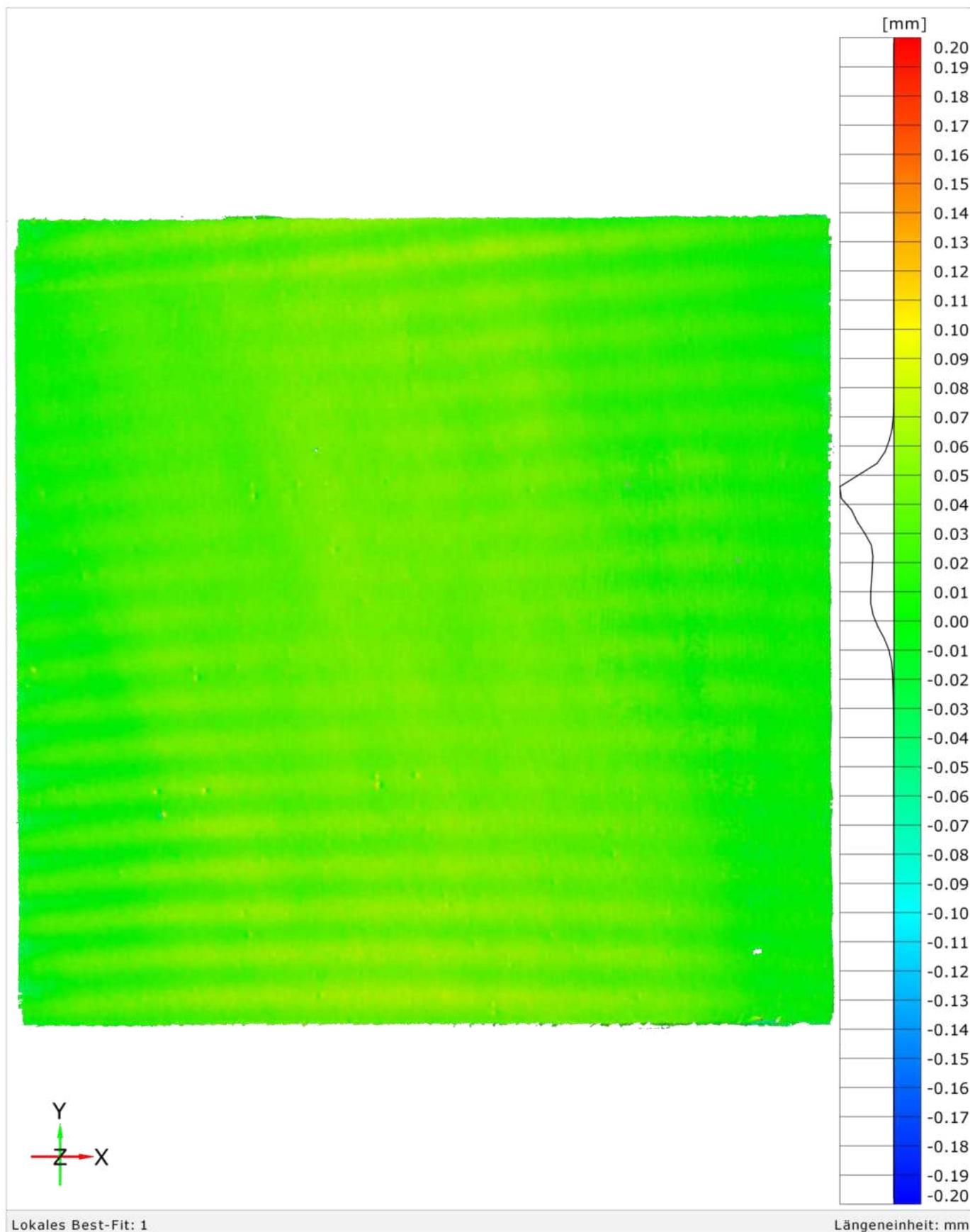
Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-17, 1110 und 2023-07-18, 10:40



Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-18, 10:40 und 2023-07-19, 10:04



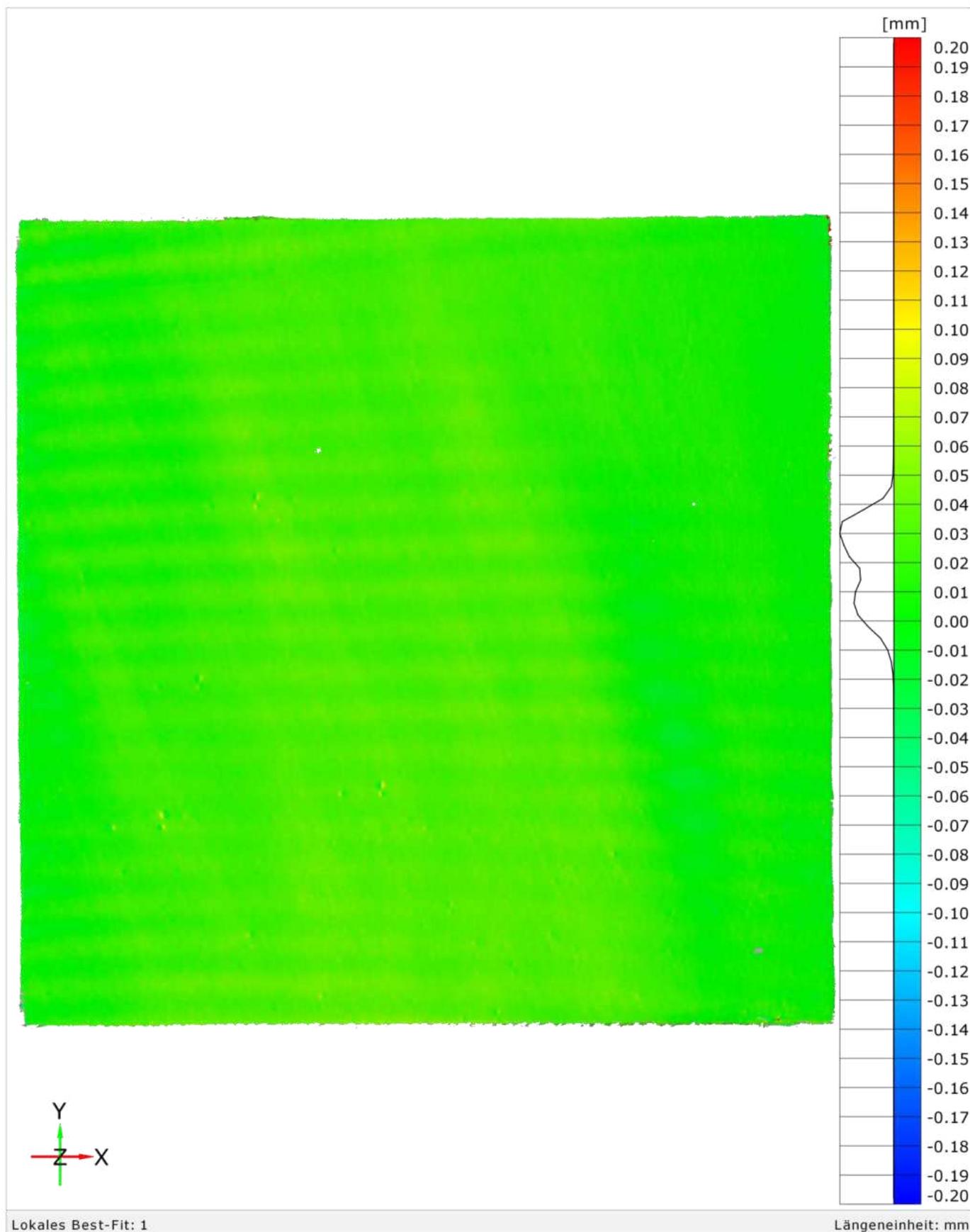
Klimakammertes | VG-M-3 | 2023-07-19, 10:04 und 2023-07-20, 12:00



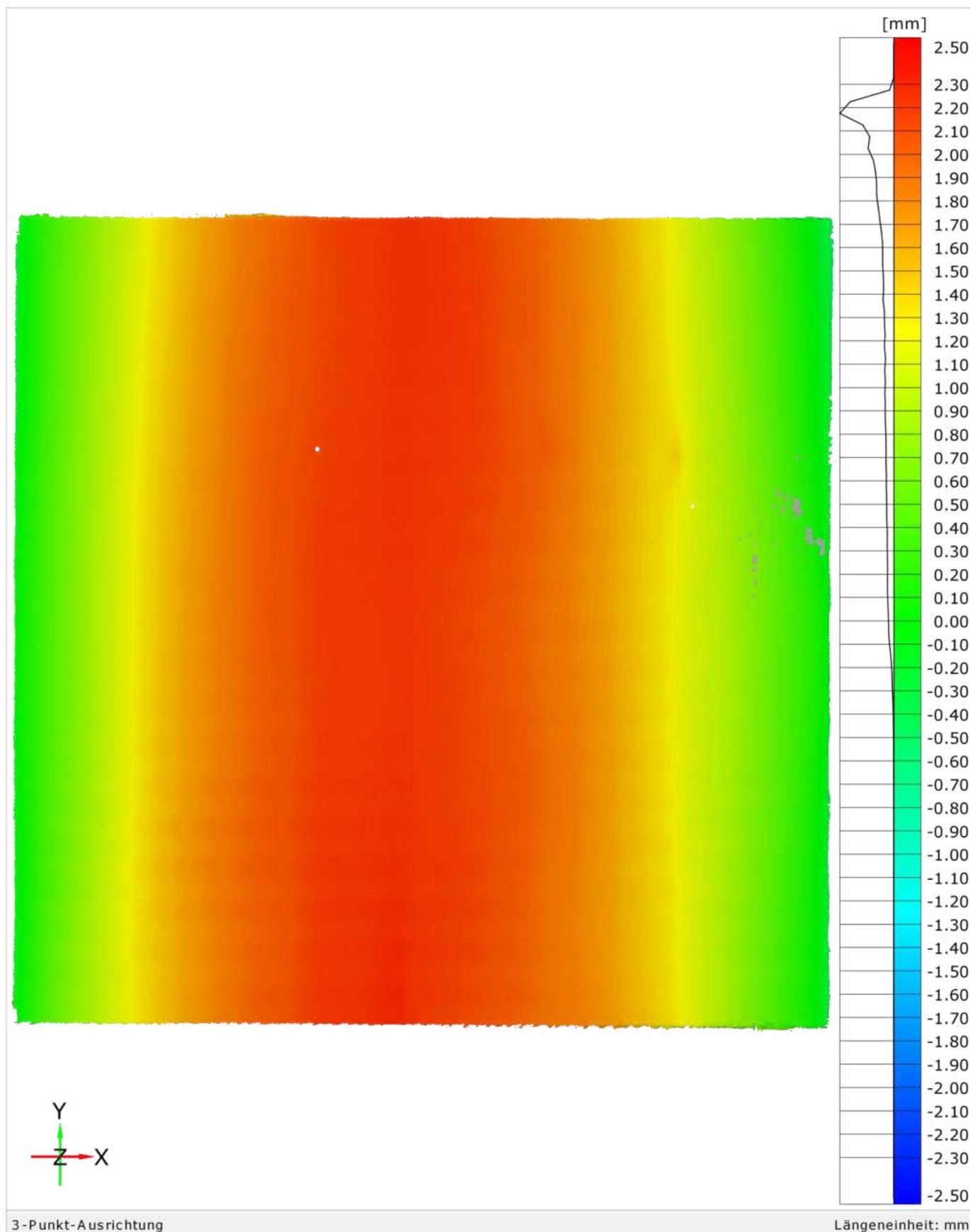
Lokales Best-Fit: 1

Längeneinheit: mm

Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-20, 12:00 und 2023-07-21, 10:14



Klimakammertest | VG-M-3 | 2023-07-04, 07:30 und 2023-07-21, 10:14



Prüfbericht HoFM-070/2023

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Durchgeführt im Auftrag von:
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München
DEUTSCHLAND

Holzkirchen, 21. November 2023



Prüflaboratorium
durch DAkkS GmbH akkreditiert nach
DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Prüfstelle Feuchte, mineralische
Werkstoffe
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-222
Telefax +49 8024 643-366
www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de

Geprüftes Material: „Aufbau Vorderseite VS“

Historischer Anstrich auf Glas-Fritte

Herstellerangaben:

Auftrag von 3x Vorleimung (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser)

Grundierschicht 1 (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser +

Champagner Kreide (1:1,3))

Grundierschicht 2-8 in (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser +

Champagner Kreide (1:1,4))

Absperrschicht 1/2 (Hasenhautleim 7% GT in demin. Wasser)

Malschicht

Ermittelte Werte durch das Prüflabor:

Mittlere Dicke Anstrich: 0,71 mm

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen fertig aufgetragen auf Glas-Fritten am 12. Juni 2023 angeliefert. Das Material wurde direkt vom bayrischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) aufgetragen und dokumentiert.

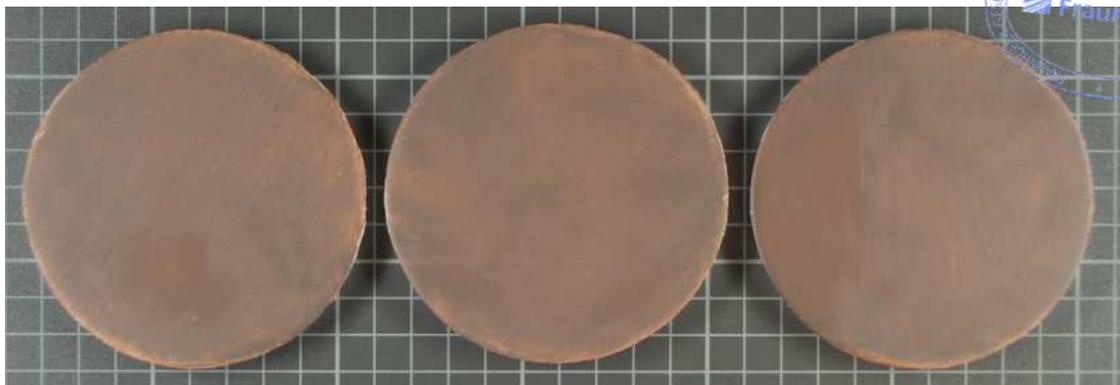


Bild 1: Materialprobe auf Glasfritte „Aufbau Vorderseite VS“.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Der Anstrich wurde mehrlagig auf 6 mm dicke Glasfritten vom Auftraggeber aufgetragen.

Die Proben zeigen keine erkennbaren Mängel oder Besonderheiten.

Probenbezeichnung:

F562_A1 bis F562_A3

F562_A4 bis F562_A6

F562_G0

Proben für dry-cup

Proben für wet-cup

Nullprobe ohne Anstrich

Probenfläche

kreisförmig: Durchmesser 90 mm

Prüfverfahren

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783, 2019-02.

Trockenschalenverfahren: 23 °C, 0 – 50 % r.F. (Sorbens: Silicagel).

Feuchtschalenverfahren: 23 °C, 50 – 93 % r.F. (Sorbens: Ammoniumdihydrogenphosphat).

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden von Juni bis Juli 2023 durchgeführt.

Tabelle 1: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d des Produktes „Aufbau Vorderseite VS“

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_A1 F562_A2 F562_A3	„Aufbau Vorderseite VS“	23 °C, 0 – 50 % r.F.	1,15 1,09 1,18	1,14
F562_A4 F562_A5 F562_A6		23 °C, 50 – 93 % r.F.	0,69 0,65 0,62	0,65

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025:2018 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-00 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
3 Seiten Text,
1 Tabelle und
1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 21. November 2023

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Technischer Leiter der Prüfstelle

Martin Krus

Digital unterschrieben
von Martin Krus
Datum: 2023.11.21
14:02:32 +01'00'

Prof. Dr. Martin Krus



Sachbearbeiterin

Kristin Lengsfeld

Digital unterschrieben
von Kristin Lengsfeld
Datum: 2023.11.21
12:05:13 +01'00'

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld

Prüfbericht HoFM-071/2023

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Durchgeführt im Auftrag von:
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München
DEUTSCHLAND

Holzkirchen, 21. November 2023



Prüflaboratorium
durch DAkkS GmbH akkreditiert nach
DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Prüfstelle Feuchte, mineralische
Werkstoffe
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-222
Telefax +49 8024 643-366
www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de

Geprüftes Material: „Aufbau Rückseite RS“

Historischer Anstrich auf Glas-Fritte

Herstellerangaben:

Auftrag von 3x Vorleimung (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser)
Bindemittelauftrag/Leinölfirnis

Ermittelte Werte durch das Prüflabor:

Mittlere Dicke Anstrich: 0,75 mm

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen fertig aufgetragen auf Glas-Fritten am 12. Juni 2023 angeliefert. Das Material wurde direkt vom bayrischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) aufgetragen und dokumentiert

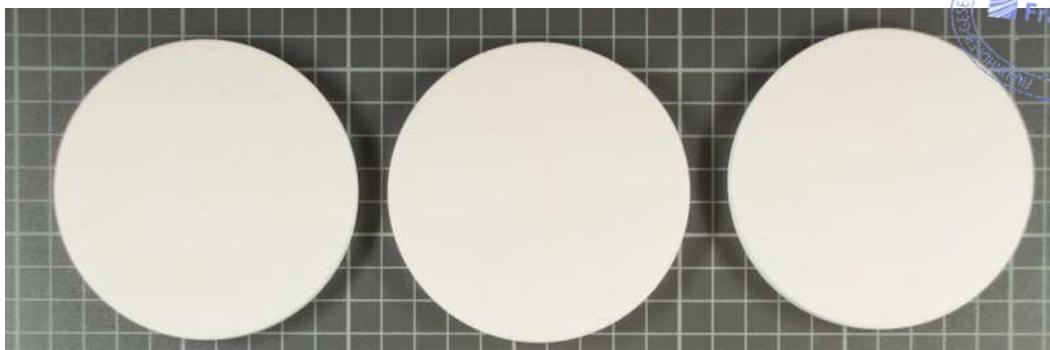


Bild 1: Materialproben auf Glasfritte „Aufbau Rückseite RS“.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Der Anstrich wurde mehrlagig auf 6 mm dicke Glasfritten vom Auftraggeber aufgetragen. Die Proben zeigen keine erkennbaren Mängel oder Besonderheiten.

Probenbezeichnung:

F562_B1 bis F562_B3

Proben für dry-cup

F562_B4 bis F562_B6

Proben für wet-cup

F562_G0

Nullprobe ohne Anstrich

Probenfläche

kreisförmig: Durchmesser 90 mm

Prüfverfahren

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783, 2019-02.

Trockenschalenverfahren: 23 °C, 0 – 50 % r.F. (Sorbens: Silicagel).

Feuchtschalenverfahren: 23 °C, 50 – 93 % r.F. (Sorbens: Ammoniumdihydrogenphosphat).

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden von Juni bis Juli 2023 durchgeführt.

Tabelle 1: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d des Produktes „Aufbau Rückseite RS“

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_B1 F562_B2 F562_B3	„Aufbau Rückseite RS“	23 °C, 0 – 50 % r.F.	0,29 0,25 0,26	0,27
F562_B4 F562_B5 F562_B6		23 °C, 50 – 93 % r.F.	0,11 0,06 0,19	0,12

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025:2018 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-00 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
3 Seiten Text,
1 Tabelle und
1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 21. November 2023

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Technischer Leiter der Prüfstelle
Digital unterschrieben
von Martin Krus
Martin Krus
Datum: 2023.11.21
14:00:35 +01'00'

Prof. Dr. Martin Krus



Sachbearbeiterin
Kristin Lengsfeld
Digital unterschrieben
von Kristin Lengsfeld
Datum: 2023.11.21
12:06:29 +01'00'

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld

Prüfbericht HoFM-072k/2023

Korrektur von Prüfbericht Nr. HoFM-072/2023
Die Änderungen zur vorherigen Version sind im Anhang des
Berichtes aufgeführt.

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Durchgeführt im Auftrag von:
Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege
Hofgraben 4
80539 München
DEUTSCHLAND

Holzkirchen, 18. Dezember 2023



Prüflaboratorium
durch DAkkS GmbH akkreditiert nach
DIN EN ISO/IEC 17025:2018

Prüfstelle Feuchte, mineralische
Werkstoffe
Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-222
Telefax +49 8024 643-366
www.pruefstellen.ibp.fraunhofer.de

Geprüftes Material: „Aufbau Firnis SD“

Historischer Anstrich auf Glas-Fritte

Herstellerangaben:

Auftrag von 3x Vorleimung (Hasenhautleim 7 % GT in demin. Wasser)

Firnis 1 (Schelllack)

Firnis 2 (Dammarfirnis)

Ermittelte Werte durch das Prüflabor:

k.A.

Probennahme

Das zu prüfende Material wurde dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen fertig aufgetragen auf Glas-Fritten am 12. Juni 2023 angeliefert. Das Material wurde direkt vom bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) aufgetragen und dokumentiert.

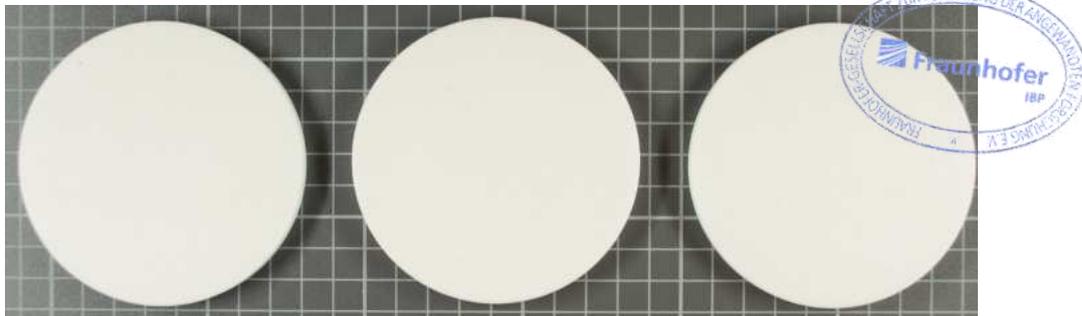


Bild 1: Materialproben auf Glasfritte „Aufbau Firnis SD“.

Probenbeschreibung und Probenbezeichnung

Der Anstrich wurde mehrlagig auf 6 mm dicke Glasfritten vom Auftraggeber aufgetragen. Die Proben zeigen keine erkennbaren Mängel oder Besonderheiten.

Probenbezeichnung:

F562_C1 bis F562_C3

F562_G0

Nullprobe ohne Anstrich

Probenfläche

kreisförmig:

Durchmesser 90 mm

Prüfverfahren

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783, 2019-02.

Trockenschalenverfahren: 23 °C, 0 – 50 % r.F. (Sorbens: Silicagel).

Feuchtschalenverfahren: 23 °C, 50 – 93 % r.F. (Sorbens: Ammoniumdihydrogenphosphat).

Prüfergebnisse

Die Prüfungen wurden von Juni bis Juli 2023 durchgeführt.

Tabelle 1: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d des Produkts „Aufbau Firnis SD“

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_C1 F562_C2 F562_C3	„Aufbau Firnis SD“	23 °C, 0 – 50 % r.F.	1,99 1,99 1,88	1,95
F562_C1 F562_C2 F562_C3		23 °C, 50 – 93 % r.F.	0,57 0,56 0,53	0,55

*) Ergebnisse nach Abzug des s_d -Wertes der Nullprobe

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das nach DIN EN ISO 17025:2018 durch die DAkkS mit der Nr. D-PL-11140-11-00 akkreditiert ist.

Der Prüfbericht umfasst
4 Seiten Text,
1 Tabelle und
1 Bild.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Holzkirchen, 18. Dezember 2023

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Technischer Leiter der Prüfstelle

Martin Krus

Digital unterschrieben
von Martin Krus
Datum: 2023.12.19
10:33:21 +01'00'

Prof. Dr. Martin Krus



Sachbearbeiterin

Kristin Lengsfeld

Digital unterschrieben
von Kristin Lengsfeld
Datum: 2023.12.19
08:55:54 +01'00'

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld

Anhang

Seite	Kapitel	Ursprüngliche Version (HoFM-072/2023)	Korrigierte Version (HoFM-072k/2023)
2	Geprüftes Material	Herstellerangaben: Firn 1 (Schellack) Firn 2 (Schellack) Ermittelte Werte durch das Prüflabor: Mittlere Dicke Anstrich: 0,72 mm	Herstellerangaben: Firn 1 (Schellack) Firn 2 (Dammarfirnis) Ermittelte Werte durch das Prüflabor: k.A.



Anhang F: Ergebnisse

04- Untersuchungsbericht Luftströmungsmessung und Thermografie

[Auszug 4. DBU Zwischenbericht]

Anlass

Am 21.03.2023 wurden in der Einhausung Thermografien angefertigt, die bei der Bewertung der Luftwechsel-Messungen und der Detektion lokaler Taupunktunterschreitungen helfen sollten.

Methodik

Luftströmungsmessung: siehe Anhang E, weitere Untersuchungen, 00-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung.

Thermografie: Die Aufnahmen wurden mit einer Wärmebildkamera der Firma *InfraTec* (Modell: *VarioCAM@ high resolution32*) aufgenommen und in der zugehörigen Software *IRBIS@ remote 3.0* ausgewertet.

Ergebnisse

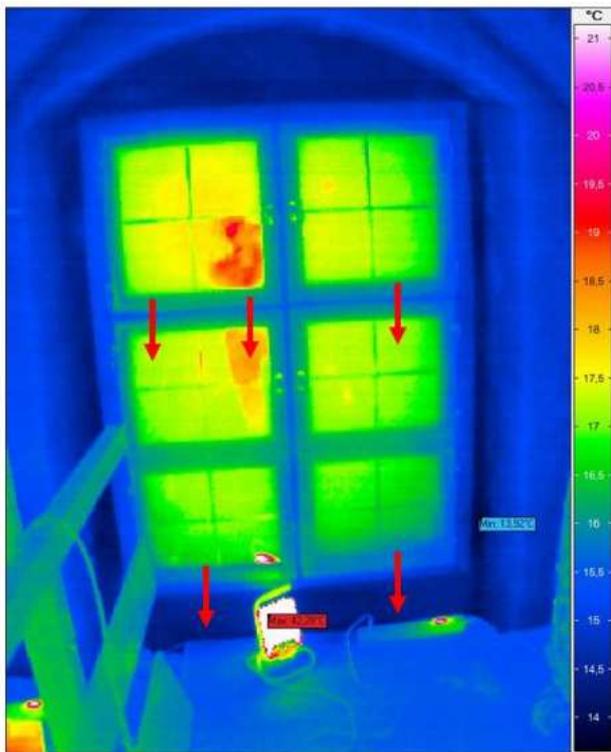


Abb. 1: IR-Aufnahme des Fensters in der Einhausung. Im Fugenbereich der Fensterflügel kommt es zur Zuführung von Außenluft (Quelle: TUM, 2023)

Im mittleren Raumbereich der Einhausung waren keine auffälligen Luftbewegungen erkennbar. Im Fensterbereich waren deutliche Luftströmungen im Fugenbereich der Fensterflügel sichtbar. Hier ist ein Luftaustausch mit der Außenluft spürbar. Dieser kann auch negative Luftmengen (zu trocken, zu feucht) in die Einhausung führen.

Bild- und Objektparameter

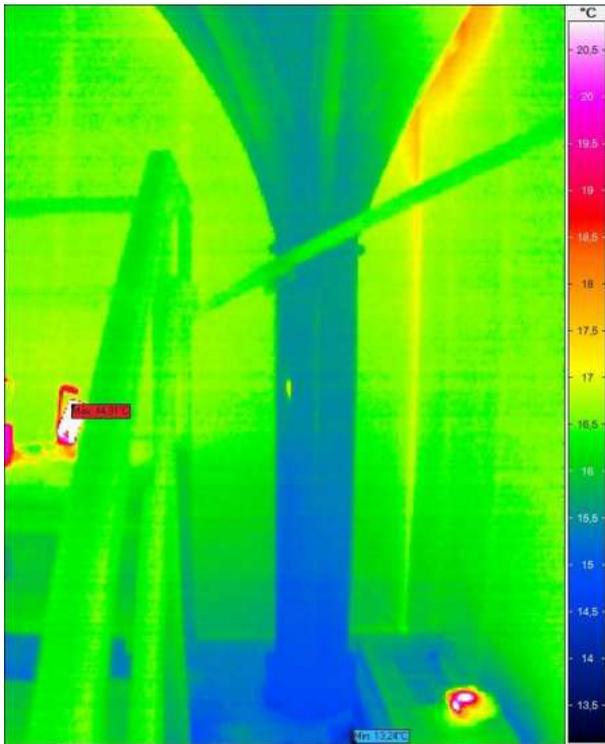
Bilddatum	21.03.2023
Uhrzeit	15:19 Uhr
Kamera (-typ/-modell)	VarioCAM high resolution
Außentemperatur	14,7 °C
Innentemperatur	15 °C
Rel. Luftfeuchte innen	63 %
Wetter	locker bewölkt
Objektabstand	2 m



Abbildung 2: Thermograie der Vorderseite des Tafelbilds. Die sehr einheitliche Temperatur ist klar ersichtlich. Bei der Wärmequelle im rechten Viertel der Abbildung handelt es sich um einen der iAir-Sensoren. (Quelle: TUM, 2023)

Wie Abbildung 2 zeigt, weist das Tafelbild eine sehr gleichmäßige Temperatur auf. Zwänge durch lokale Temperaturdifferenzen können daher ausgeschlossen werden. Auch die installierte Messtechnik führt offenbar zu keiner schädlichen kleinräumigen Erhitzung des Gemäldes. Zudem sind beim zum Messzeitpunkt vorherrschenden Raumklima (15 °C, 63 % rF) und der Temperatur der Tafel von ca. 16 °C keine

Taupunktunterschreitungen und Kondensation zu erwarten. Das Gewölbe und die Rückwand im Hintergrund sind zwar etwas kühler als das Tafelgemälde, jedoch ist auch hier keine Kondensation zu erwarten. Dies belegen die bisherigen Messwerte der Oberflächentemperatur- und Klimasensoren.

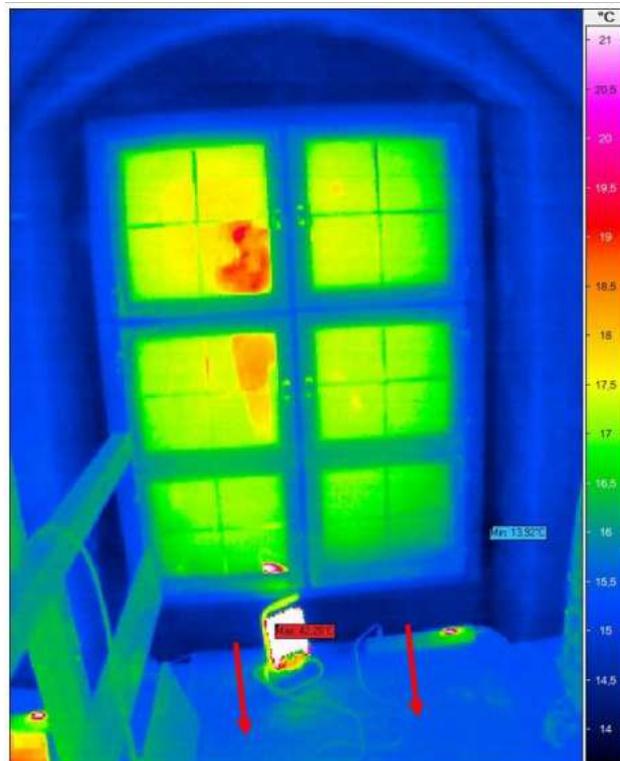


Die Thermografie-Aufnahmen zeigen auch, dass die erdverbundenen tragenden Bauteile als Wärmesenken fungieren

Bild- und Objektparameter

Bilddatum	21.03.2023
Uhrzeit	15:19 Uhr
Kamera (-typ/-modell)	VarioCAM high resolution
Außentemperatur	14,7°C
Innentemperatur	15°C
Rel. Luftfeuchte innen	63 %
Wetter	locker bewölkt
Objektabstand	2 m

Abbildung 1: Thermographie einer Säule in der Einhausung. Der kältere Säulenfuß deutet auf die Wärmebrücke zum Untergrund hin (Quelle: TUM, 2023)

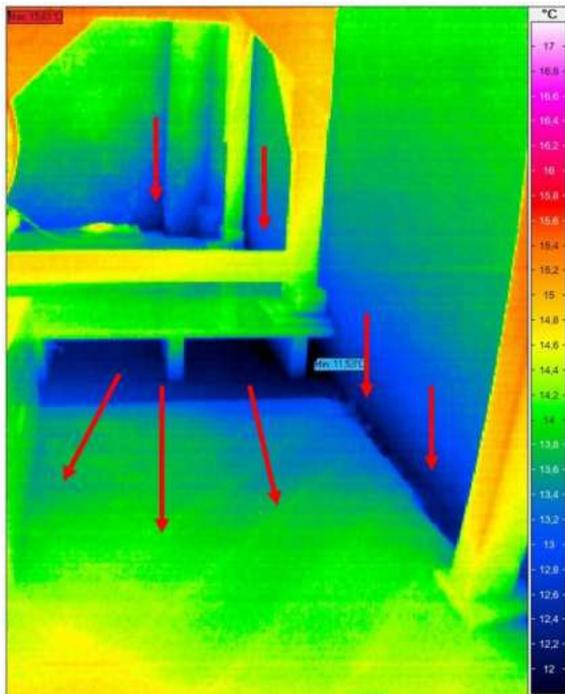


Unterhalb des Fensters kam es am Untersuchungstag zu einer Kaltluftbewegung nach unten. Diese Kaltluftströmung streicht dann leicht über das angrenzende Podest Richtung Tafelbild.

Bild- und Objektparameter

Bilddatum	21.03.2023
Uhrzeit	15:19 Uhr
Kamera (-typ/-modell)	VarioCAM high resolution
Außentemperatur	14,7°C
Innentemperatur	15°C
Rel. Luftfeuchte innen	63 %
Wetter	locker bewölkt
Objektabstand	2 m

Abb. 2: IR-Aufnahme des Fensters in der Einhausung. Vor dem Fenster sind Luftströmungen auf dem Podest feststellbar (Quelle: TUM, 2023)

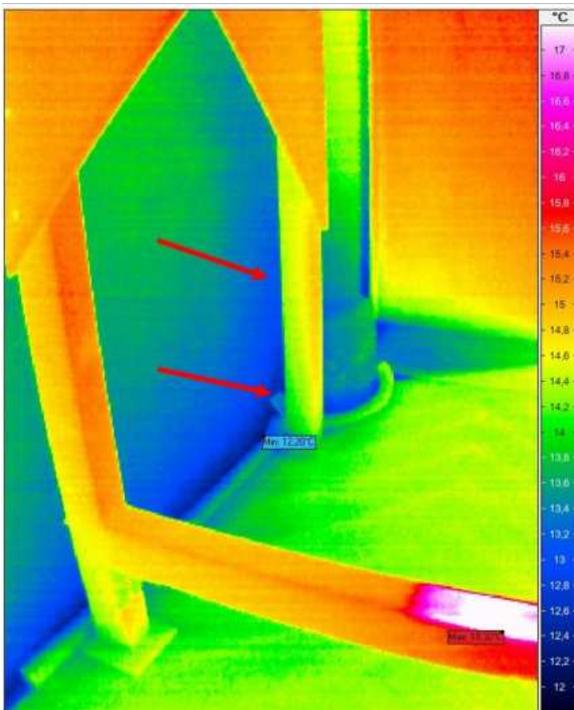


Unterhalb des Podestes waren im Randbereich deutliche Luftbewegungen erkennbar. Hier strömt Kaltluft im offenen Randbereich zwischen Außenwand und Podestfläche nach unten.

Bild- und Objektparameter

Bilddatum	21.03.2023
Uhrzeit	15:24 Uhr
Kamera (-typ/-modell)	VarioCAM high resolution
Außentemperatur	14,7°C
Innentemperatur	15°C
Rel. Luftfeuchte innen	63 %
Wetter	locker bewölkt
Objektabstand	1,5 m

Abb. 3: IR-Aufnahme unterhalb des Podestes, Blickrichtung zum Fenster. An den Wänden wurden Fallströmungen erkannt und es gab Luftbewegung aus den kühleren Bereich in den Raum hinein (Quelle: TUM, 2023)



Die einsetzende Luftströmung unter dem Podest trifft dann auf die Stützkonstruktion des unteren Podestbereiches. Dies könnte auch für das Schimmelpilzwachstum förderlich sein.

Bild- und Objektparameter:

Bilddatum	21.03.2023
Uhrzeit	15:26 Uhr
Kamera (-typ/-modell)	VarioCAM high resolution
Außentemperatur	14,7°C
Innentemperatur	15°C
Rel. Luftfeuchte innen	63 %
Wetter	locker bewölkt
Objektabstand	1 m

Abb. 4: IR-Aufnahme unterhalb des Podestes, Blickrichtung zur Rückwand. An den Wänden wurden Fallströmungen erkannt, die auch auf Oberflächen der Stützkonstruktion treffen (Quelle: TUM, 2023)



Institut für Diagnostik
und Konservierung an Denkmalen
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht DD 76/2023

Luftwechselformung einer temporären Einhausung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes: „Entwicklung und modellhafte Anwendung einer ‚in situ‘ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes“

DBU Projekt: AZ 37502/01

Beauftragt durch: Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstrasse 21
80333 München

Bearbeiter: Dipl. Ing. (FH) Thomas Löther

Anzahl der Seiten: 4

Anlagen: - Seiten

Thomas Löther

Dresden, 23.11.2023

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden
Tel.: 0351 48435-100
Fax.: 0345 472257-29

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle
Tel.: 0345 472257-20
Fax.: 0345 472257-29

e-mail: info@jdk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Dr. Stephan Pfefferkorn
Dipl.-Ing. Konstanze Förster-Wetzel
Prof. Dr. Jeannine Meinhardt

Geschäftsführerin:

Dipl.-Ing (FH) Thomas Löther

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden

IBAN: DE52850503003120115524

BIC: OSDDDE81XXX

St-Nr.: 203 140 15097

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Erfassung des natürlichen Luftwechsels	2
2.1	Methodik Luftwechselformeln	2
2.2	Datenblätter der Luftwechselformeln	3

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes „Entwicklung und modellhafte Anwendung einer ‚in situ‘ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes“ (AZ 37502/01) erfolgen auch raumklimatische Untersuchungen und Simulationen. Um diese Simulationen richtig kalibrieren zu können, ist die Bestimmung des natürlichen Luftwechsels eine wichtige Messgröße.

Das im Forschungsprojekt beteiligte Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) führte die Tracergasmessung innerhalb der Einhausung durch, um eine Messgröße zum natürlichen Luftwechsel zu ermitteln.

2 Erfassung des natürlichen Luftwechsels

2.1 Methodik Luftwechselformeln

Die Untersuchung des Luftwechsels erfolgt nach der Referenzgasmethode mit Hilfe von CO₂. Um den Luftwechsel eines Raumes zu bestimmen, wird eine definierte Menge an Referenzgas in die Raumluft der temporären Einhausung abgegeben. Um die bestmögliche Vermischung des eingebrachten Gases mit der Raumluft zu erreichen, werden Lüfter eingesetzt, die das Gas sofort nach dem Austritt verteilen. Sensoren messen im Minutenabstand die Referenzgaskonzentration, sowie Lufttemperatur und Luftfeuchte. Der Versuchsaufbau der Messung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 12569. Die Messwerte werden an ein Notebook gesendet und dort verarbeitet. Aus Art und Weise des Referenzgaskonzentrationsanstiegs und des anschließenden Konzentrationsabfalls erfolgt die Ermittlung des Luftwechsels mit Hilfe einer Modellrechnung. Die Berechnung wird einerseits nach den Vorgaben von DIN EN ISO 12569 ausgeführt und berücksichtigt lediglich die Abkonzentrationsphase des Referenzgases, alternativ dazu kommt ein Berechnungsverfahren zum Einsatz, das Auf- und Abkonzentrationsphase einbezieht. Dadurch wird der praxisrelevante Wert des mittleren Luftwechsels ermittelt.

2.2 Datenblatt der Luftwechselformeltemporäre Einhausung

Luftwechselformeltemporäre Einhausung

Objektdatenblatt

Objektdaten	
Objektname:	Dom Freising
Objektadresse:	Domberg 36 85354 Freising
Objektdetail/Bezeichnung des Raumes:	Sakristei mit temporärer Einhausung
Datum:	17.07.2023



Kenndaten - Eigenschaften des Raumes		
Raumtemperatur [°C]	23,6	Besonderheiten:
rel. Feuchte [%]	65,0	Messung in einer baulich abgedichteten temporären Einhausung
Grundfläche [m²]:		
Ø Höhe [m]:		
Volumen [m³]:	95	
Fensterfläche [m²]:		
Oberflächenmaterial:	verputzte Wandoberflächen, eine Fensterfront, Holzfußboden, Holzeinbauten	

Kenndaten - Wetterbedingungen am Tag der Messung			
Lufttemperatur [°C] (Tagesmittel)	26	Windstärke [Bft] (Tagesmittel)	---
rel. Feuchte [%] (Tagesmittel)	50	max. Windgeschwindigkeit [km/h]	5

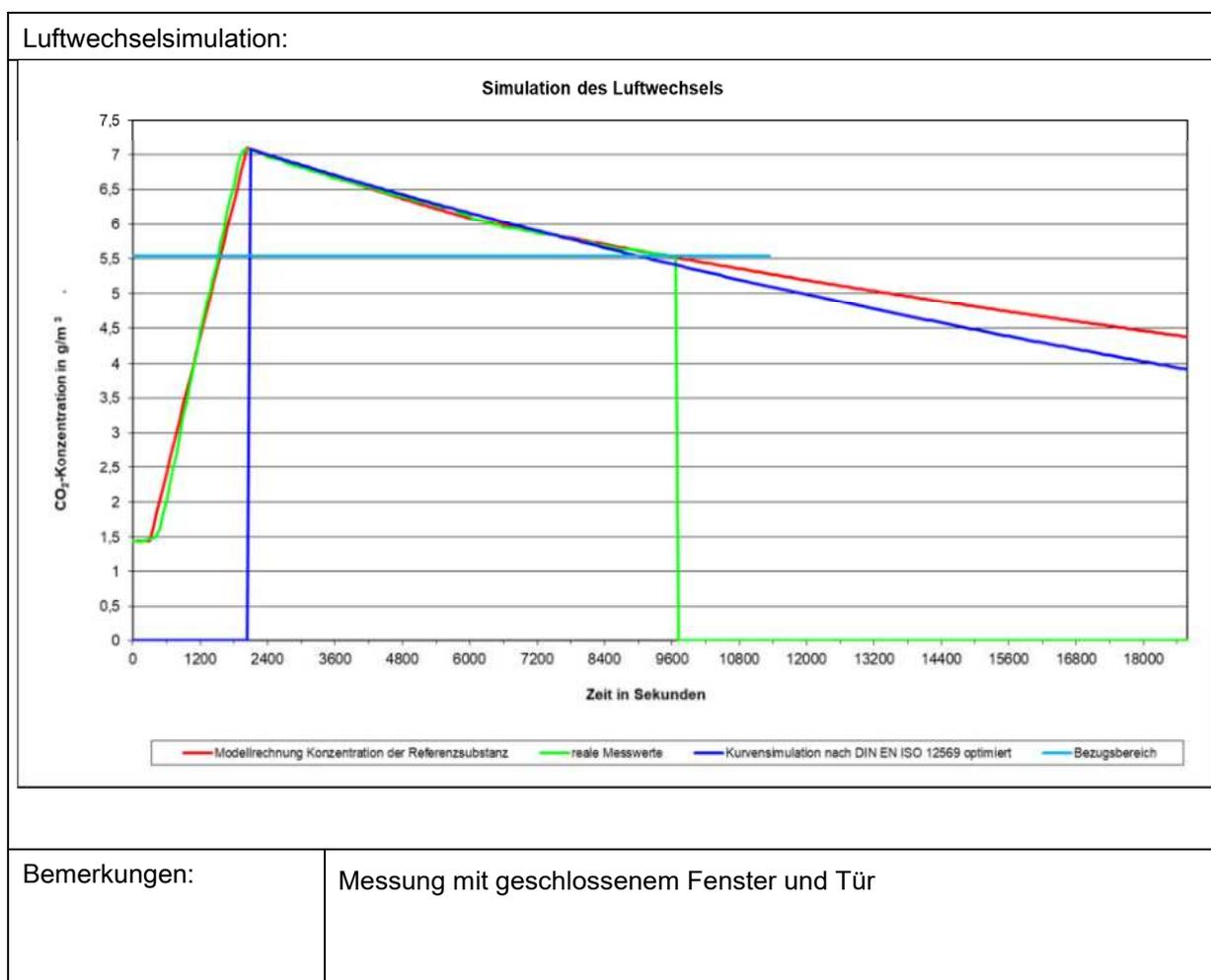
Luftwechselformeltemporäre Einhausung/Ergebnisse	
Messbeginn:	17.07.2023, 11:20 Uhr
Messverfahren:	Referenzgasmethode in Anlehnung an Versuchsaufbau nach DIN EN ISO 12569
Referenzgas:	CO ₂

Luftwechsellmessung

Objektdatenblatt

Objektdaten	
Objektname:	Dom Freising
Objektadresse:	Domberg 36 85354 Freising
Objektdetail/Bezeichnung des Raumes:	Sakristei mit temporärer Einhausung
Datum:	17.07.2023

Berechnung der Luftwechselrate:	Luftwechselrate
nach DIN EN ISO 12569	0,08
IDK-Modellrechnung unter Berücksichtigung der Auf- und Abkonzentrationsphase:	0,13



Anhang G: Lösungsansätze

00-Stand des Wissens und der Technik

Schon den frühen Tafelmachern war bekannt, dass Holztafelbilder Formänderungen unterworfen sind (vgl. EIBNER; 1928, Kühn et. al., 1984; STRAUB, 1968). So wurden bereits im Herstellungsprozess stabilisierende oder stützenden Konstruktionselementen angewandt, um so eine Verformung zu verhindern. Das Verlangen der Begradigung verwölbter Tafeln und die Vermeidung von Deformationen hat sich über die Zeit erhalten (vgl. NICOLAUS 1998, ZILLICH 1991). Ursächlich dafür sind u. a. die ästhetische Beeinträchtigung einer Verformung und die Gefährdung der Lesbarkeit sowie Malschichtverluste.

Zillich (1991)¹ beschreibt die Verformung und Begradigung von Holz und seine Eigenschaften ausführlich in Ihrer Diplomarbeit: durch einen hohen (hygroskopischen) Celluloseanteil ist Holz bestrebt die Gleichgewichtsfeuchte zu erreichen, diese ist abhängig von der Holzart, Zusammensetzung, aber auch umgebenden Temperatur und Luftfeuchtigkeit.² Die Feuchtigkeitsbewegung erfolgt dabei primär durch Wasserdampfdiffusion und kapillarem Flüssigkeitstransport. Der Fasersättigungsbereich (bei 100% r. F.) ist – je nach Holzart – zwischen 25 – 35% Holzfeuchte erreicht. Das Quell- und Schrumpfverhalten unterscheidet sich in den drei Hauptachsen des Stammes (größte Bewegung im Tangential-, danach im Radial- und zuletzt im Querschnitt).³ Holz als visko-elastisches Material kann dabei plastische und elastische Verformungen aufweisen. Die plastischen Verformungen (z. B. durch mechanische Beanspruchungen oder innere Spannungen) sind irreversibel; die elastischen können sich zurückformen.⁴ Im Darrzustand hat Holz zwar die höchste Festigkeit und Elastizität erreicht, allerdings ist die Bruchgefahr hier am größten. 12-15% Holzfeuchte ist der konstanteste Bereich, in welchem die plastischen Eigenschaften von Holz überwiegen und Formveränderungen vermieden werden. Über diesem Feuchtigkeitsbereich werden die Holzzellen durch plastisches Fließen verformt; dieser Zustand wird durch die eintretende Plastifizierung des Lignins stabilisiert. Wird Holz bei der Quellung behindert und schwindet anschließend wieder, so entsteht eine sog. Druckverformung durch Schubspannung, die zu einem irreversiblen Volumensverlust führt.⁵

Laut Zillich (1991, S. 41) findet die Begradigung von Holztafeln sich seit dem 18. Jh. Erwähnung in Quellenschriften, war aber vermutlich schon früher bekannt. Besonders die Zerstörung, Auslagerung mit Klimawechsel, Trennung von und Vandalismus an Altären während der Säkularisation (19. Jh.) sowie in den beiden Weltkriegen (20. Jh.) führten zu zahlreichen Überlieferungen von Begradigungsmethoden und führten nahezu einer Mode von stabilisierenden Maßnahmen. Auch Kirchenumbauten, Altarversetzungen und der Einbau von Zentral- und Kirchenheizungen führten verstärkt zu anthropogenen Schäden.⁶ Sie beschreibt weiterhin die historischen⁷ und modernen Verfahren⁸ (Zillich, 1991, S. 34 bis 106) sowie ergänzende und nachträglich Maßnahmen wie z. B. Stützsysteme (seit ca. 1930); Rahmung zur Stabilisierung; Parkettausgleich und klimatische Maßnahmen (u. a. Wandabstand, Sonnenlicht, Zugluft, Rückseitenschutz).

¹ Zillich, Isabell (1991). Über das Begradigen von Holztafelgemälden. Diplomarbeit. Institut für Technologie und Malerei der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart.

² Zillich, 1991, S. 8.

³ Zillich, 1991, S. 10.

⁴ Zillich, 1991, S. 12.

⁵ Zillich, 1991, S. 13.

⁶ Zillich, 1991, S. 35.

⁷ Zillich, 1991, S. 34-86: Zuführung von Feuchtigkeit (indirekt, direkt und als Wasserdampf; erste Belege ab ca. 1828); Feuchtigkeit und Wärme (ab ca. 19. Jh.); Feuchtigkeit und Druck (früher Nachweis 1828); Feuchtigkeit, Druck und Sverzatura (d. h. rückseitige, faserparallele Einschnitte, die mit konischen Leisten oder Kitt aufgefüllt werden; Frankreich, ca. 18. Jh.); Feuchtigkeit und mechanische Stabilisierung (fast immer mit Dünnung der Tafel verbunden) mit (starrten und beweglichen) Leistensystemen (frühes 19. Jh.), Parkettierung (ca. seit dem 18. Jh.), Aufdoppelungen (ca. seit Anfang 18. Jh.); Feuchtigkeit und Anstriche bzw. Imprägnierungen zur Einschränkung des hygroskopischen Verhaltens (1. H. 20. Jh.; frühe Quellen beschreiben Öl- und Harzanstriche, die im 20. Jh. durch transparente Überzüge verdrängt. Seit den 40er Jahren etablieren sich Wachs- und Wachs-Harz-Gemische.)

⁸ Zillich, 1991, S. 87-106: Moderne Verfahren ergänzen und erweitern die Historischen laut Zillich (1991) um alkoholische Quelllösungen (erste Versuche Ende der 40er Jahre); Feuchtigkeit und Balsaparkett (nach Buck 1967); Feuchtigkeit, Unterdruck und Wärme sowie Feuchtigkeit und beschichtete Leinwand.

Die meisten dieser Eingriffe in die Substanz haben sich später als problematisch und als Quelle für weitere Schäden erwiesen⁹. Durch Umgang mit den Sekundärfolgen (z. B. Dünnungen und Abnahme einer starren Parkettierung als Rückrestaurierung) gab es vor allem im dt. sprachigen Raum eine starke Tendenz zu weniger invasiven Verfahren und hin zu präventiven Maßnahmen. Eine Rückformung erfolgt dann z. B. durch Behandlung in Klimazelten und anschließende Aufbewahrung in Klimavitrinen.

Erst wenn die Krümmung eine Gefahr für ein Kunstwerk darstellt, soll sie behandelt werden; wobei große Unsicherheit bezüglich der richtigen Maßnahmen besteht. Dies liegt zum einen an fehlenden Langzeitwirkungen (z. B. Quelllösungen, Balsaparkett,...), aber auch der Gefahr vor Verlust der originalen Substanz (z. B. Parkettierung, Einschnitte, Druckverformung,...).¹⁰ Laut Zillich (1991, S. 124) gibt es keine vollkommen unbedenkliche Methode. Im internationalen Vergleich wird deutlich, dass diese konservative Einschätzung vor allem im deutschsprachigen Raum zutrifft.¹¹

Auffällig ist, dass sich nicht alle Holztafelbilder gleichermaßen verformen. Die verschiedenen Einflüsse bei der Verformung von Holz sind äußerst komplex und überlagern sich z. T. gegenseitig, was eine genaue Schadensursache oder Vorhersage des Materialverhaltens erschwert. Zu den Einflussfaktoren zählen u. a.

- ⇒ Umgebungsbedingungen (u. a. Klima (Temperatur und Feuchtigkeit und Ausmaß der Schwankungen), Licht, Zugluft, Hängung (Wandabstand, Wandbeschaffenheit),
- ⇒ Tafelbild (u. a. Holzart, Holzfehler, Brettschnitt und Jahrringorientierung, Zusammensetzung der Bretter, Stabilisierungsmaßnahmen (z. B. Gratleisten, Rahmung o. ä.), einseitige Bemalung, kunsttechnologische Zusammensetzung der Vorder- und Rückseite (Grundierung, Malerei, Überzüge, Bindemittel, Pigmente, Kaschierungen aus Textil o. ä.) Größe, Dicke, Gewicht, Alter, ...)
- ⇒ Objekt- und Restaurierungsgeschichte (häufig un- oder nur z. T. bekannt)

Ein DFG-Projekt „Strukturelle und technologische Untersuchungen an verwölbten und verformten Tafelbildern und deren Begradigung“ (Dreiner et al. 1994) blieb leider unveröffentlicht.¹² In einer Untersuchung der Deformationen für 301 Einzelbretter ließen sich (mit einer Ausnahme) keine Zusammenhänge anhand der Messdaten nachweisen. 278 Fälle (Mehrzahl auf der rechten Seite bemalt, wenige links bemalt) zeigten jedoch eine konvexe Verwölbung auf, wodurch die einseitige Bemalung als maßgeblicher Einflussfaktor definiert werden konnte.¹³ Die Autoren beschreiben anhand der Häufigkeitsverteilung, dass große Klimaabweichungen ausgeprägte Verwölbungen und geringe Klimaschwankungen geringe Verwölbungen erzeugen; letztere sind zumeist temporär.¹⁴ Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener Malmaterialien auf die technologischen Holzeigenschaften untersucht. Signifikante Einflüsse von Leim-, Öl- und Eianstrichen werden über Elektronenmikroskopische Untersuchungen zum Eindringverhalten, Biegeprüfung der mechanischen Eigenschaften und Sorptionsversuche als Ursache für eine Verwölbung ausgeschlossen.¹⁵ Ein relevanter Einfluss der Beschichtung auf den Feuchtehaushalt in der Tafel lässt sich nicht ausschließen. In ihrer, dem Projekt zugehörigen, Diplomarbeit beschreibt Hartl (1996, S. 72), dass dünne Tafeln schneller und mit großen – temporären - Verwölbungen auf kurzfristige Schwankungen reagieren; dabei

⁹ Während Wolters (1952) in der Umfrage „Über die Behandlung hölzerner Bildträger“ der Bayerischen Staatsgemäldesammlung evaluierte, dass noch verschiedene Arten der Befeuchtung zur Begradigung (Feuchte Unterlagen, direktes Bestreichen mit Wasser, indirekte Befeuchtung in Klimazelten, Begradigung unter Druck und z. T. nachträgliche Stabilisierungsmaßnahmen (z. B. Parkettierungen, Teilübertragungen, Aufdoppelungen und z. T. Einschubleisten) sowie Rückseitenanstriche (z. B. Wachs, Schellack) und nichtwässrige Quellmittel.) angewendet wurden, zeigte sich ein Rückgang der Eingriffe in der von Zillich (1992) wiederholten Umfrage. Die historischen Methoden der Begradigung wurden zwar z. T. erweitert (z. B. Balsaholzaufdoppelungen), die Zahl der Anwendung nahm allerdings stark ab. Etabliert hatte sich eine prophylaktische Behandlung über Druckroste, im Rahmen hinterlegte Klimapuffer (z. B. Holz- oder Werkstoffplatten) und Klimastabilisierung. Außerdem werden Verformungen nun eher toleriert und Zierrahmen entsprechend der Druckverformung angepasst. Museen arbeiten dabei mit Klimavitrinen für empfindliche Stücke; in der Denkmalpflege sollen rückseitige Belüftung der Altäre, Altarumstellung und andere Klimamaßnahmen die Bewegung beschränken. Zillich schlussfolgert, dass der ästhetische Nutzen einer Begradigung bei den befragten Institutionen nicht mehr im Verhältnis zu den Risiken steht. Stattdessen werden Bedingungen geschaffen (u. a. Klimakontrollen), welche die Bewegung hindern oder innerhalb tolerierbarer Grenzen halten und bereits vorhandene Verformungen stabilisieren sollen.

¹⁰ S. 116-123.

¹¹ Insbesondere in Italien, den Niederlanden und Amerika sind flexible Stützsysteme und größere Restaurierungseingriffe etabliert und werden stetig weiter verfeinert. Häufig handelt es sich dabei auch um Rückrestaurierungen (z. B. von Parkettierungen) und Umgang mit den Sekundärfolgen (z. B. Dünnungen). Ein Austausch der internationalen Techniken und Erfahrungsberichte erfolgt u. a. über Tagungen wie der „Panel Painting Initiative“ (Symposium "The Structural Conservation of Panel Paintings", 1998 / Symposium „Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, an Training“, 2009) sowie den Nachfolge-Projekten „The Conservation of panel paintings and related objects“ (2013, aufbauen auf den Ergebnissen der Panel Painting Initiative) und Wood Science and Technology I – III (I: Conference on wood science and technology, 2014 / II: Microclimates for Panel Paintings 2016 / III: methods to examine panel paintings and their preventive and remedial conservation, 2023).

¹² Dreiner, K., Klein, P., Zillich, I. (1994). Untersuchungen zur Verwölbung an Tafelbildern. Abschlussbericht DFG-Projekt Kl900/1-3. Unveröffentlicht.

¹³ Dreiner et al. (1994), S. 28-29.

¹⁴ Dreiner et al. (1994), S. 30.

¹⁵ Dreiner et al. (1994), S. 33-43.

ist insbesondere die Malschicht gefährdet. In dicken Tafeln hingegen entwickeln sich Spannungen durch Feuchtegradienten, die zu höheren, plastischen und irreversiblen Verformungen führen. Der langsame Aufbau einer solchen Verformung sei für die Malerei weniger schädigend.¹⁶

Legrum (1992) beschreibt zwei Prozesse der Oberfläche bei Temperaturerhöhung. Während in der oberflächennahen Zone ein Schwinden durch Austrocknung erfolgt, gibt es gleichzeitig eine thermische Ausdehnung durch die Wärmezufuhr. Bei kurzer Erwärmung spielt sich dies vorwiegend in der Malschicht und im Kreidegrund ab, da Holz eine schlechte Leitfähigkeit besitzt.¹⁷

Mecklenburg et al. (1994)¹⁸ untersuchen die Reaktion von bemaltem Holz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Materialeigenschaften (Holz, Grundierung, Malerei, Überzüge,...). Die Ergebnisse zeigen¹⁹, dass Kunstwerke aus feuchter Umgebung häufig Schäden in kontrolliertem Museumklima erleiden und das es auch bei gleicher Holzart große Unterschiede im mechanischen Verhalten (z. B. Steifigkeit, Festigkeit) gibt; dies jedoch nicht unbedingt einen Einfluss auf die Streckgrenze und plastische Verformung hat.²⁰

Je höher die Konzentration von Füllstoff in einer Grundierung ist, desto schwächer, steifer und weniger formstabil ist sie. Bei Grundierungen mit niedrigerem Füllstoffanteil nimmt die Belastbarkeit mit steigender Luftfeuchtigkeit stark ab und es setzt ein Kraftverlust ein. Allerdings sind die Belastungen bei niedriger Luftfeuchtigkeit noch höher. Dennoch können Grundierungen mehr Schwankungen ertragen als die anderen Materialien²¹; Ein Bereich zwischen 28 und 66 % r F wird als Verträglich angesehen.²² Weitere mechanische Tests wurden an Farben durchgeführt; die sehr unterschiedlich reagierten.²³ Abschließend stellen Mecklenburg et al. (1994) fest, dass Schäden unter bestimmten Umständen wahrscheinlicher eintreten²⁴:

- ⇒ Hoher Anstieg der r F: Risse (parallel zur Holzmaserung, in Längsrichtung)
- ⇒ Senkung der r F: Risse (quer zur Faser); Kompression der Grundierungs- und Farbschichten (Spaltungen und Rillen; parallel zum Substrat)
- ⇒ Ein Gemälde, das bei extrem hoher oder niedriger r F in eine Ausgleichsfeuchte kommt, nicht auf einen moderaten Wert zurückgeführt werden kann, ohne Schäden zu verursachen.
- ⇒ Für die strukturelle Stabilität ist ein Bereich zwischen 45 – 55 % r F ideal, da fast alle Materialien dabei die geringsten Dimensionsänderungen durchlaufen.

Die Ergebnisse werden kritisch betrachtet, da es Holzarten gibt, deren Materialeigenschaften sich stark unterscheiden. Außerdem wurden die Kennwerte an kleinen, fehlerfreien und neuen Holzproben ermittelt und auch bereits vorhandene Spannungen, eingebrachte Restaurierungsmaterialien, rheologisches Verhalten und Änderungsgeschwindigkeit der relativen Luftfeuchte wurden bisher nicht berücksichtigt.

Auf internationaler Ebene wurde der Bedarf an Konservierungsstrategien für Holztafelgemälde von der **Getty Foundation, dem Getty Conservation Institute und dem J. Paul Getty Museum** im Projekt **„Panel Painting Initiative“** aufgegriffen. **1995** präsentierte das Getty sein erstes Symposium *"The Structural Conservation of Panel Paintings"*, welches sich mit einer Vielzahl von Themen, darunter Holzwissenschaft und -technologie, Geschichte der Plattenherstellung, Tafelrestaurierung sowie

¹⁶ Hartl, L. (1996). Verwölbung von Gemäldetafeln. Orientierende Untersuchungen zu Ursachen und Mechanismen. Diplomarbeit. Hamburg: Universität Hamburg, Fachbereich Biologie.

¹⁷ Legrum, J. (1992). Untersuchung über das Temperatur- und Feuchteverhalten von Holztafelbildern. Institut für Steinkonservierung in Hessen, Rheinland-Pfalz und im Saarland e. V. S. 53.

¹⁸ Mecklenburg, Marion F., Tumosa, Charles S. und Erhardt, David. (1994). Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity. In: Painted Wood: History and Conservation. Proceedings of a symposium organized by the Wooden Artifacts Group of the AIC, 11.-14. November 1994, Williamsburg, Virginia. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

¹⁹ Es wurden mechanische Tests (Beanspruchung bis zu plastische Verformung und Beanspruchung bis zum Bruch) verschiedener Holzarten bei 22°C durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen anhand von eingespanntem Pappelholz (Tangentialschnitt), dass eine bei 50 % r F fixierte Probe bei der Aufwechtlung auf 80 % r F plastische Verformungen und Kompressionsschäden (= Kürzung) erfährt. Wird es nun ausgetrocknet, folgen innere Spannungen. Schon bei 81 % ist seine Spannungsnachgiebigkeit erreicht; bei einer Rückkehr auf die ursprünglichen 50 % r F wird es wahrscheinlich reißen.

²⁰ Mecklenburg et al., 1994, S. 464-471. Bei ca. 70 % r F schrumpfen (Pappel-) Holz und (Hasen-) Hautleim in gleichen Anteilen. Erst bei 35 – 60 % schrumpft und quillt Leim schneller als das Holz. Bei ca. 68 % r F wird der Koeffizient des Holzes größer als der des Klebstoffes und ersteres setzt den Leim unter Spannung. Mecklenburg et al., 1994, S. 472-474.

²¹ beispielsweise kann eine Grundierung im Versuch von 50 % r F auf 26 % getrocknet werden, ohne zu reißen und erst bei 76 % r F erfolgt eine Kompression. Der Schwellungskoeffizient von Pappelholz und Grundierung ist von 40 – 60 % r F annähernd gleich (sie quellen und schrumpfen relativ wenig); unter sowie über diesen Grenzen gibt es starke Abweichungen. Trocknung führt zu starken Druckspannungen der Grundierung; bei 50 – 80 % r F kann die Grundierung sogar reißen.

²² Mecklenburg et al., 1994, S. 474-476.

²³ Generell verringert die Erhöhung der r F die Festigkeit einer Farbe, erhöhte jedoch die Bruchfestigkeit. Eine Senkung der r F erhöhte allerdings die Festigkeit und verringerte die Bruchfestigkeit. Die Dimension der Ölfarben reagiert dabei weniger auf die Änderung der Feuchtigkeit als Hautleim oder Holz. Mecklenburg et al., 1994, S. 477-479.

²⁴ Mecklenburg et al., 1994, S. 482.

aktuellen Ansätzen zur Konservierung befasste. Die Klimatisierung war dabei noch kein etabliertes Forschungsfeld, sie wurde in nur zwei von 31 Artikeln (Zusammenfassung im Anhang) thematisiert. Diese boten jedoch eine gute Grundlage, für die 2009 weiterentwickelte Panel Painting Initiative.

1. **Jørgen Wadum: „Microclimate Boxes for Panel Paintings“ (1998)**
2. **Buck Richard: „The Development and Use of the Balsa Backing for Panel Paintings“ (1998)**

Wadum beweist, dass die weit verbreitete Sorge, Zellen gealterten Holzes würden „ermüden“ und keine Feuchtigkeit in großem Ausmaß wiederaufnehmen können, unbegründet ist. Außerdem werden wichtige Grundlagen zu den Zusammenhängen von Holzart und -Volumen mit Feuchtigkeit erarbeitet. Buck beschreibt darüber hinaus das allgemeine Verhalten von Bewegung in Abhängigkeit zur Feuchtigkeit, die ohne weitere Untersuchungen unvorhersehbar und schlecht steuerbar scheint. Die Erkenntnisse zeigen, wie wichtig systematische Versuche sind, um diese Phänomene einschätzen und kontrollieren zu können.

In Italien setzten sich Restauratoren spätestens seit Mitte des 20. Jh., aufgrund der Flutkatastrophe 1966 in Florenz, intensiv mit der Restaurierung von Kulturgütern auseinander, die durch Wasser, Schlamm, Motorenöl und anderes nass, beschädigt und oder verformt wurden. Freiwillige aus aller Welt unterstützten das Opificio pietre dure als „mud angels“ bei der Rettung und Konzeptentwicklung für die darunter befindlichen 320 Tafelbilder. **2006 und 2016**²⁵ fassten die Experten einige ihrer Erkenntnisse zusammen²⁶ und kritisieren, ca. 40 Jahre später, auch einige der Entscheidungen, die damals aus der Not heraus und aufgrund fehlender Langzeit-Erfahrungen, getroffen wurden. So war beispielsweise eine der gravierendsten, dass die Trocknung der Tafelbilder so schnell (innerhalb 1 Jahres) und vereinheitlicht für alle durchgeführt wurde; zudem ohne vorherige Messungen oder eine Dokumentation der Veränderungen. Insgesamt handelt es sich hierbei jedoch um den umgekehrten Prozess, nasses Holz zu trocknen und nicht wie in diesem Projekt trockenes Holz wieder zu befeuchten.

2009 wurden, u. a. darauf aufbauend, die jüngsten Entwicklungen in der Forschung und Konservierung von Tafelbildern, die von spezifischen Behandlungskonzepten bis zu artverwandten Ausstellungsfragen reichten, im Symposium „Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, an Training“²⁷ der **Panel Painting Initiative** behandelt. Auch hier – in dieser umfangreichen und fundierten Sammlung des Wissensaustausches – befassen sich wieder nur vier von gesamt 35 Artikeln (Zusammenfassung im Anhang) mit den klimatischen Bedingungen und Einflüssen auf Holztafeln.

1. **Monfardini PierPaolo: “Structural and Climate Control Systems for Thinned Panel Paintings” (2009)**
2. **Sozzani Laurent: “Microclimate Vitrines for Panel Paintings: An Update” (2009)**
3. **Kozlowski Roman, Bratasz Lukasz, Lasyk Lukasz, Lukomski Michal: „Allowable Microclimativ Variations for Painted Wood: Direct Tracing of Damage Development” (2009)**

Monfardini beschreibt historische Techniken zum Schutz vor Bewegungen am Holz durch Klima, die gleichzeitig auch hohes Schadenspotenzial durch Spannungen und Verstärkung negativen Materialverhaltens aufweisen. Sozzani untersuchte Mikroklimavitrinen in Bilderrahmen und Möglichkeiten zur Feuchtepufferung, wobei sich am Ende die Frage nach ihrer Langzeitanwendung,

²⁵ Structural conservation of panel paintings at the Opificio delle pietre dure in Florence (2016) und Panel Paintings. Technique and Conservation of Wood Supports (2006).

²⁶ 10 Tage nach der Flut wurden die Bilder bei 95 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert (die Restauratoren gingen davon aus, dass die Schrumpfung des Holzes bei unter 30 % rF beginnen wird). Zuerst wurden die Malschichtoberflächen mit Japanpapier, später sogar mit Taschentüchern und Paraloid® B-72 kaschiert und notgesichert; anschließend wurden Fungizide (5 % Nistatina) aufgebracht, um Schimmelbildung zu vermeiden. Durch die maximale Ausdehnung der Holztafeln bei 100 % Feuchtigkeit war die Malschichtoberfläche zu diesem Zeitpunkt perfekt flach und niedergelegt. Rückseitige Parkettierungen und Gratleisten wurden später an einigen Tafelbildern abgenommen (Dez. '66). Dies stellte sich als drastische Entscheidung heraus, da sich die Tafeln im Laufe der Trocknung umso mehr verformten und schüsselten bzw. die Klebstoffverbindungen sich komplett lösten und einzelne Holzbohlen sich trennten. Die stückweise, aber zügige Verringerung der relativen Luftfeuchte erreichte im Frühjahr 1967 30 – 12/11 %, wodurch starke Formänderungen begannen, die später zu gravierenden Rissen, Malschichtablösungen u. weiteren Konservierungsproblemen führten.

²⁷The Getty Conservation Institute, Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.). (2009). Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training. Proceedings from the symposium [...]. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

aufgrund der geringen Luftzirkulation Kondensations- und Schimmelprobleme oder Ausblühungen, stellt; die noch nicht beantwortet werden konnte. 1998 wurden von Kozlowski et al. Untersuchungen zur Quantifizierung der mechanischen Eigenschaften und Schwellungsreaktion von Materialien, aus denen bemalte Holzobjekte gebildet sind, durchgeführt. Als Fazit wurde festgestellt, dass die Beurteilung des Ausmaßes der relativen Luftfeuchtigkeitsschwankungen, die erforderlich sind, um die Quellung oder Schrumpfung kritisch zu belasten, dringend weitere experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen braucht.

2012 werden in der Münchner Konferenz „Climate for Collections. Standards and Uncertainties“ (2013) verschiedene Herausforderungen und Fortschritte präsentiert. In Bezug auf Holztafelbilder ist insbesondere folgender Beitrag von Interesse:

1. Łukasz Bratasz: Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines

In Bezug auf bemalte Holzobjekte wirkt sich klimatischer Stress nicht nur auf die Bildschicht aus. Vor allem das Holzsubstrat reagiert, wenn es in seiner Bewegung eingeschränkt ist oder mit gegenseitiger Orientierungen zu seiner Faserrichtung verbaut ist. Gerade bei ungleichmäßiger Feuchtigkeitsdiffusion und –verteilung reagiert Holz mit inneren Spannungen und ungleichmäßigen Reaktionen. Die niedrigere Durchlässigkeit für den Feuchtefluss durch die einseitige Bemalung ist ein weiterer Faktor. Diese Bewegungseinschränkungen können zu Verformungen und Rissen im Holz führen sowie Rissbildung und Abplatzungen der Bildschicht verursachen.

Darüber hinaus gibt es weitere hilfreiche Beiträge, die sich mit den verschiedenen Aspekten des Klimas und seiner Auswirkungen beschäftigen: Beiträge von Schulze (2013), Eibl & Burmester (2013) und Holl (2013) beschreiben u. a. die Auswirkungen der (musealen) Klimakorridore auf historische Raumsituationen sowie Kontrollstrategien bzw. Vergleiche davon. Zu Simulationen äußern sich Broström et al. (2013), Dionisi-Vici et al. (2013); zu Zukunftsperspektiven schreiben Lankester et al. (2013) sowie Leijonhufvud et al. (2013). Ryhl-Svendsen et al. (2013) berichten über Solarenergie- und Klemm (2013) über passiv konditionierte Depots. Luxford et al. (2013) erläutern wie hilfreich ein Monitoring sein kann und Bichlmair et al. (2013) stellen eine Monitoring Methode für Klimaschwankungen vor.

In der **Research Agenda „The Conservation of panel paintings and related objects“ von 2014** – 2020 (NWO, 2014) veröffentlichen 30 Spezialistinnen und Spezialisten, aufbauen auf den Ergebnissen der Panel Painting Initiative, eine Zusammenstellung des Standes des Wissens sowie offene Themen und -Fragen für zukünftige systematische Forschungsprojekte. Über die nächsten sieben bis 10 Jahre sollen die Kernforschungsthemen folgende Punkte beinhalten: Hygromechanische Eigenschaften von alterndem Holz in Tafelbildern; Interlaminare Spannungen und Schadensmechanik, die auch die Malerei beeinflusst; Adhäsionsverlust unter den Malschichten; Klebmittel mit geeigneten chemischen und physikalischen Eigenschaften; zerstörungsfreie Tests und Entwicklung von theoretischen Methoden.

Die **Fachtagung des VDR zur „Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden“ (2015)** in Dresden präsentierte den Forschungsstand der geschichtlichen Entwicklung, der Erhaltung bis hin zur heutigen Herangehensweisen in der Restaurierung aus Deutschland, Österreich, der Schweiz und Luxemburg. Der geschichtliche Abriss zeigte erneut, dass aufwendige restauratorische Eingriffe keine Seltenheit waren. So z. B. Format- und Konstruktionsänderungen, Stabilisierungsmaßnahmen wie das Aufleimen von Querleisten, Rückseitenanstriche, Behandlungen mit Lösemitteln oder Dünnungen des Trägers sowie Schädlingsbekämpfung und Stützsysteme (Parkettierung); die bis ins späte 19. Jh. vielerorts durchgeführt wurden und sich später zumeist als kontraproduktiv für den Erhalt erwiesen.²⁸ Mit den klimatischen Umgebungsbedingungen und Auswirkungen auf Holztafelgemälde befassten sich erneut nur vier der zahlreichen Artikel und Vorträge (Zusammenfassung im Anhang).

1. Christoph Schölzel: „Die Bewahrung und Restaurierung von Holztafelgemälden in der Geschichte der Gemäldegalerie Dresden“

²⁸ Gleichnamiger Tagungsband, Beiträge von Karl, Daniela: „Zur Restaurierungsgeschichte des Holzbildträgers von Florentiner Gemälden in der Alten Pinakothek München“ (S. 14-28) sowie Schölzel, Christoph: „Die Bewahrung und Restaurierung von Holztafelgemälden in der Geschichte der Gemäldegalerie Dresden“ (S. 29-49).

2. **Gina Gurgul** „*Temporäre Klimatisierung zur Unterstützung restauratorischer Maßnahmen*“
3. **Simone Habaru, Muriel Prieur, Jean-Albert Glatigny:** „*Sturmlandschaft mit Klimaschock*“
4. **Benjamin Rudolph, Dorita Žvinyte:** „*Ein Ausgleichsparkett aus Balsaholz – ein Fallbeispiel*“

Diese bilden abermals wichtige Grundlagen und Basiswissen ab, behandeln Fallbeispiele, können aber noch keine Quantifizierung anhand von systematischen Testreihen und Messergebnissen oder Orientierung für weitere Kulturgüter bieten. Zudem beziehen sich die Beispiele – wie jene der Panel Painting Initiative – auf den musealen Bereich. Die hier vorliegenden Herausforderungen in der Denkmalpflege²⁹, unterscheiden sich jedoch erheblich von dauernd genutzten und klimatisierten Ausstellungsräumen in Museen. Wichtig sind erneut die Erkenntnisse, dass auch historische Holztafeln über Befeuchtung wieder ausgedehnt werden können, und diese Maßnahmen durch definierte Bedingungen nachhaltig sein können.

Der aktuelle Forschungsstand zum klimatischen Gefährdungspotenzial **in Deutschland** wurde in der **Tagung „Klimazone Kirche – Präventive Konservierung der Ausstattung“ (2019)** sowie im **HAWK Hornemann Online Kurs „Klima in Kirchen“ (2020)** erneut zusammengefasst. Die Tagung zeigte, dass der Forschungsstand zur präventiven Konservierung beweglicher Ausstattungsstücke in der Denkmalpflege - hinsichtlich Raum- und Mikroklimata – erschreckend schlecht ist³⁰. Die in der Berufspraxis oftmals „spekulativ getroffenen Entscheidungen“ stellen wie beschrieben „einen Balanceakt zwischen Kirchennutzung, energieeffizientem Heizen und Erhalt der kulturhistorisch bedeutenden Ausstattung“ dar. Die historischen klimatischen Veränderungen und ihre Auswirkungen auf Kunstwerke beschreibt Marc Peez in seinem Vortrag „*Raumklima in Kirchen gestern und heute – Fallbeispiele aus dem Rheinland*“, wobei der Mangel an fundierter Forschung zum Umgang mit solch extremen Klimasituationen und Trockenheit sowie den entstandenen Schäden an den Kulturgütern erneut auffällt. Auf den wertvollen Erkenntnissen weiterer Vorträge zu „*Klimamessung in Kirchen*“ (Birkenbeul & Lohse), „*Klima-Monitoring*“ (Reeb & Garrecht), „*Raumklima und Klimawirkung in Kirchen*“ (Kilian, Bichlmair & Brandl) sowie jenen der zuvor genannten Beispiele „*Celler Schlosskapelle*“ und „*Schlosskapelle Augustusburg*“ kann im Forschungsprojekt aufgebaut werden. Erstere fassen allgemeine Informationen zur Messtechnik zusammen, bieten jedoch noch keine konkreten Ablaufpläne oder erläutern das Zusammenspiel der Messgrößen, die extrapoliert werden können. Insgesamt wird klar, wie wichtig ein möglichst stabiles Raumklima ist, sofern erträgliche Klimawerte eingehalten sind und dass dies wesentlich zur Erhaltung der Ausstattungsstücke beiträgt. Wo bisher erfahrungsgemäß eher eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit herrschte, ist die vermehrt auftretende niedrige Luftfeuchtigkeit – im Zusammenhang mit dem anthropogen induzierten Klimawandel – in Kirchen noch nicht tiefergehend behandelt und somit ein wichtiges, noch unerschlossenes Forschungsfeld. Die genannten Fallbeispiele in Celle und Augustusburg zeigten auf, wie wichtig ein optimiertes und langfristig ausgelegtes Raumklima- und Nahfeldklimamonitoring mit speziellen Materialfeuchtemessungen ist.³¹ Diese Erkenntnisse werden im vorliegenden Projekt genutzt, um die zur Verfügung stehende, geringe Messzeit optimal auszunutzen. Auch können die Ergebnisse aus einem Kirchenraum ohne eine Raumluftkonditionierung wie in Augustusburg genutzt werden, um den konditionierten Raum in Freising besser einzuschätzen und Auswirkungen auf das Tafelbild zeitlich besser einzugrenzen zu können.

Im Gegensatz zur Tagung bot der **Online Kurs** nur bedingt Hilfestellung: es wurden zwar auch hier Geräte für das Monitoring und die Raumluftbefeuchtung theoretisch vorgestellt, diese können aber die oft vorliegenden, wesentlich tiefergreifenden Problematiken nicht ausreichend bedienen³². Die empfohlenen Heizsysteme (Warmluft-, Wand-, Fußboden-, Zentral-, Strahlungs- und Bankheizung)

²⁹ wo museale Klimawerte oft nicht einzuhalten und auch technische, finanzielle und personelle Möglichkeiten begrenzt sind sowie die dort herrschende, mangelnde Kontinuität der Umgebungsbedingungen.

³⁰ Aufgrund der häufig exponierten Lage, unterschiedliche bauphysikalische Gegebenheiten der historischen Gebäude, Nutzungsverhalten, energetische Abdichtungsmaßnahmen, unregelmäßige Klimatisierung durch Beheizung, Lüften und Besucherverkehr, u. v.m., aus „Klimazone Kirche“ (2019), u. a. S. 11-12.

³¹ Erst durch die jahrelange Klimaerfassung konnten Schäden an Altar und Rahmung einem unzureichenden Raumklima zugeschrieben werden.

³² Der Umfang der Befeuchtung ist bisher nicht untersucht; das bloße Einstellen von Befeuchtungsgeräten ohne Klimakorridor und die Beratung durch Fachexperten ist nicht ausreichend; bietet stattdessen neues Schadenspotenzial (Schimmel und Kondenswasser) durch unsachgemäße Handhabung.

werden in der Denkmalpflege höchst kritisch betrachtet und eignen sich Großteils nicht für den Einsatz nach konservatorischen und restauratorischen Anforderungen³³. Die Handlungsempfehlungen, beispielsweise zum Lüften und Heizen in Kircheninnenräumen, sind in der Theorie zwar sehr nützlich, scheitern jedoch in der Praxis oft an der verlässlichen Umsetzung, wie die Klimawerte und der Zustand vieler Ausstattungsstücke drastisch aufzeigen.³⁴

Seit März 2020 wird von der DBU das Vorhaben „**Schadensrisiko für Kulturgut aufgrund zu geringer relativer Luftfeuchte in Innenräumen von national wertvollen Kulturgütern. Analyse und Empfehlungen zum Umgang hinsichtlich der Auswirkungen der globalen, anthropogenen Klimaerwärmung**“ gefördert [Kurzbezeichnung „Kleiner 40“ (AZ 35598)]. Inhalt sind die klimatisch bedingten Veränderungen durch Trockenheit in Innenräumen sowie die daraus resultierenden Schäden. Anhand einer Umfrage und dreier Fallbeispiele in Sachsen und Sachsen-Anhalt werden die Auswirkungen des Raumklimas auf die historische Ausstattung untersucht. Dabei konzentriert sich das Projektteam vorrangig auf Gebäude - eine aktive Raumklimabeeinflussung ist nicht Gegenstand des Projektes. Das hier vorliegende Projekt setzt hier an und entwickelt die aktive bzw. passive Beeinflussung des Mikroklimas einer Raumsituation, um optimale Umgebungsbedingungen für das Kulturgut herzustellen, weiter. Das bestehende Schadenspotenzial des aktuellen Raumklimas und seine Veränderungsprozesse am Ausstattungsstück sind hierbei bereits nachgewiesen und sollen nun gezielt rückgeführt werden.

Im Projekt **“Virtuelle Experimente für Kunstobjekte – VirtEx” (2020, TU Dresden)**, in der es um die Eingrenzung klimabedingter Veränderungen an Kunstgut in natürlicher Umgebung mit Hilfe numerischer Simulationen geht, werden historische Holztafelbilder (Ikonen) des 19. Jh. erforscht und die Spannungsentwicklung im Holz unter schwankender relativer Luftfeuchte untersucht. Das Alter und die Größe der Ikone sind allerdings nicht mit großformatigen, national wertvollen Holztafeln vergleichbar, an denen schon eine Anbringungen der 150 Messpunkte zur 3D Erfassung nicht ohne Schäden möglich wäre. Das Forschungsprojekt beschäftigt sich weiter vorrangig mit der Einschätzung der Feuchteentwicklung und Bewegung an Holztafeln über Logarithmen und Computersimulationen. Es soll zudem überprüft werden, inwieweit mathematische Simulationen die Reaktion eines Originales tatsächlich vorhersagen können.

Zusammenfassung einiger Abstracts:

Panel Painting Initiative: *The Structural Conservation of Panel Paintings, Proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum (Symposium 1995, Veröffentlichung 1998) & Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training (2009)*

1. Wadum Jørgen: „Microclimate Boxes for Panel Paintings” (1998)

Versuche zum hygrokopischen Verhalten verschiedener Holzsorten zeigten, dass die Bewegung eines neuen Eichenbrettes analog zu jenen eines Brettes aus dem 17. Jh. erfolgen. Außerdem wurde in Experimenten mit Buche (Hartholz) und Kiefer (Weichholz) deutlich, dass das Hartholz eine etwas höhere Feuchtigkeitsänderungsrate und dementsprechend größere Bewegungsänderungen als Weichholz aufweist. Außerdem reagieren dünne Holzflächen schneller als dicke und je höher die Temperatur ist, desto schneller ist die Rate des Feuchtigkeitsaustausches. Letztere ist ebenfalls schneller, je höher die relative Luftfeuchtigkeit ist. Die klimatischen Schwankungen ändern zudem die Steifigkeit bzw. Festigkeit der Malmaterialien auf den historischen Holztafeln. Für das Mikroklima z. B. in Transportboxen ist die Gleichgewichtsfeuchte fast noch wichtiger als die relative Luftfeuchte, da das Verhältnis von Holzmenge zur umgebenden Luft sich im abgeschlossenen System verändert.

³³ Punktuelle Erwärmung an Ausstattungsstücken, Wärmebrücken, Schmutz- und Schimmeltransport durch Luftverwirbelung, erhöhte Gefahr der Austrocknung und somit Rissbildung und Oberflächenschäden, etc.

³⁴ Ein Kirchenpfleger / Mesner ist kein*e Restaurator*in mit naturwissenschaftlichen Fachwissen. Oftmals werden die Zusammenhänge und restauratorischen Anforderungen nicht verstanden oder das Interesse für die Kulturgüter und deren Schutz bzw. die Zeit zur Auseinandersetzung mit der vorliegenden Problematik sind nicht vorhanden. Primär zählt oft die Behaglichkeit der Gottesdienstbesucher oder Künstler*innen bei Konzerten, was nicht den Idealbedingungen für Kulturgut entspricht. Unsachgemäße Handhabung oder unwissende Versuche zur Veränderung des Raumklimas durch Belüftung oder Beheizung können bestehende Probleme drastisch verschlimmern oder sogar neue entstehen lassen.

2. Buck Richard: „The Development and Use of the Balsa Backing for Panel Paintings“ (1998)

Der Autor erwähnt, dass zahlreiche Holztafeln im ‚Fogg museum of art‘ von 1927 - 1952 mit Feuchtigkeit begradigt wurden, wobei dies über Kanäle, die in die Tafeln eingeschnitten wurden, unterstützt wurde. Darauf wurde nach der Begradigung ein Rückseitenschutz aus Balsa Blöcken, mit einer Zwischenschicht aus Wachs und Stoff (als Feuchtebarriere), befestigt. Diese Zwischenschicht wurde ab 1952 am Internmuseum Conservation Association at Oberlin College durch Glasfasertücher weiterentwickelt, wodurch die Bewegung, durch Quellung und Schrumpfung des Originales, als Reaktion auf Feuchtigkeit verhindert werden sollte. Zum allgemeinen Verhalten von Bewegung und Feuchtigkeit der Holztafelbilder wird zusammengefasst, dass Buck 1952 nachweisen konnte, dass auch gealtertes Holz seine hygroskopischen Fähigkeiten behält und dass Feuchtigkeitsbarrieren die Reaktionen zwar verlangsamen, sie jedoch nicht vollständig verhindern können. Im Holz treten dabei plastische und elastische Verformungen auf, wobei erstere nach erneuten Klimaschwankungen verbleiben, letztere jedoch reversibel sind. Buck erläutert ebenfalls, dass ein Holztafelbild in einem trockeneren Umgebungsklima rückseitig schrumpfen kann, vorderseitig jedoch geschützt von Malschicht bleibt. Wird der Träger dann befeuchtet, kann ggf. die äußere Schicht der Rückseite versucht sich auszudehnen, während der Kern, aufgrund des unterschiedlichen Feuchtigkeitsgradienten, unter Spannung trocken bleibt. Außerdem erweisen sich kurzfristige Schwankungen als schädlicher für Holztafeln.

3. Monfardini PierPaolo: “Structural and Climate Control Systems for Thinned Panel Paintings” (2009)

Monfardini zitiert Secco Suardo, der die folgenden Hauptfaktoren für die Abhebung der Malschicht auf Holztafeln sieht: der Wechsel von heiß – kalt, jener von trocken – feucht sowie folglich die Quellung und Schrumpfung des Holzes. Die hygroskopischen Eigenschaften von Holz sind schon früh bekannt und Cennini beschreibt im 14. Jh. eine altbewährte Technik, Textil- bzw. Leinwandschicht als Isolierschicht und zum Schutz vor Bewegungen zwischen Holz und Malschicht zu kleben. Später wurden verschiedenste Rückseitenbeschichtungen (z. B. Wachs, Harz oder Balsaholz) oder konstruktive Festigungshölzer auf die Holztafeln aufgebracht, um die Reaktion auf Klimaschwankungen zu verringern und eine Dimensionsstabilisierung zu erlangen. Doch gerade diese Feuchtebarrieren und Befestigungen führten zu neuen Spannungen und Schäden bis zu Abhebungen der Malschicht. Deshalb beschäftigt sich der Artikel mit einem rückseitig, non invasiv eingebrachten Puffersystem, welches den hygroskopischen Charakter der Tafel nachahmt, um die Reaktionsgeschwindigkeit der bemalten Holztafel zu verringern, sie aber nicht komplett abdichtet. In diesem Fall werden dünne Holztafeln rückseitig in den Zierrahmen einer Holztafel eingespannt und zusätzlich mit dem Puffermaterial „Art Sorb“ unterstützt. Diese Methode schützt die Holztafel nun wohl seit 2003 vor hygrothermischen Schwankungen und reduziert negative Einflüsse auf ein Minimum.

4. Sozzani Laurent: “Microclimate Vitrines for Panel Paintings: An Update” (2009)

Sozzani bezieht sich auf die Ergebnisse der Arbeitsgruppe „Research Program Microclimates: Paintings on Panel and Canvas“, 1994 in Holland sowie der Konferenz „Museum Microclimates“, 2007 in Kopenhagen. Er beschreibt verschiedene Klimavitrinen-Systeme in Bilderrahmen, deren Verwendung für Transporte eine sichere und zurückhaltende Konservierungsmethode bieten. Dennoch stellt sich für die Zukunft die Frage nach ihrer Langzeitanwendung, da aufgrund der geringen Luftzirkulation Kondensations- und Schimmelprobleme oder Ausblühungen entstehen können.

5. Kozlowski Roman, Bratasz Lukasz, Lasyk Lukasz, Lukomski Michal: „Allowable Microclimatic Variations for Painted Wood: Direct Tracing of Damage Development” (2009)

1998 wurden Untersuchungen zur Quantifizierung der mechanischen Eigenschaften und Schwellungsreaktion von Materialien, aus denen bemalte Holzobjekte gebildet sind, durchgeführt. Dabei wurden die Streckgrenzen (d. h. die Dehnungsniveaus, bei denen sich Materialien dauerhaft zu verformen beginnen) für Hölzer, Farben und Klebstoffe bei 0,4 % und für Kreidegrund bei 0,25 % definiert. Es wurde festgestellt, dass viel höhere Veränderungen - 0,9 % oder mehr - notwendig sind, um ein Versagen zu verursachen. Während diese Raten vergleichsweise niedrig klingen, zeigen Holz und Leim im Bereich von 40–60 % relativer Luftfeuchtigkeit einen dramatischen Anstieg der Reaktion im Vergleich zu weit weniger ansprechenden Kreidegrund und Farben. Die Nichtübereinstimmung in der Reaktion von Kreidegrund und Holz, insbesondere in der am stärksten ansprechenden Tangentialrichtung des Holzes, wird folgendermaßen erklärt: nach dem Austrocknen überschreitet die Schrumpfung des Holzes jene des Kreidegrundes, welcher eine Kompression erfährt. Hingegen entstehen während der Holzquellung Spannungen in der Kreidegrundsicht. Die Untersuchungen haben auch bestätigt, dass die Bewertung sehr konservativ ist, da ein Bruch bei diesen Belastungen erst nach mehreren tausend Zyklen aufgetreten ist. Die Beurteilung des Ausmaßes der relativen Luftfeuchtigkeitsschwankungen, die erforderlich sind, um die Quellung oder Schrumpfung kritisch zu belasten, erfordert weitere experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen. Die langsame Reaktion der Paneele auf kurzfristige Schwankungen und ihre übliche Verformung, welche die effektive Bewegung der dekorativen Schicht verringert, aber auch die festgestellte Entspannung des Kreidegrundes während der langfristigen Schwankungen wirken sich auf die Anfälligkeit von bemalten Holztafeln aus.

Research Agenda „The Conservation of panel paintings and related objects“ von 2014 – 2020 (NWO, 2014)

1. Alterung von Holz (S. 30)

Bis 1990 gab es in der Literatur keine Hinweise, dass die Alterung von Holz einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Holz hat. 1996 erforschte Erhardt et al. die Isotherme sowie das Verhältnis von Spannung und Dehnung. Sie fanden heraus, dass es keine nennenswerten Unterschiede zwischen neuem Holz und jenem aus dem 17. Jh. gibt. Neuere Arbeiten zeigen, dass über die Alterung chemische Änderungen entstehen, da der Anteil von Carbon, Hydrogen und Mineralsalzen sich erhöht, während der Anteil von Oxygen und Nitrogen sich verringert. Inagaki et al (2010) zeigen, dass Alterung zu einer Verminderung der Adsorptionsstellen der Hemicellulose, amorphen Cellulosemoleküle und EMC führt. Kawai et al bestätigen dies 2010 und führen es auf einen langsamen thermo-oxidativen Prozess, aufgrund von Oxygen in der Luft, zurück. Auch die Zunahme der Festigkeit und Steifigkeit sowie Abnahme der Widerstandsfähigkeit gegen Alterung (aufgrund der Reduktion von Hemicellulose und Celluloseanteile, während Lignin verbleibt. Lignin bietet zwar Druckfestigkeit – jedoch wenig Spannungsstärke sowohl parallel als auch quer zur Faserrichtung. Die erhöht die Sprödigkeit.) wird beobachtet.

2. Beobachtete Schäden an hölzernen Tafelbildern (ab S. 32)

- ⇒ Verwölbung (S. 33): Zusammenhang mit Jahrringen
- ⇒ Schrumpfung (S. 33 - 35): längs = minimal; quer zur Faserrichtung = bedeutsam. Studie der Mona Lisa (Mohen et al 2006) untersuchte Deformationen und sagte zukünftiges Verhalten voraus. Holzmaserung, Dichte, Qualität und Zellanomalien wurden nicht diskutiert.
- ⇒ Kriechverhalten (S. 35).
- ⇒ Holzbewegung und Druckverformung (S. 37): Quellen und Schrumpfen von Holz: Wadum (1998) bestätigt, dass Dimensionsänderungen in Hartholz größer ist als in Weichholz; dünnes Holz reagiert schneller als dickes und kleine Stücke reagieren schneller als größere. Bratasz et al (2010) publizierten Sorptions- und Desorptions Isotherme (inkl. zu erwartenden Dimensionsänderungen in radialer und tangentialer Richtung) für 21 Holzarten in historischen Objekten. Brewer (2000) entdeckte ein

Muster von Längsverwölbungen bei Veränderungen der rF, bei welchem sattelförmigen Verwerfungen statt zylindrischen (Schrumpfungen quer zur Faser) entdeckt wurden. New et al (2011) beobachtete Längsverformungen bei einer Längsbeschränkung, z. B. bei Parkettierung. Auch konvexe Krümmungen quer zur Faser wurden in nicht-parkettierten Tafelbildern beobachtet. Druckverformungen (bei einseitig bemalten Tafelbildern) wurden durch die asymmetrische Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit beobachtet, wobei die eingeschränkte Holzbewegung auf der Tafelrückseite zu plastischen Kompressionsschäden führt. Da sich die äußeren Holzzellen nicht vollständig regenerieren, erfolgt eine konvexe Verformung quer zur Faserrichtung.

3. Modifikationen der Holzbewegung (S. 40)

⇒ Rückseitenschutz (S. 40): Beschichtung mit Wachs, Wachs-Harz, etc. ODER Holzstreifen als rF-Puffer (Castelli, 1998. Monfardni 2011).

4. Effekt der Parkettierung (S. 41)

⇒ Unfixierte Tafeln haben die Möglichkeit zu quellen / schrumpfen. Eine fixierte Tafel kann genug Spannung aufbauen, um zu brechen (Hoadley 1998). Häufig beginnen die Brüche am Hirnholz, vermutlich zurückzuführen auf die schnelle Reaktion auf Änderungen der Feuchtigkeit.

5. Die Rolle der Klimabedingungen (S. 46)

⇒ Bratasz et al (2007a) zeigten in einer Rissmonitoring-Studie in Santa Maria Magdalena, dass Kurzzeitschwankungen (täglich) schädigender als ähnliche Langzeitschwankungen (saisonal) sind (aufgrund der niedrigeren Feuchtigkeitsgradienten). Größere, dickere Hölzer reagieren langsamer, aber mit größeren Spannungen (durch den größeren Dimensionsfluss der äußeren Holzschichten). Untersuchungen (Olstadt et al (2007) und Bratasz et al (2007b)) zeigen weiterhin die Problematik während der Beheizung von Kirchen; sie schlagen ein Zielmikroklima und weitere Untersuchungen vor. Das interdisziplinäre Projekt „Climate4wood³⁵“ der Technischen Universität Eindhoven, dem Rijksmuseum Amsterdam, der Cultural Heritage Agency of the Netherlands und der Technischen Universität Delft (2012) identifiziert die verträglichen Schwankungen für Holztafeln und entwickelt rationale Guidelines für Klimabedingungen.

Fachtagung des VDR zur „Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden“ (2015)

1. Christoph Schölzel: „Die Bewahrung und Restaurierung von Holztafelgemälden in der Geschichte der Gemäldegalerie Dresden“

1837 bemerkten Restaurator*innen der Gemäldegalerie Dresden die negativen Auswirkungen der nach Süden gelegenen Säle und verlagerten die gefährdeten Holztafelgemälde 1855 in den Museumsneubau mit beheizten Räumen. Auch hier zeigten sich die Auswirkungen der beheizten Winterluft ohne zusätzliche Befeuchtung sowie in den Sommerzeiten die angestaute Hitze, wodurch 1865 auffällig viele Farbschicht-Festigungen vorgenommen werden mussten. Das besonders betroffene Gemälde „Der Zinsgroschen“ von Tizian (1516, 75 x 76 cm) wird deshalb seit 1963/64 in einer speziellen Vitrine mit erhöhter Luftfeuchtigkeit aufbewahrt. Dabei sorgt eine gesättigte Kochsalzlösung für die notwendige Holzfeuchte bei 12 – 14 %. Des Weiteren wurde in den Haag seit 1990 eine Klimastabilisierung für Ausleihen entwickelt, die die Holztafeln in Mikro-Klimavitrinen befeuchtet hält. Als weiteres Beispiel aus der Praxis wird der Cranach-Altar (Sakralbild von Luca Cranach d. Jüngeren, 1515-1586, Schloss Augustusburg) relevant: die dortige Klimastabilisierung beruht einerseits auf der Verstärkung des Holzträgers (dickere Träger reagieren langsamer auf die Schwankungen der rel. Luftfeuchte) und andererseits auf der steuerbaren Klimapufferung über rückseitig angebrachte, klappbare Lamellen aus Zedernholz.

³⁵ <https://www.rijksmuseum.nl/en/research/our-research/conservation-science/furniture/climate4wood>

2. Gina Gurgul „Temporäre Klimatisierung zur Unterstützung restauratorischer Maßnahmen“

- A) Für ihre Abschlussarbeit wurden zwei Holztafelgemälde (1. H. 16. Jh., 62 x 45,5 x 0,4 cm und 60,5 x 45,5 x 0,4 cm, Lindenholzträger) ausgewählt, die sich seit 1922 im Depot des Diözesanmuseum Tarnow befanden. Aufgrund einer Fehlinformation wurden die Tafeln nach ihrer Ankunft im Institut für Restaurierung und Konservierung falsch klimatisiert (von einer Lagerung bei 80-90 % r.F. zu 60-65 % r.F.), wodurch sich die Tafeln stark verwölbten. Nach dem Bau einer abgedichteten Klimabox wurde die Luftfeuchtigkeit mit Silikagel und Wasser auf 80 % erhöht, wodurch die Holztafeln bereits nach zwei Wochen wieder begradigt waren. Sie wurden mit Gewicht beschwert und die Luftfeuchte anschließend langsam wieder auf 60 % herabgesetzt, was ca. 4 Wochen dauerte. Der Autorin fielen dabei keine Dimensionsveränderungen oder anderweitige Folgeschäden auf. Im Anschluss daran konnten die Restaurierungsmaßnahmen problemlos durchgeführt werden.
- B) Einige Jahre später wurde die Autorin von einer musealen Sammlung in Berlin-Brandenburg beauftragt, das niederländische Holztafelgemälde (17. Jh., 49 x 64,3 cm, Laubholzträger) von Pieter van Lint. zu bearbeiten. Aufgrund einer Marouflage (Silikonschicht und Wabenplatte, direkt auf dem Holz) war eine dachförmig aufstehende Malschicht entstanden, die auf einen zu kleinen Bildträger hindeutete. Eine Ausdehnung war notwendig, um die Malschicht zu festigen. Nach der Abnahme der Marouflage und einer Sicherung der Malschicht mit Japanpapier und 5 %igem Störleim wurde die Tafel in einer Plexiglasbox (mit seitlicher Klappe, Silikagel und Wasserwanne) konditioniert. Ziel war es, den Träger durch Trockenheit an seine ursprüngliche Wölbung („vor der gewaltsamen Planierung durch die historische Marouflage“) zurückzuführen, um mehr Platz für die Malschicht zu schaffen. Dies war bei 33 % r.F. der Fall.

Nach den Restaurierungsmaßnahmen wurde die Holztafel schrittweise durch Anhebung der Luftfeuchte stabilisiert. Laut Klimaprotokoll erfolgten bei 53-56 % r.F. keine sichtbaren Veränderungen der Tafelwölbung. Nach weiteren viereinhalb Monaten bei 53 % r.F. in der Klimabox wurde die Tafel in einem Rahmen mit vorderseitigem Glas und Rückseitenschutz an das Museum retourniert und zeigt bis heute keine negativen Veränderungen.

3. Simone Habaru, Muriel Prieur, Jean-Albert Glatigny: „Sturmlandschaft mit Klimaschock“

Das Landschaftsgemälde (1. H. 17. Jh., 38,8 x 69,6 x 0,2 cm, Eichenholzträger) von Bonaventura Peeters (Meister der Sankt-Lukas-Gilde in Antwerpen) wurde im Zuge einer Restaurierungsmaßnahme gedünnt und parkettiert. Aufgrund eines plötzlichen Abfalls der relativen Luftfeuchte im Ausstellungsraum schwand und verwarf sich der Bildträger und riss schlussendlich durch die hohe Spannung der Leisten der Parkettierung. An diesen Stellen sprang die Malschicht ab und bildete große Schollen, jedoch war der Träger nun zu klein, um diese wieder niederlegen zu können. Um das Schrumpfen zu unterbinden wurde eine Klimakabine eingerichtet, in welcher das Bild sechs Monate bei 60 % rF gelagert wurde. Die Malschicht wurde mit Japanpapier (22 g/m² mit Gelatine 2 %³⁶) kaschiert, wobei die einzelnen Schollen jeweils nur bis zum Rand hin, nicht über den Riss, beklebt wurden. Nach Abnahme der Parkettierung wurde ein provisorischer Holzrahmen (Tischlerplatte mit Ausschnitt entsprechend dem Tafelbild, 12 Holzplättchen, die als Feder fungierten) entworfen, in welchem die rF schrittweise auf 68-70 % erhöht wurde. Eine Ausdehnung trat schließlich bei 83 % rF ein und es dauerte 14 Monate, bis genug Fläche zum Niederlegen der Malschicht (Hausenblasenleim 5 %, vernetzen mit Ethanol und anschließende Wachs-Dammar-Sicherung) vorhanden war. Nach weiteren konstruktiven Restaurierungsmaßnahmen wurde eine rückseitige Doublierung mit Balsaholz (in 0,5 cm Dicke, aufgeklebt mit Bienenwachs-

³⁶ Die Trocknung des Klebmittels führte zu weiteren Spannungen, die die Malschichten anhoben und wodurch kleinste Partikel darunter mit dem Pinsel entfernt werden konnten.

Damarharz-Mischung 7:2) durchgeführt. Als Aufbewahrung diene schlussendlich eine Klimabox (ohne Puffer, mit eingelassenem Messgerät) mit minimalem Luftvolumen (in den Zierrahmen geklebtes Museumsglas (Mirogard®), Abdichtung mit Aluminiumklebeband und Rückseitiger Abschluss mit einer Polycarbonatplatte). Das Konstrukt steht nun seit 2014 in der Dauerausstellung des Nationalmuseums für Geschichte und Kunst in Luxemburg-Stadt.

4. **Benjamin Rudolph, Dorita Žvinyte: „Ein Ausgleichsparkett aus Balsaholz – ein Fallbeispiel“**

Das Tafelbild „Die Fabel vom Mund der Wahrheit³⁷“ (1534, 75,5 x 117,4 x 0,2-0,4 cm, Buchenholzträger aus vier verleimten Bohlen) von Lucas Cranach d. Älteren und Werkstatt wurde ebenfalls gedünnt und parkettiert. Trotz der konstant klimatisierten Sammlungsräume resultierten selbst leichteste Klimaschwankungen in minimalen Bewegungen der Tafel. Da die Abnahme der Parkettierung keine Option war, wurde ein Auffüllen der Zwischenräume ebendessen geplant, um die Bewegungen zu unterbinden. Die eingeschobenen Balsaholzstreifen sollen bei wechselndem Klima zur verzögerten Reaktion und Verminderung der Quell- und Schrumpfbewegung führen.

Tagung „Klimazone Kirche – Präventive Konservierung der Ausstattung“ (2019)

1. **Marc Peez: „Raumklima in Kirchen gestern und heute – Fallbeispiele aus dem Rheinland“**

Der Autor beschreibt den Werdegang der Raumklima Problematik ab 1953, wobei zuerst ein zu trockenes Klima aufgrund der Überhitzung durch Heizungen im Fokus stand. Die gravierenden Schäden an den Ausstattungsstücken begleiten die Restaurator*innen bis in die 80er Jahre, die Folgen z. T. noch bis heute. Schließlich wurde die trockene Luft durch eine zu hohe Luftfeuchtigkeit abgelöst, welche aufgrund der Umnutzung, geringen Nutzung, aber auch Baumaßnahmen wie Abdichtungen und das Einsetzen neuer Verglasungen, wodurch der natürliche Luftaustausch gestört wird. Dies hat z. T. starke Schimmelbildung zur Folge. Ein fotografisches Beispiel aus der Zeit um 1958 zeigt exakt jene Schäden, welche an Holztafelgemälden in trockenen Umgebungsklimatas – wie am Fallbeispiel Freising - ausgelöst und beobachtet werden können.

Weitere Informationen siehe auch anstehende Publikation:

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.). (2025/2026 – in print). „Das Gründonnerstagsretabel in Freising. In situ Befeuchtung und Monitoring eines großformatigen Holztafelgemäldes“. [Publikation]. In: Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege. München.

³⁷ Dauerleihgabe der Bayr. Staatsgemäldesammlung München an das Germanische Nationalmuseum Nürnberg.

Literatur

NWO (2014) = Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020. Teil der Panel Painting Initiative, AC The Hague.*

Ashley-Smith S., Burmester A., und Eibl M. (Hrsg.) (2013). "Climate for collections. Standards and Uncertainties." Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 november 2012. Munich: Archetype Publications Ltd in association with Doerner Institut, Munich.

Bichlmair, Stefan, Holl, Kristina, Kilian, Ralf. (2013). The moving fluctuation range – a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Bratasz L., Kozlowski R., Camuffo D., Pagan E. (2007a). Impact of Indoor Heating on Painted Wood - Monitoring the Altarpiece in the Church of Santa Maria Maddalena in Rocca Pietore, Italy. *Studies in Conservation* 52, no. 3, 199 – 210.

Bratasz L., Camuffo D. und Kozlowski R. (2007b). Target microclimate for preservation derived from past indoor conditions. Contributions to the Copenhagen Conference, 19 – 23 November 2007. National Museum of Denmark, Copenhagen, Denmark, 129 – 134.

Bratasz L., Koslowski R., Kozlowska A., Rachwal B. (2010). Sorption of moisture and dimensional change of wood species used in historic objects. Conference Proceedings. Wood Science for the Conservation of Cultural Heritage. 5-7 November, Braga 2008. Firenze: University Press, 11-16.

Bratasz, Ł. (2013). Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for collections. Standards and uncertainties: Postprints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November, 2012. London, Munich: Archetype Publications; Doerner Institut, 11 – 19.*

Brewer A. (2000). Effects of batten reinforcements on paintings on wood panel. Introductions and results of research on unreinforced panels. Hamilton Kerr Institute bulletin number 3, Massing, Ann (Hrsg.). University of Cambridge. Hamilton Kerr Institute, Cambridge, 41-59.

Broström, Tor, Vyhliđal, Tomas, Simeunovic, Goran, Klenz Larsen, Poul, Zítek, Pavel. (2013). Evaluation of different approaches of microclimate control in cultural heritage buildings. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Buck, R. (1998). The Development and Use of the Balsa Backing for Panel Paintings. In Dardes, K. and Rothe A. (Hrsg.), *The structural conservation of panel paintings: proceedings of a symposium at the J. P. Getty Museum, 24 – 28 April 1995, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 26.*

Castelli C. (1998). Metodo di riduzione dei movimenti dei supporti lignei dipinti. *OPD restauro: rivista dell'Opificio delle pietre dure e laboratorio di restauro di Firenze*, 10, 87 – 94.

Dionisi-Vici, Paolo, Allegretti, Ottaviano, Braovac, Susan, Hjulstad, Guro, Jensen, Maria, Storbekk, Elin. (2013). The Oseberg ship. Long-term physical-mechanical monitoring in an uncontrolled relative humidity exhibition environment. Analytical results and Hygromechanical modelling. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Dreiner, K., Klein, P. & Zillich, I. (1994). *Untersuchungen zur Verwölbung an Tafelbildern*. Abschlussbericht DFG-Projekt KI900/1-3. (Unveröffentlicht).

Eibl, Melanie, Burmester, Andreas. (2013). Learning from history. Historic indoor climate conditions and climate control strategies. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties*. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

EIBNER; 1928,

Eibner, A. (1928). *Entwicklung und Werkstoffe der Tafelmalerei*. VII u. 195 Seiten. B. Heller, München 1928. DOI: <https://doi.org/10.1002/ange.19300431019>.

Erhardt D., Mecklenburg M., Tumosa C. und Olstadt T. (1996). New versus Old Woods; Differences and Similarities in Physical, Mechanical and Chemical Properties. ICOM Committee for Conservation 11th Triennial meeting, Edinburgh Scotland, 903 – 910.

Gurgul, G. (2015). Temporäre Klimatisierung zur Unterstützung restauratorischer Maßnahmen. In Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*. 140-149.

Habaru, S., Prieur, M. & Glatigny, J. (2015). Sturmlandschaft mit Klimaschock. In: Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*. 204 – 213.

Hartl, L. (1996). *Verwölbung von Gemäldetafeln*. Orientierende Untersuchungen zu Ursachen und Mechanismen. (Diplomarbeit. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie. (Unveröffentlicht)).

Hoadley R. B. (1998). The chemical and Physical Properties of Wood. In: *The structural conservation of panel paintings: proceedings of a symposium at the J. P. Getty Museum, 24-28 April 1995*. Dardes, K. and Rothe A. (Editors). The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 26.

Holl, Kristina. (2013). Comparison of indoor climate analysis according to current climate guidelines with the conservational investigation using the example of Linderhof Palace. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties*. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Inagaki T., Yonenobu H., Tsuchikawa S. (2010). Near-Infrared Spectroscopic Monitoring of the Water Adsorption/Desorption Process in Modern and Archaeological Wood. *Conference Proceedings. Wood Science for the conservation of Cultural Heritage*. 5-7 November, Braga 2008. Firenze University Press, 199-200.

Kawai S., Yokoyama M., Matuso M und Sugiyama J. (2010). Research on the aging of Wood in RISH. *Conference Proceedings. Wood Science for the conservation of Cultural Heritage*. 5-7 November, Braga 2008. Firenze University Press, 52-56.

Klemm, Lars. (2013). Passively conditioned zero-energy storage for cultural properties and archival material. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties*. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Kozlowski, R., Bratasz, Ł, Lasyk, L. & Lukomski, M. (2009). Allowable Microclimatic Variations for Painted Wood: Direct Tracing of Damage Development. In The Getty Conservation Institute, Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.), *Panel Painting Initiative: Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training*.

Lankester, Paul, Brimblecombe, Peter, Thickett, David. (2013). The application of damage functions to future indoor climate predictions. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for*

Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Legrum, J. (1992). *Untersuchung über das Temperatur- und Feuchteverhalten von Holztafelbildern*. Institut für Steinkonservierung in Hessen, Rheinland-Pfalz und im Saarland e. V.

Leijonhufvud, Gustaf, Kjellström, Erik, Broström, Tor, Ashley-Smith, Jonathan, Camuffo, Dario. (2013). Uncertainties in damage assessments of future indoor climates. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties*. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Luxford, Naomi, Thickett, David. (2013). Monitoring complex objects in real display environments – how helpful is it? In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties*. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Mecklenburg, M. F., Tumosa, C. S. & Erhardt, D. (1994). Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity. In *Painted Wood: History and Conservation. Proceedings of a symposium organized by the Wooden Artifacts Group of the AIC*, 11.-14. November 1994, Williamsburg, Virginia. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Mohen J. P., Menu M. und Mottin B. (2006). *Mona Lisa Inside the Painting*, Abrams, New York.

Monfardni P. (2011). Structural and Climate Control Systems for Thinned Panel Paintings. In: *Facing the Challenges of Panel Painting Conservation: Trends, Treatments and Training*. Proceedings of a symposium at the Getty Centre, 17 – 18 May 2009. Phenix, A. und Chui S. A. (Editor). The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 48 – 58.

New B. und Marchant R. (2011). The Repair and Support of Thinned Panel Paintings: A Case Study in Modifying Established Techniques. In: *Facing the Challenges of Panel Painting Conservation: Trends, Treatments and Training*. Proceedings of a symposium at the Getty Centre, 17 – 18 May 2009. Phenix, A. und Chui S. A. (Editor). The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 48 – 58.

Nicolaus, K. (1998). *Handbuch der Gemälderestaurierung*. Könemann.

Olstadt T. M. und Haugen A. (2007). Warm feet and cold art: is this the solution? Polychrome wooden ecclesiastical art: climate and dimensional changes. In: *Museum microclimates contributions to the Copenhagen conference*, 19 – 23 November 2007. National Museum of Denmark, Copenhagen, Denmark, 43 – 49.

Reclam, P. (1997). *Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken 1. Farbmittel – Buchmalerei – Tafel- und Leinwandmalerei*, Stuttgart.

Rudolph, B. & Žvinyte, D. (2015). Ein Ausgleichsparkett aus Balsaholz – ein Fallbeispiel. In *Tagungsband VDR (Hrsg.), Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*.

Ryhl-Svendsen, Morten, Aasbjerg, Jensen, Lars, Klenz Larsen, Poul, Bøhm, Benny, Padfield, Tim. (2013). A museum storage facility controlled by solar energy. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties*. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Schulze, A. (2013). How the usual museum climate recommendations endanger our cultural heritage. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for collections. Standards and uncertainties:*

Postprints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November, 2012. London, Munich: Archetype Publications, Doerner Institut, 81 – 92.

Schölzel, C. (2015). Die Bewahrung und Restaurierung von Holztafelgemälden in der Geschichte der Gemäldegalerie Dresden. In Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*. (Masterarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Bauphysik).

Sozzani, L. (2009). Microclimate Vitrines for Panel Paintings: An Update. In The Getty Conservation Institute, Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.). *Panel Painting Initiative: Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training*.

Straub, R. E. (1963). Über die Erhaltung von Holztafelbildern. In Straub, R. E. (Hrsg.). *Über die Erhaltung von Gemälden und Skulpturen*. Zürich, 107 – 114.

Wadum J. (1998). Historical Overview of Panel Making Techniques in the Northern Countries. In: The structural conservation of panel paintings: proceedings of a symposium at the J. P. Getty Museum, 24-28 April 1995. Dardes, K. and Rothe A. (Editors). The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 26.

Zillich, Isabell (1991). Über das Begradigen von Holztafelgemälden. Diplomarbeit. Institut für Technologie und Malerei der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart.

Zur in situ Befeuchtung und Monitoring an anthropogen geschädigten Holztafelbildern

HANDLUNGSEMPFEHLUNG
DBU Projekt AZ 37502-01
Ausgabe: 31.08.2024



HANDLUNGSEMPFEHLUNG

zur in situ Befeuchtung und Monitoring an anthropogen geschädigten Holztafelbildern

Key Words

Kulturelles Erbe, Holztafelbild, Monitoring

Erläuterung

Diese Handlungsempfehlung entstand im Rahmen des DBU-Projekts „*Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes*“ (Laufzeit 01.01.2022 – 31.08.2024). Ziel ist es, Planungsbüros, Restaurierungsfirmen sowie Eigentümern essentielle Planungsschritte und die Vorgehensweise zur Risikoabschätzung zur Verfügung zu stellen. Der Fokus liegt auf den im Projekt gewonnenen Erfahrungen zum in situ Monitoring und der Befeuchtungen von Holztafelgemälden.

Projektleitung

BLfD: Theresa Hilger, Julia Brandt, Manuela Hörmann

Projektpartner

KDWT: Kristina Holl

TUM: Alex Fröhlich

CFA: Elise Spiegel

Erarbeitung der Empfehlung

Beginn der Arbeiten: 01.08.2023

Ende der Arbeiten: 29.05.2024

Zielgruppe

Eigentümer; Bauherren; Bauämter; Denkmalpflege (Kunsthistoriker, Restauratoren); Nutzer (z. B. Mesner, Pfarrer, Putzpersonal); Städte; Architekten; Planer

© Alle Rechte liegen bei den Erstellenden: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLfD), Praktische Bau und Kunstdenkmalpflege, A V – Restaurierung | Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT), Professur für Restaurierungswissenschaft | Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion | CARE FOR ART (CFA) | Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK). | Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung gestattet. Die Angaben der Handlungsempfehlung stützen sich auf das DBU-Projekt AZ 37502-01 [01.01.2022 – 31.08.2024] und den darin gewonnenen Stand der Kenntnisse. Die Erstellenden übernehmen keinerlei Haftung. Vorschläge oder Einwände, die gegebenenfalls bei einer Neuauflage berücksichtigt werden können, sind an das BLfD zu richten. Das Dokument findet sich auf der Homepage des BLfD. Hinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne des Gleichbehandlungsgesetzes für alle Geschlechter

1 Einleitung

Die vorliegende Handlungsempfehlung entstand im Rahmen des DBU-Projekts „*Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes*“ (Laufzeit 01.01.2022 – 31.08.2024). Ziel ist es, Planungsbüros, Restaurierungsfirmen sowie Eigentümern essentielle Planungsschritte und die Vorgehensweise zur Risikoabschätzung zur Verfügung zu stellen. Der Fokus liegt auf den im Projekt gewonnenen Erfahrungen zum in situ Monitoring und der Befeuchtungen von Holztafelgemälden. Details und weiterführende Informationen zu den einzelnen Elementen dieser Handlungsempfehlung finden sich im DBU-Abschlussbericht (Veröffentlicht auf der DBU-Homepage unter www.dbu.de).

Am DBU-Projekt waren neben dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) die Technische Universität München (TUM, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion), das Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) der Otto-Friedrich-Universität Bamberg und die restauratorische Beratungsgesellschaft „Care for Art“ beteiligt. Außerdem waren das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) und das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) im Unterauftrag tätig. Nur dieses interdisziplinäre Team ermöglichte es, ein so komplexes Vorhaben durchzuführen. Fachleute aus den Gebieten Restaurierung, Präventive Konservierung, Holzbau, Bauingenieurwesen und Materialanalytik haben eng zusammengearbeitet. Auch wenn nicht bei allen Befeuchtungsvorhaben ein so großes Team notwendig ist, sollten zumindest Fachleute aus dem Gebiet der Konservierung/Restaurierung und aus dem Bereich der Messtechnik involviert werden. Als besonders wichtig hat sich die Erforschung der Schadensursachen vorab erwiesen, die eine nachhaltige Konservierung des Objektes gewährleistet.

Viele Informationen mussten zu Beginn der Befeuchtung bereits vorliegen und wurden in einer Voruntersuchung ermittelt, welche bereits finanzielle Mittel erforderte (siehe **3 Grundlagenermittlung: Objekt und Umgebung**). Vor allem die Erfassung und Auswertung des Raumklimas über einen längeren Zeitraum (> 1 Jahr) war essentiell, um die darauffolgenden Schritte einzuleiten.

Die Befeuchtung bemalter Holztafeln ist ein komplexer Vorgang, der individuell auf das einzelne Kunstwerk abgestimmt und kontinuierlich von Fachleuten überwacht werden muss. Falsche bzw. zu schnelle Befeuchtung oder ggf. Rücktrocknung kann zu irreparablen Schäden am Kulturgut führen. Eine Befeuchtung sollte daher in jedem Fall mit restauratorischer Begleitung durchgeführt werden.

2 Anlass und Fragestellung

Anthropogene Einflüsse auf die langfristige Erhaltung von Kunst und Kulturgut

Der fortschreitende Klimawandel wirkt sich auch auf das Innenraumklima historischer Gebäude aus. In Folge zunehmender Wetterextreme gibt es sowohl deutlich trockenere als auch deutlich feuchtere Phasen im Jahresverlauf [1]. Vor allem in Gebäuden mit einer Heizung und unkontrollierter Lüftung können sich diese Effekte drastisch verstärken. Darüber hinaus verändert sich in einem zunehmenden Anteil historischer Gebäude die Nutzung, was einen starken Einfluss auf deren Raumklima bewirkt. Bei Kunstwerken aus Holz führen trockene Klimaperioden zu Volumenschwund. Daraus resultieren teils irreparable Schäden. Angesichts steigender Energiepreise und der Notwendigkeit, Ressourcen zu sparen, erscheint die kon-

ventionelle, energieaufwändige Klimatisierung historischer Räume nicht umsetzbar. Um historische Ausstattungsstücke an ihrem Ursprungsort zu erhalten, wird es in Zukunft notwendig sein, das Raumklima mit möglichst geringem Energieaufwand zu konditionieren, also in situ zu be- bzw. entfeuchten. Es wird nicht möglich sein, alle wertvollen historischen Ausstattungsstücke in Museen zu transferieren. Raumgebundene Ausstattung und große Altäre können aus logistischen Gründen nicht von ihrem Ursprungsort entfernt werden. Darüber hinaus erscheint die Musealisierung der Ausstattung aus denkmalpflegerischer, kunstgeschichtlicher und theologischer Sicht oft nicht wünschenswert. Auch für Museen wird zunehmend gefordert, enge Klimakorridore aufzuweiten, um Energie zu sparen [2]. Die Folgen der dann auftretenden Klimaschwankungen sind bisher nur in Einzelfällen nachgewiesen [3]. Obwohl im Rahmen dieser Forderungen immer betont wird, dass die Weitung der Klimakorridore ein enges Monitoring erfordert, fehlen entsprechende Konzepte bislang.

Kunstwerke aus gefasstem Holz sind besonders empfindlich gegenüber Klimaschwankungen, da der Träger in größerem Maße schwindet und quillt, als der darauf befindliche Bildschichtaufbau. Durch eine gewisse Elastizität des Malschichtsystems können kleinere Bewegungen über einen Zeitraum toleriert werden, abhängig von der Materialzusammensetzung bzw. einer möglichen Vorschädigung des Kunstwerks. Mit zunehmender Alterung verspröden die Materialien und mit höheren Raumklimaschwankungen werden die Materialbewegungen größer. Dadurch können die Kohäsion der Malschicht und die Adhäsion zum Untergrund versagen. Ablösungen, Blasenbildung und Stauchungen sind die Folge. Bei einem ungefassten Holzobjekt oder einer raumgreifenden Darstellung bleibt die Grundinformation, wenn auch entstellt durch Risse oder Fassungsverluste, trotz des beschriebenen Schadensprozesses weitgehend erhalten. Bei einem Gemälde ist die Darstellung und damit der Informationsgehalt nur in der Malschicht ablesbar. Fortschreitende Malschichtverluste bedeuten einen unwiederbringlichen Verlust an Information. Stellvertretend für gefasste bzw. bemalte hölzerne Ausstattungsobjekte wurde daher im Projekt ein großformatiges Holztafelgemälde ausgewählt.

Fallbeispiel Gründonnerstagsaltargemälde in der Sakristei in Freising

Das Gemälde mit ausgewählten Szenen der Karwoche (**Abbildung 1**) befindet sich seit 1495 als Teil eines Gründonnerstagsaltars in der Sakristei des Freisinger Doms (Bayern, Deutschland). Der Einbau einer Zentralheizung und der Bau einer Drainage für einen Teil der Wände führten seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu einer Reduzierung der relativen Luftfeuchte. Dies verursacht ein Schwinden des Holzträgers und eine zunehmende Schädigung der Malschicht in Form von Lockerungen und Substanzverlusten der Bildschicht. In den letzten Jahrzehnten mussten deshalb in immer kürzeren Abständen Konservierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Eine ausführliche Darstellung der Restaurierungsgeschichte findet sich im DBU-Abschlussbericht (s. o.). Der Träger war zu Projektbeginn bereits so stark geschrumpft, dass es nicht mehr möglich war, die aufstehende Bildschicht zu festigen, ohne Material zu entfernen (**Abbildung 2**). Das Gemälde steht stellvertretend für eine Vielzahl von nicht transferierbaren Kunstwerken, die in Zukunft durch Klimawandel bedingte Trockenperioden geschädigt werden könnten. Das Schadensphänomen in Freising ist zwar nicht direkt den Auswirkungen des Klimawandels zuzuordnen, zeigt aber auf, welches Schadenspotential künftig bei Hitze- und Trockenperioden zu erwarten ist.

Aufgrund seines Formats und des fragilen Zustandes konnte das Gemälde nicht aus der Sakristei entfernt werden und machte ein Arbeiten in situ notwendig. Vor Ort zu arbeiten bedeutet immer eine Abhängigkeit und fortwährende Anpassung an lokale Gegebenheiten und ist nicht mit dem besser erprobten Arbeiten in einer Werkstatt vergleichbar.

Das Ausmaß des Schadens, die Bedeutung des Gemäldes und die besonderen Bedingungen erforderten praktikable in situ Monitoring- und Befeuchtungsstrategien. In Hinblick auf den Schutz des globalen Klimas sollte dies möglichst ressourcenschonend geschehen, was im Rahmen des Projektes berücksichtigt wurde.



Abbildung 1 "Gründonnerstagsretabel" (1495) in der Sakristei des Freisinger Doms mit Notsicherungen (Foto: BLfD, 2022).



Abbildung 2 Detailaufnahme dachförmig aufstehender Malerschichtschollen vor der Notsicherung (Foto: BLfD, 2020).

3 Grundlagenermittlung: Objekt und Umgebung

Vor Beginn jeder Maßnahme sollte die Grundlagenermittlung zum Kunstwerk und dessen Umgebung (Raum, Gebäude, Außenanlage) stattfinden. Zunächst ist die Aufarbeitung der Historie im Sinne einer **Voruntersuchung**¹ erforderlich, die sowohl den Bestand als auch dessen Zustand erfasst [4]. Daneben müssen weitere Anforderungen berücksichtigt werden, wie etwa rechtliche Rahmenbedingungen, die Nutzung oder die Erhaltung anderer Kunstwerke/Objekte, welche mögliche Einschränkungen einer in situ Befeuchtung definieren.

Neben der Dokumentation und Untersuchung des Werkes selbst umfasst die Sammlung der relevanten Informationen **Archivrecherchen** (Dokumentationen, Fotos, Literatur, Akten), **Personenbefragungen** (Eigentümer, Nutzer, Beteiligte früherer Maßnahmen, etc.) und – falls nicht bereits vorhanden – ggf. die **Erhebung weiterer Daten** (Klimadaten, Materialanalysen, Schadstoffanalysen). Bei Schäden, die auf eine klimatisch bedingte Ursache hindeuten, empfiehlt es sich, besonderes Augenmerk auf Hinweise zu Nutzungsänderungen, baulichen Maßnahmen (auch nicht dokumentierte) sowie Personaländerungen zu legen.

Folgende Aspekte werden durch die Grundlagenermittlung idealerweise bereits geklärt:

- Objekt- und Restaurierungsgeschichte
- Schadensart, -ausmaß und –ursache(n)
- Ersteinschätzung der Objektsensibilität und –reaktion
- Einschränkungen durch äußere Vorgaben
- Anforderungen und Handlungsspielraum für die Befeuchtungsmethode

Die Grundlagenermittlung sollte vor Beginn einer geplanten Maßnahme abgeschlossen sein. Auch wenn es in manchen Fällen nicht möglich sein wird, alle Fragen im Vorfeld zu klären, bietet eine fundierte Grundlagenermittlung eine bessere Planungs- und Kostensicherheit für das anschließende Projekt.

Hinweis zur Einordnung der Wichtigkeit:

Vor der Durchführung einer in situ Befeuchtung bzw. eines Monitorings ist der dafür benötigte Aufwand kritisch zu hinterfragen - sowohl energetisch als auch personell und finanziell. Es sollte gründlich abgewogen werden, ob der Informationsgewinn, der durch invasive Untersuchungsmethoden (Materialproben, Befestigung von Sensoren etc.) erreicht werden kann, irreversible Veränderungen am Kunstwerk rechtfertigt. Die Bedeutung des Kunstwerks und dessen Priorität zum Erhalt ist daher unbedingt im Vorfeld zu evaluieren und das weitere Vorgehen darauf abzustimmen.

4 Risikobeurteilung

Das Thema Risikomanagement ist sehr komplex, insbesondere da alle Risiken, die zu Schäden führen können, zu berücksichtigen sind. Im Fall des Tafelgemäldes sind es insbesondere die konservatorischen Herausforderungen, die es zu bedenken gilt: Wie ist das hygroskopische Materialverhalten einzuschätzen? Welche klimatischen Schwankungen wirken sich bereits auf das sensible Materialgefüge aus? Welche konservatorischen Ziele werden festgelegt und sind diese realistisch? Nach welchen Kriterien ist der Klimaziellkorridor festzulegen und mit welchem Spielraum kann davon schadensfrei abgewichen werden? Wie steht es um die Transferierbarkeit auf ähnliche Fälle?

Eine allgemeine Herangehensweise, anhand derer für jede Fragestellung ein individuelles Maßnahmenkonzept erarbeitet werden kann, basiert auf den folgenden sechs Fragen:

1. Was versuchen wir zu erreichen? (Rahmen abstecken / Zusammenhang herstellen)
2. Welche Risiken sind maßgeblich? (Identifikation der Risiken)
3. Welche Risiken sind derzeit die wichtigsten? Was muss im konkreten Einzelfall priorisiert werden? (Risikobewertung)
4. Wie sollte mit den wichtigsten Risiken verfahren werden? Was muss am dringendsten geschützt werden? Gibt es positive Effekte? (Entwicklung des Risikomanagementplans)

Nach der Umsetzung erfolgt eine Rückschau:

5. Hat die Herangehensweise funktioniert? (Risikoüberprüfung)
6. Was hat sich verändert seit dem letzten Mal? (Update Risikobewertung, gewonnene Erkenntnisse nach Schadenseintritt)

In der Handlungsempfehlung sind speziell die Aspekte beschrieben, die in Hinblick auf eine Maßnahme zur Befeuchtung eines Tafelgemäldes berücksichtigt werden sollten. Im Folgenden werden die oben aufgelisteten Punkte hinsichtlich der im Projekt erarbeiteten Belange angewandt.

1. Was versuchen wir zu erreichen?

Das grundsätzliche Ziel ist, unser kulturelles Erbe so lange wie möglich für unsere Nachwelt zu erhalten. Dabei gilt, dass die Maßnahmen, die dafür erforderlich sind, angemessen und nachhaltig insbesondere im Hinblick auf den Schutz des globalen Klimas umgesetzt werden.

Dementsprechend ist auch dem Einsatz von passiven Maßnahmen zum Erreichen des Klimakorridors sowie zur Klimastabilisierung der Vorzug zu geben.

Hinsichtlich der größten Risiken, sei auf die „10 agents of deterioration“ verwiesen [5]. Zur ganzheitlichen Risikoabschätzung ist auf den Seiten des Sicherheitsleitfadens Kulturgut SiLK [6] eine umfangreiche Auflistung zur Herangehensweise, wie auch weiterführende Literatur genannt. Alle zehn Punkte werden hinsichtlich ihres wahrscheinlichen Eintritts, wie auch ihres Schadensausmaßes untersucht und aufgelistet.

2. Welche Risiken sind maßgeblich?

Um das Tafelgemälde in einen konservierbaren Zustand zu versetzen und damit langfristig zu erhalten, ist eine Volumenzunahme des Bildträgers erforderlich. Diese kann aus konservatorischen Gründen nur durch die Erhöhung der relativen Feuchte erfolgen. Da organische Materialverbände sehr sensibel gegenüber klimatischen Veränderungen reagieren, liegt in der Veränderung von Klimabedingungen grundsätzlich ein Risiko. Daher muss die Analyse des Ist-Zustands und die Entwicklung eines Klimazielkorridors zur Befeuchtung und späteren Langzeitstabilisierung mit entsprechender Expertise durchgeführt werden und zuweilen auch kritisch hinterfragt werden [7].

Für die Ermittlung des Klimazielwerts ist es zunächst notwendig, das „historische“ Klima, also das bisher vorliegenden Raumklima (am besten über die letzten 13 Monate) zu analysieren [7]. Anhand des Jahresmittelwerts der relativen Feuchte lässt sich abschätzen, wo die Gleichgewichtsfeuchte liegt. Ausgehend davon wird die relative Feuchte erhöht, um eine Volumenzunahme zu bewirken. Sind aufgrund des vorliegenden Klimas nachweisbar Schäden aufgetreten, müssen diese Werte vermieden werden. Auch die Höhe kurzfristiger klimatischer Schwankungen (täglich bis 3-tägig) gilt es zu reduzieren.

Bei der untersuchten Fallstudie ist für die langfristige Lagerung eine relative Feuchte über 65 % r.F. notwendig, die Temperatur kann dabei jahreszeitlich gleiten. Als Schadensfaktoren werden das Auffeuchten bzw. das Rücktrocknen sowie die Gewährleistung von langfristig stabilen Klimakonditionen – insbesondere bei aktiver Klimatisierung – identifiziert. Mögliche Schäden sind Risse, Fugenöffnungen, Verformungen, Malschichtverluste oder Schimmel. Letzterer ist nicht nur unmittelbar am Tafelgemälde, sondern auch an angrenzenden Stellen zu berücksichtigen (Kondensationspunkte in der Nähe, die als Ursprung für die Verbreitung der Sporen ausreichend sind). Abhängig vom Substrat nimmt insbesondere bei Erhöhung der relativen Feuchte in Kombination mit steigenden Temperaturen das Risiko der Sporenauskeimung zu [8]. Ein regelmäßiges Monitoring und bei Bedarf durchzuführende konservatorische Maßnahmen helfen das Schadensrisiko einzugrenzen. Mit dem Verlust von originaler Substanz geht auch die Verminderung der Lesbarkeit einher. Bei langfristig zu hoher Feuchtigkeit können außerdem organische Bindemittel ihre Klebkraft verlieren [9].

Die Effekte, die sich aus der Feuchtezufuhr ergeben, müssen für das Tafelgemälde wie auch seine Umgebung berücksichtigt werden. So wurde aus energetischen, wie auch aus bauphysikalischen Gründen eine Einhausung zur Klimastabilisierung gewählt.

Um die Risiken, die durch die Änderung der Feuchtebedingungen am Tafelgemälde einhergehen, konkretisieren zu können, wurden für das Fallbeispiel kunsttechnologische Untersuchungen durchgeführt. Diese dienten anschließend dazu, mehr über die feuchtetechnischen Eigenschaften des Tafelgemäldes in Erfahrung zu bringen. Anhand des rekonstruierten Materialverbands wurden die Materialkenndaten (Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsisotherme etc.) ermittelt, welche für hygrothermische Simulationen mit der Software WUFI®

eingesetzt wurden. Mit Hilfe des Programms kann das Temperatur- und Feuchteverhalten innerhalb der einzelnen Schichten des Tafelgemäldes bei klimatischen Schwankungen untersucht und abgeschätzt werden. Es diene außerdem der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Geschwindigkeit des Auffeuchtens, wie auch zur Einschätzung des Verhaltens des Materialverbunds bei klimatischen Schwankungen.

Weitere Versuche erfolgten mit Probekörpern, die ebenfalls basierend auf den Ergebnissen der kunsttechnologischen Untersuchungen angefertigt wurden. Diese wurden für Versuche in einem Klimaschrank genutzt. Basierend auf diesen Resultaten erfolgten daraufhin in der Einhausung in situ Auffeuchtungsversuche. Die Reaktion des Tafelgemäldes wurde mittels optischem und messtechnischem Monitoring begleitet und bewertet.

3. Welche Risiken sind derzeit die wichtigsten? Was muss im konkreten Einzelfall priorisiert werden?

Grundsätzlich sind an der Entscheidungsfindung verschiedene Akteure (Eigentümer, Nutzer, Konservatoren, Denkmalschutzbehörden, etc.) beteiligt, wo je nach eigenem Schwerpunkt unterschiedliche Ansprüche im Vordergrund stehen. Diese gilt es zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen. Das erfolgt idealerweise über gemeinsame Gespräche aller Beteiligten. Zur objektiven Beurteilung kann eine Entscheidungsmatrix dienen, die die möglichen Varianten mit den unterschiedlichen Kriterien und Ansprüchen gegenüberstellt. Je nach konkreter Situation werden die einzelnen Kriterien unterschiedlich gewichtet, und so die einzelnen Varianten objektiv bewertet. Das Ergebnis zeigt dann die Variante auf, die unter Berücksichtigung aller Kriterien am besten abschneidet. **Abbildung 3** zeigt beispielhaft eine Matrix, die für das konkrete Fallbeispiel des Tafelgemäldes aus dem Forschungsprojekt erarbeitet wurde. Hintergrund ist, dass das Holztafelgemälde in der Sakristei für die langfristige Erhaltung andere klimatische Bedingungen erfordert, als sie durch die derzeitige Nutzung des Raumes als Schaltzentrale gegeben sind (vgl. **2 Anlass und Fragestellung**). Aus den Diskussionen mit den Beteiligten (Nutzer, Eigentümer, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Hochbauamt, Diözesanmuseum) haben sich mehrere Varianten herauskristallisiert. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten:

A Das Gemälde bleibt an seinem ursprünglichen und für die liturgische Nutzung vorgesehenen Ort.

B Es wird ausgelagert, beispielsweise in ein Museum (Variante **5**), um stabilere und für die langfristige Erhaltung potenziell förderliche klimatische Bedingungen zu erzielen.

Für Fall **A** ergeben sich unterschiedliche Lösungen zur Erzielung verbesserter klimatischer Bedingungen:

- Die Übergangslösung belassen, also eine Einhausung, die die Sicht auf das Tafelgemälde verhindert. Dabei wird in den Varianten weiter unterschieden, ob der momentane Erhaltungszustand belassen wird (**1a** Status quo), oder das Gemälde konserviert / restauriert wird (**1b** Status quo + Restaurierung).
- Das Abschotten im Sinne einer "Raum in Raum"-Lösung, jedoch mit der Option das Tafelgemälde einzusehen oder durch eine offene Klimavitrine (**2** Abschotten).
- Das Raumklima der Sakristei durch das Einhausen der Nutzenden zu stabilisieren (**3** Einhausung Mesner). Im kleinen Raum könnten die Behaglichkeitsansprüche energieeffizient umgesetzt werden.

4. Wie sollte mit den wichtigsten Risiken verfahren werden?

Fazit aus den Forschungen zum Tafelgemälde ist, dass die langfristige Erhaltung am besten durch ein Auffeuchten des Tafelgemäldes und ein langfristiges Konditionieren auf ca. 65 % r.F. gewährleistet ist. Hinsichtlich der Erzielung der erforderlichen Klimabedingungen, bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. Diese unterscheiden sich grob in aktive und passive Lösungen (4 Rückseitenbefeuchtung). Letztere könnten z. B. über eine Rückseitenbefeuchtung, die durch konditionierte Salzlösung oder Lehmputz erfolgt, umgesetzt werden. Für das Thema „Befeuchtung“ muss jedoch eine gesonderte Risikoanalyse erfolgen, bei der alle Faktoren und Risiken aufgelistet werden, die eintreten können (beispielsweise das Brandrisiko, der Ausfall der Gerätschaften, die Wartung des Systems/der Gerätschaften, das Klima- und Oberflächenmonitoring).

Dementsprechend ist dieses Tool als Denkanstoß zur Entscheidungsfindung zu sehen. Wie die endgültige Entscheidung ausfällt, hängt häufig von weiteren Kriterien ab. So können politische Entscheidungen eine überproportional große Rolle spielen.

		Kriterien								
		Aufwand	Historischer Kontext	Einfluss auf Nutzung	Schadensrisiko	Erfolgschancen	Nachhaltigkeit	Öffentliche Zugänglichkeit	Wechselwirkung Umbaumaßnahmen	Σ
Varianten		0,20	0,05	0,10	0,20	0,20	0,10	0,10	0,05	1,00
A	1a Status quo									
	1b Status quo + Restaurierung									
	2 Abschotten									
	3 Einhausung Mesner									
	4 Rückseitenbefeuchtung									
B	5 Museum									

Abbildung 3 Beispielhafte Entscheidungsmatrix zur Erhaltung eines Holztafelgemäldes

5 Entwicklung Messkonzept und Befeuchtungsmethode

Im Anschluss an die Risikobeurteilung folgt die Konzeptentwicklung. Da dieser Prozess einige Arbeitsschritte umfasst, kann der zeitliche Aufwand erheblich sein. Um keine potenziell wichtigen Ereignisse zu verpassen, sollte möglichst früh mit einem reduzierten Monitoring begonnen werden (siehe **6 Umsetzung**). Entsprechende Messtechnik hierfür ist im Idealfall unabhängig vom jeweiligen Projekt vorzuhalten. Parallel zur Umsetzung dieser Sofortmaßnahmen kann mit der Entwicklung des Konzepts begonnen werden. Folgende Punkte sind dabei u. a. zu berücksichtigen und beschreiben:

- Berücksichtigung von Einschränkungen (z. B. Stromversorgung und Platzangebot)
- Kostenplan (Einholung von Kostenangeboten, Planung der Finanzierung)
- Ressourcen- und Zeitplan (Meilensteine)
- Klimaschwankungen möglichst reduzieren (Einhausung, Nutzung anpassen)
- Ziel-Klimakorridor formulieren (aus Ursprungsdaten und Zustandsreport)
- Festlegung der zu überwachenden Messgrößen (minimales und erweitertes System)

- Methodenbeschreibung
- Monitoring (Messgrößen, Datenmanagement)
- Festlegung der Befeuchtungsmethode
- Ergänzende Verfahren (Probekörper/Laborversuche, Durchführung von Simulationen)

Bei all diesen Schritten sind eventuelle Einschränkungen, beispielsweise aus einer Schadstoffbelastung, zu berücksichtigen. Die notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen ergeben sich hierbei aus der Art des Schadstoffs und der Exposition.

Störende äußere Einflüsse, z. B. Klimaschwankungen, lassen sich durch Lichtschutzmaßnahmen und eine räumliche Trennung sehr effizient reduzieren. Bei der Planung einer Einhausung sind jedoch zahlreiche Faktoren mit einzubeziehen. Diese sind in **Anhang 2** zusammengefasst. Der Lichtschutz muss aus einem geeigneten Material (witterungsbeständig falls im Außenbereich angebracht) gefertigt sein und die entsprechenden Öffnungen vollflächig verschließen. Notsicherungen an Kunstwerken sind, falls nötig, so früh wie möglich und in angemessenem Umfang anzubringen.

Im Folgenden sind mögliche schädliche Umwelteinflüsse, deren Auswirkungen und geeignete Messmethoden zusammengefasst (**Tabelle 1**). Die Auflistung der Methoden ist nicht abschließend und kann sich im Laufe der Zeit durch technische Weiterentwicklungen verändern. Eine detaillierte Auflistung der Methoden und ihrer Vor- und Nachteile findet sich in

Anhang 3.

Bei der Entwicklung des Systems sollte auf die Kompatibilität der einzelnen Komponenten untereinander geachtet werden und möglichst nur eine zentrale Datenspeicherung erfolgen. Mit steigender Komplexität eines Monitoringsystems steigt der Wartungsaufwand, kommt es häufiger zu Ausfällen und nimmt der Arbeitsaufwand bei der Bearbeitung und Auswertung der Daten zu. Unter Umständen ist es sinnvoll einen Messtechnik-Experten zu involvieren.

Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Überwachung des Klimas und der Reaktionen des Kunstwerks darauf. Bei der Verformung können verschiedene Bereiche (Träger, Malschicht, Umgebung) verschieden reagieren und voneinander abweichende Ziel-Klimakorridore haben. Auftretende Risse sind als „abgebaute Spannung“ im Material zu verstehen und deuten auf Spannungen hin, die die Festigkeit überschreiten. Die Ursache für die Spannungen ist zu identifizieren und möglichst schnell zu beheben, um weitere Schäden zu vermeiden. Weitere wichtige Aspekte, die bei der Entwicklung des Messkonzepts zu berücksichtigen sind, sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Table 1 Zusammenfassung verschiedener Umwelteinflüsse, ihrer Auswirkungen und einiger geeigneter Mess-, Monitoring- und Analysemethoden.

Umwelteinflüsse	Auswirkungen	Einfachere Monitoringmethoden	Komplexere Monitoringmethoden
Chemisch <ul style="list-style-type: none"> - Organische Säuren - Oxidation - Salze 	<ul style="list-style-type: none"> - Korrosion metallischer Anteile - Degradation von Malschichten (Metallseifen- und Oxalatbildung) 	<u>Allgemein:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten - Dancheck Teststreifen (Schnelltest für Essigsäure in Vitrinen) - Logger zur Bestimmung der Luftwechselrate 	<ul style="list-style-type: none"> - Luftkorrosivitätsmessung - ATR-FTIR-Spektroskopie - Röntgendiffraktometrie (XRD) für mineralische Bindemittel, Mineralien, Salze, Pigmente und Korrosionsprodukte - Ionenchromatografie - REM-EDX
Physikalisch <ul style="list-style-type: none"> - Luftfeuchte - Lufttemperatur - Oberflächentemperatur - Sichtbares Licht + UV/Global/IR-Strahlung - Erschütterungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialfeuchte - Verformungen - Materialeigenschaften - Erwärmung - Degradation - Innere Spannungen - Risse - Ablösungen - Ver-/Entfärbungen - Kriepierung 	<u>Allgemein:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten wie z. B. Flecken, Schimmel, Trocknungsrisse, Algen- oder Moosbildung, Ausbleichen, Kriepierungen, Ablösungen, Lichtschäden (Ausbleichen, Kriepierung, strukturelle Schäden, etc.; Geruch (z. B. muffig); Tropfenbildung oder Wasserläufern <u>Materialfeuchte:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Handmessgerät für elektrische Widerstandsmessung - Gravimetrisch <u>Klima:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Thermohygrograph - Digitale (Thermo-)Hygrometer - Klassische Datenlogger: Einzelmessgeräte (standalone-Datenlogger), Kabel-/Busbasierte- oder Funkssysteme <u>Verformungen:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Fotovergleiche (histor. Aufnahmen / jetzt) - Erfassung der Maße (Länge, Breite, Dicke) über Zollstock, Lineal, digitale Messgeräte, Millimeterpapier, etc. <u>Licht:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Blauwollskala - Luxmeter 	<u>Materialfeuchte:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Elektrische Widerstandsmessung - Darrproben - Kapazitive Holzfeuchtemessung - Gravimetrisch <u>Temperatur:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Oberflächentempersensoren - Infrarotthermometer - Lufttempersensoren - Thermografie <u>Luftfeuchte</u> <ul style="list-style-type: none"> - Kapazitive Luftfeuchtemessung - Impedanzsensoren <u>Verformungen:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Triangulationslaser - Extensometer - Dehnungsmessstreifen - Optische Fasern - Laserscans - Invar-Draht - Akustische Emission - Rissmonitore - Photogrammetrie - Digital Image Correlation - Opto-technische Methoden (terrestrischer Laserscanner, Streifenlichtscanner) <u>Licht:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Strahlungsmessung mit Sensoren für UV-A, UV-B, IR-, Globalstrahlung, Beleuchtungsstärke (Lux) - Farbmessgeräte - Micro Fading

		– Einfache Farbmessgeräte	– Xenon-Bogen-Test
Biologisch – Holzerstörende Pilze u. Schimmel – Schädlinge (Insekten)	– Abbau der Substanz – Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften – Stabilitätsverlust – Verfärbungen	<u>Holzerstörende Pilze und Schimmel:</u> – Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten wie z. B. Flecken, Schimmel, Algen- oder Moosbildung, Ablösungen; Geruch (z. B. muffig) – ATP/AMP-Messung <u>Schädlinge (Insekten):</u> – Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten wie z. B. Flecken, Ablösungen, Sichtungen von Schädlingen oder Rückständen (z. B. Bohrmehl, Kot); Ausflugslöchern; Verlust konstruktiver Stabilität etc. – Insektenfallen (z. B. Klebe- oder Pheromonfallen)	<u>Holzerstörende Pilze und Schimmel:</u> – Luftqualitätsmessung – Beprobung (aktiv/passiv) <u>Schädlinge (Insekten):</u> – Beprobung – Akustische Emission

Tabelle 2 Weitere Aspekte, die bei der Entwicklung des Messkonzepts zu berücksichtigen sind.

Stakeholder	Anforderungen von Eigentümern, Planern, Architekten, Behörden, Öffentlichkeit, etc.
Kosten	Größte Kostenfaktoren sind in der Regel Personal- und Sachkosten. Letztere richten sich häufig nach der Präzision. Durch robuste Systeme und Fernzugriff kann der Arbeitsaufwand reduziert werden; restauratorische Kontrollen vor Ort sollten erhalten bleiben.
Auswahl der Messstellen	So wenige wie möglich, so viele wie nötig.
Messintervall	In Abhängigkeit der Veränderungsrate. Zu kleine Intervalle führen zu redundanten Werten und unnötigem Speicherplatzbedarf. Zu große Intervalle (z.B. über stündlichen Werten) können zu Fehlinterpretationen führen. Bei höheren Veränderungsraten sind kürzere Intervalle zu wählen.
Messgenauigkeit	Sollte auf die erwarteten Veränderungen abgestimmt sein; entscheidender Kostenfaktor.
Monitoring in historischen Gebäuden	(Stabilität der) Stromversorgung, Stromverbrauch, Anzahl Steckdosen, Internetverbindung, Platzbedarf, Beeinträchtigung der Nutzung, bauliche Einschränkungen, Anforderungen übriger Ausstattung, Einschränkung durch Nutzende (Öffnungszeiten), Sicherheit (Brandenschutz, Diebstahl), potenzielle Wärmeentwicklung durch Technik
Übertragungstechnik	Manuelles Auslesen vor Ort, Fernzugriff auf Mess-PC, Cloud-basierte Lösungen
Störungspotenzial	Möglichst geringe Anfälligkeit anstreben, ggf. mit Redundanzen arbeiten, Wechselwirkung zwischen Messmethoden (z.B. elektrische Felder) ausschließen
Datenmanagement	Datenspeicherung und -sicherung, Speicherformat(e), Datenmenge und -qualität, Langzeitverfügbarkeit/Archivierung, Festlegung der Zuständigkeiten
Kompatibilität	Schnittstellen, Steuerungssoftware, möglichst nur ein zentrales System zur Aufzeichnung der Messdaten (Datenlogger) verwenden
Wartungsbedarf	Durch robuste Systeme und Fernzugriff kann der Arbeitsaufwand reduziert werden. Regelmäßige Vor-Ort-Termine für Wartung und Pflege sind weiterhin notwendig.
Nachhaltigkeit	Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch, Umweltverschmutzung, soziale Nachhaltigkeit
Ethische Fragen	Nicht zerstörende bzw. minimalinvasive Prüfverfahren und Messmethoden bevorzugen, Kosten-Nutzen-Verhältnis abwägen

Primäres Ziel muss zunächst die Bestimmung der Schadensursachen sein. Aus der Beurteilung der Ergebnisse, der darauffolgenden Risikoabschätzung und dem Objektzustand ergeben sich die notwendigen Maßnahmen, welche an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden müssen. Die Ziele für das Objekt müssen hierbei den Grenzen, Möglichkeiten und Risiken (für das Objekt und die Umgebung) gegenübergestellt und ein Optimum angestrebt werden.

Neben den Personalkosten hat auch die gewählte Messtechnik einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten. Je nach verfügbaren Mitteln sollten Art und Umfang der Sensoren daher möglichst sparsam gewählt werden. Ein reduziertes Messsystem umfasst mindestens das Mo-

onitoring des Raumklimas (relative Luftfeuchte und Temperatur – je nach Objektgröße und individuellen Gegebenheiten auch an mehreren Stellen) und der Reaktion des Objekts. Dies kann z. B. mittels Messung der Holzfeuchte, Gewichts- oder Dimensionsänderung erfolgen. Je nach Fragestellung kann es erforderlich sein, weitere Messgrößen aus

Tabelle 1 zu ergänzen oder mehrere Methoden zu kombinieren. Ein Vorschlag für ein reduziertes Messsystem findet sich in **Anhang 1**.

Für eine risikoarme Befeuchtung sollte in jedem Fall ausreichend Zeit eingeplant werden, so dass jederzeit die Möglichkeit zum Eingreifen besteht, falls das Monitoring die Entstehung neuer Schäden andeutet. Zudem werden so die Feuchtegradienten im Kulturgut reduziert und das Schadensrisiko gesenkt.

6 Umsetzung

Die Umsetzung erfolgt nach dem anfänglich entwickelten Konzept. Allerdings kann es notwendig sein, erste Sofortmaßnahmen, wie etwa die Anbringung von Notsicherungen oder Klima-Datenloggern, so früh wie möglich durchzuführen. Dementsprechend sind erste Sofortmaßnahmen parallel zur Grundlagenermittlung und Konzeptentwicklung durchzuführen. Dies maximiert den Informationsgewinn und kann helfen, Risiken zu minimieren.

Zur Umsetzung gehört neben der Zusammenstellung und Montage der im Konzept festgelegten Technik eine fortlaufende **Funktionskontrolle, Wartung** und **Pflege**. Auch wenn Fernüberwachung einen Großteil der Vor-Ort-Termine überflüssig macht, so sind diese nie gänzlich zu ersetzen. Die regelmäßige konservatorische Begehung und Dokumentation des aktuellen Objektzustands ist unumgänglich bei der Evaluierung des Konzeptes (siehe **7 Bewertung**) und reduziert das Schadensrisiko. Des Weiteren ermöglicht dies, Unwägbarkeiten, die aus der Grundlagenermittlung nicht bekannt sind, zu begegnen. Beispiele hierfür sind Ausfälle der Technik, plötzliche Klimaänderungen oder unerwartete Messabweichungen durch externe Störquellen.

Ein zentraler Punkt bei der Umsetzung ist die richtige Wahl der Messpunkte. Da die Anzahl der Messpunkte meist aus finanziellen, konservatorischen oder technischen Gründen begrenzt ist, müssen sich diese an möglichst aussagekräftigen Stellen befinden. Dazu gehört zudem die Festlegung der erforderlichen Mindestanzahl an Messpunkten. Einen Einfluss auf die Wahl der Messstellen haben unter anderem folgende Punkte:

- Ziel der Messung: Was und warum soll gemessen werden?
- Messmethode: Wie wird gemessen? (punktuell, Raster, linienförmig, flächig, Volumen)
- Eingriff: berührungslos, zerstörungsfrei, zerstörend, minimalinvasiv
- Objekteigenschaften: Zustand, Oberflächenbeschaffenheit, Materialien, Geometrie, Vorder- und Rückseite, Fassung oder Malerei

Ebenso wichtig ist die korrekte Durchführung von Messungen bzw. Bedienung von Messgeräten. In Abhängigkeit von der Robustheit der Methode können Bedienfehler hier zu Messfehlern führen, die weit über der angegebenen Genauigkeit der Messgeräte liegen. Bei mangelnder Erfahrung sind entsprechende Schulungen, beispielsweise durch die Hersteller, zu besuchen.

Nach Installation der Messtechnik kann – angepasst an die Ergebnisse der Risikobeurteilung und einer ausreichenden zeitlichen Erfassung des Ist-Zustandes – mit begleitenden Versuchen wie Klimaänderungen o. Ä. begonnen werden. Diese sind ebenso wie die Messgrößen, -methoden und Zwischenergebnisse in aussagekräftiger Form zu dokumentieren. Für eine spätere Nachvollziehbarkeit sollten auch vermeintliche Nebentätigkeiten wie Überprüfung, Wartung und Pflege erfasst werden.

7 Bewertung

Die Bewertung der umgesetzten Maßnahmen sollte nicht nur am Ende, sondern bereits während der gesamten Bearbeitung regelmäßig erfolgen (**Abbildung 4**). Auf diese Feedback-Schleifen muss dann bei Bedarf mit einer Anpassung des Konzepts oder Veränderungen bei der Umsetzung (Messtechnik, Wartung, Pflege) reagiert werden. Dies garantiert eine fortlaufende Qualitätskontrolle und sorgt für bestmögliche Ergebnisse.

Diese projektinternen Feedback-Schleifen gliedern sich in projektübergreifende Schleifen ein, die mittels einer entsprechenden Dokumentation langfristig zu einer Verbesserung der Methodik führen. Hierbei darf eine abschließende Bewertung der Strategie und ggf. Verbesserungsvorschläge nicht fehlen.

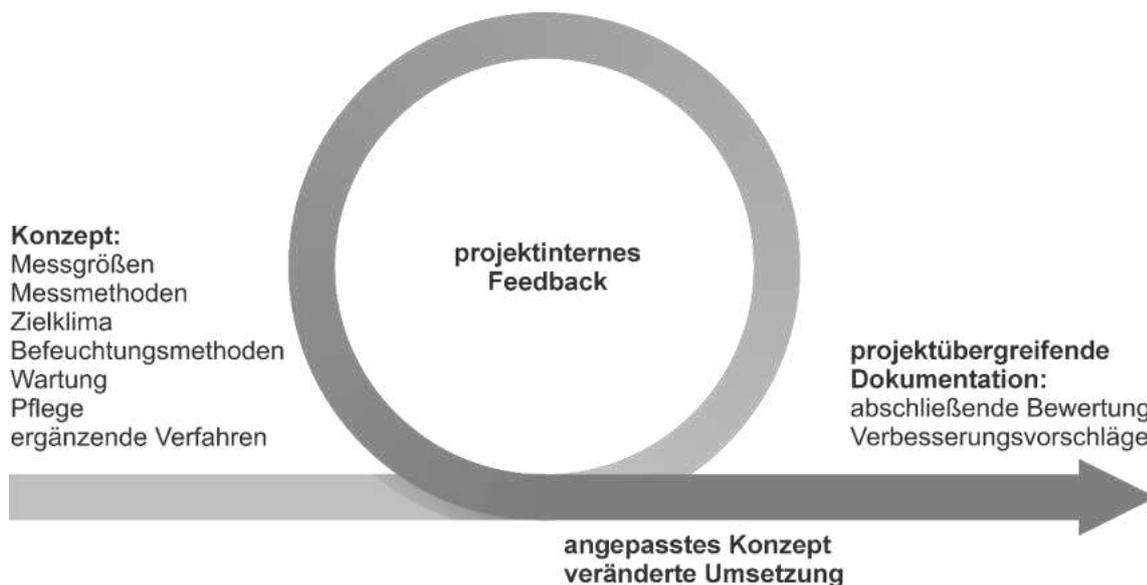


Abbildung 4 Projektinterne Bewertung als integraler Bestandteil der Umsetzung.

8 Fazit

Fachlich-inhaltliches Fazit aus dem Modellprojekt

Die Grundlagenermittlung, Risikoabschätzung, Konzeptentwicklung, Umsetzung und Beurteilung bilden die Standbeine eines Projektes zur Befeuchtung.

Im Projekt zeigte sich durch die Abkopplung des Klimas (Einhausung) eine schnelle und deutliche Klimastabilisierung am Gemälde. Sobald das Monitoring- und Messsystem gemäß der definierten Schadensursache und Zielsetzung installiert ist, rücken die Wartung und Pflege der Gerätschaften – aber vor allem auch die restauratorische Beobachtung des Kunstwerkes und seiner Reaktion – in den Fokus. Die einzelnen Auffeuchtungsschritte können dabei erst nach der Auswertung der bisherigen Ergebnisse und Reaktionen erfolgen und sollten stets im interdisziplinären Team abgestimmt werden. Die Befestigungen und Untersuchungen am Original sollten nach Möglichkeit zerstörungsfrei oder minimalinvasiv sein. Ob die Sensorbefestigung oder Eingriffe ethisch vertretbar sind, muss individuell auf das Kunstwerk und die Notwendigkeit der Maßnahme abgestimmt werden.

Für den Erfolg eines Auffeuchtungsprojektes muss neben den benannten Voruntersuchungen, und Abschätzungen nicht nur eine Befeuchtungsmethode gewählt oder entwickelt werden, sondern vor allem auch die möglichst dauerhafte und konstante Stabilisierung des Klimas nach

der Befeuchtung berücksichtigt werden. Nur in seltenen Fällen der Denkmalpflege ist dabei aus finanziellen und Wartungsgründen eine technische Vollklimatisierung möglich. Wünschenswert ist die Wahl möglichst ressourcenschonender und nachhaltiger Lösungen. Hierzu gibt es vielversprechende Untersuchungen zu gesättigten Salzlösungen sowie synthetischen oder mineralischen Puffermaterialien (s. DBU-Abschlussbericht).

Planerisches Fazit

Für die Durchführung einer in situ Befeuchtung und eines Monitorings können gängige Projektmanagementstrategien angewendet werden. Diese beinhalten die Benennung einer Projektleitung und die anschließende Implementierung von Projektsteuerungstools durch diese.

Bereits in der Vorprojektphase sollte eine Problemanalyse durchgeführt werden, um mögliche Unwägbarkeiten zu identifizieren und entsprechende Projektalternativen zu entwickeln. Hierbei kann es sich sowohl um projektinterne Probleme wie Kündigungen oder Krankheitsfälle handeln, als auch um externe Faktoren wie globale Krisen (Pandemien, Kriege), lokale Katastrophenfälle (Brand, Überschwemmung) oder logistische Schwierigkeiten vor Ort (Stromausfälle, eingeschränkte Zugänglichkeit). Das Arbeiten in situ erfordert aufgrund der größeren Abhängigkeit von externen Faktoren ein hohes Maß an Flexibilität. Ein detaillierter Kosten-, Arbeits- und Zeitplan ist obligat für die Umsetzung eines umfangreichen Projektes. Deadlines, Meilensteine und die klare Zuweisung von Arbeitspaketen helfen, das Projekt zu strukturieren. Regelmäßige Jours fixes dienen dem Austausch von Ergebnissen und verbessern die Kommunikation innerhalb des Projektteams.

Nicht alle Szenarien können im Vorfeld erschöpfend analysiert werden, daher ist eine stetige Kontrolle des Soll- und Ist-Zustandes erforderlich. Abweichungen vom Zeit- und/oder Kostenplan sollten durch die jeweiligen Aufgabenverantwortlichen umgehend an die Projektleitung kommuniziert werden, um Anpassungen vornehmen zu können.

9 Literatur

- [1] Climate Service Center Germany: Klimaausblicke Bundesländer, URL: https://www.gericis.de/products_and_publications/fact_sheets/klimaausblicke/index.php.de (Stand 23.4.2024).
- [2] Deutscher Museumsbund: Empfehlungen zur Energieeinsparung durch die Einführung eines erweiterten Klimakorridors bei der Museumsklimatisierung, 2022, URL: <https://www.museumsbund.de/wp-content/uploads/2022/11/klimakorridor-fuer-sammlungsgut.pdf> (Stand 23.4.2024).
- [3] Verband der Restauratoren: Grenzen testen? Evaluation des erweiterten Klimakorridors, 2023, URL: <https://www.restauratoren.de/grenzen-testen-evaluation-des-erweiterten-klimakorridors/> (Stand 23.4.2024).
- [4] Müller, Andreas/Brandt, Julia: Kunst im Fokus. Fachliche Aspekte bei der Vorbereitung von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der künstlerischen Ausstattung, in: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Von der Planung zur Ausführung. Denkmalpflegerische Restaurierungsprojekte an Kirchen in Bayern, München 2022, S. 55-71.
- [5] Canadian Conservation Institute: Agents of deterioration, 2017, URL: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration.html> (Stand 19.2.2024).

- [6] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe BBK (Hrsg.): Sicherheitsleitfaden Kulturgut – Tool, URL: <https://www.silk-tool.de/de/> (Stand 19.2.2024).
- [7] DIN EN 15757:2010-12: Erhaltung des kulturellen Erbes – Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien.
- [8] Sedlbauer, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Stuttgart 2001.
- [9] Bridarolli, Alexandra/Freeman, Ashley Amanda/Fujisawa, Naoki/ Łukowski, Michał: Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity, in: Journal of Cultural Heritage, Volume 53, 2022, pp. 226-235.

Weiterführende Literatur:

Anaf, Willemien; Cabal, Ana; Robbe, Mie; Schalm, Olivier: Real-Time Wood Behaviour: The Use of Strain Gauges for Preventive Conservation Applications, in: Sensors, Volume 20, Issue 1, Basel 2020, pp. 1-14.

Ashley-Smith, Jonathan; Burmester, Andreas; Eibl, Melanie (Hrsg.): Climate for collections standards and uncertainties: Postprints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November 2012, London/München 2013.

Bundesdenkmalamt (Hrsg.): Leitfaden. Zustandserhebung und Monitoring an Wandmalerei und Architekturoberfläche, 2. Fassung, online, 2019.

DIN EN 13183-1:2002-07: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.

DIN EN 16095:2012-10: Erhaltung des kulturellen Erbes – Zustandsaufnahme an beweglichem Kulturerbe.

Falciai, R.; Trono, C.; Lanterna, G.; Castelli, C.: Continuous monitoring of wooden works of art using fiber Bragg grating sensors, in: Journal of Cultural Heritage, Volume 4, Issue 4, 2003, pp. 285-290.

Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service (eds.): Wood Handbook. Wood as an Engineering Material, Madison (Wisconsin) 2021.

Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert (Hrsg.): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete, 3. Auflage, Wiesbaden 2023.

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt (Hrsg.): Leitfaden zur restauratorischen Untersuchungsdokumentation, Halle (Saale), 2014.

Nevin, Austin; Sawicki, Malgorzata: Heritage Wood. Investigation and Conservation of Art on Wood, Cham 2019.

Science Europe: Practical Guide to the International Alignment of Research Data Management, (online) 2021.

VDI-Richtlinie 3798: Materielles Kulturerbe. Erfassung, Untersuchung und Erhaltung unter Berücksichtigung der Umwelteinflüsse, 2020.

WTA-Merkblatt 10-3: Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken II: Klimazielwerte, 2022.

¹ Vgl. Müller/Brandt 2022, S. 69f. Hier werden die wichtigsten Schritte in der Projektplanung sowie eine Checkliste zum Umfang einer restauratorischen Voruntersuchung und Maßnahmenvorbereitung dargestellt.

10 Anhang

Anhang 1: Vorschlag für ein reduziertes Messsystem

Messgröße	Kostengünstiges Monitoring	Optimales Monitoring	Allgemein (Handlungsempfehlung)
Raumklima	Thermohygrograph	Klimasensoren	1-2 am Objekt, 1 im Raum
Oberflächentemperatur	Oberflächentemperatursensoren		nur falls Diffusion simuliert werden soll oder Kondensationsprobleme zu erwarten sind
Deformation	Extensometer	Triangulationslaser	Ggf. auch DMS einsetzen (kleiner, keine Wärmeentwicklung)
Materialfeuchte	Elektr. Widerstandssensoren	Waage und Darrproben, falls Probekörper vorhanden	Eher moderne, LoRa-WAN-basierte Systeme einsetzen
Optisches Monitoring	Zeitrafferkamera	Streifenlichtscans	Hoher Arbeitsaufwand für Streifenlichtscans

Anhang 2: Anforderungen an Einhausungen/Klimaboxen

Anforderung		Bemerkung	Wichtige Aspekte
Maße/Volumen	Minimale Innenmaße/Maximale Außenmaße	Ausreichend Platz für Messtechnik u. Monitoring, Kontrollen am Objekt und ggf. Notmaßnahmen einplanen Ggf. Echtzeit-Überwachung und Fernwartung einrichten	- Volumen - Materialien
Aufbau	Schleuse/Tür Außenflächen		- Denkmalverträglicher Anschluss zum Bestand - Grundriss - Statik
Fernwartung	Messtechnik		- Möglichkeit einer Kamera für Fernwartung - Beleuchtung - Zugriff auf Messtechnik
Objekthandling	Positionierung des Kunstwerkes in der Einhausung	Hängend, stehend, liegend	- Einfluss der Positionierung für Klimatisierung/Monitoring/Notmaßnahmen?
	Vibrationsschutz und Statik	Belastungen durch nahe Baustellen oder Nutzung	- Ggf. Messungen notwendig - Gibt es Grenzwerte? - Entkopplung
Luftaustausch	Luftbewegung, Dampfdurchlässigkeit und Dichtigkeit der Flächen und Fugen	Gefahr von mikrobiellem Befall in der Einhausung, Verhinderung von Stratifikation	- Wie, wann und in welchem Maße erfolgt Luftbewegung? - Wo/wie lüften (nötig)? - Gleichmäßige Verteilung der Luft - Kein punktuell „Anblasen“ - Ggf. Schadstoffbelastung berücksichtigen
Klimaregulierung	Be-/Entfeuchtung der Raumluft	Aktiv: Ein- und Ausleitung gereinigter und be-/entfeuchteter Luft Passiv: konstante Feuchtigkeit halten durch Puffermaterial	- Steuerung und Geschwindigkeit der Luftbefeuchtung - Aktive oder passive Klimatisierung - Energiebedarf - Dauer der Maßnahme
Emissionen	Emissions-, Säure-, Weichmacher- und VOC-frei	VOC-Sensoren Aktive Raumluftmessung Passivsammler Korrosionsdetektoren	- Korrosionsschäden für Kunstwerke - Arbeitssicherheit/Gesundheitsschutz
Erscheinungsbild	z. B. transparente Front; Seiten-, Rückwände und Dach nicht zwingend	Beobachtung des Objekts von außen, Ästhetik, Kontrolle ggf. ohne Klimaänderung durch Öffnung möglich	- Anforderungen der Eigentümer/ Öffentlichkeit - Kosten - Dämmwirkung (Glas) - Licht(-schutz)

Anhang 3: Vergleich einiger Messmethoden

Messmethoden		Vorteile	Nachteile
Chemische			
	Optische Überwachung	– Keine technische Ausrüstung notwendig	– Erfordert Erfahrung – Subjektiv
	Luftkorrosivitätsmessung	– Kontinuierlich – Quantitativ	– Anfällig für elektrische Störfelder
Physikalische			
Materialfeuchte	Elektrische Widerstandsmessung	– Quasi-kontinuierlich	– Anfällig für elektrische Störfelder – invasiv
	Kapazitive Holzfeuchtemessung	– Minimalinvasiv	– Anfällig für Bedienfehler
	Darrprobe	– Exakte Bestimmung der Materialfeuchte	– Zerstörend
	Gravimetrisch	– Quasi-kontinuierlich – Extrem hohe Genauigkeit möglich	– Je nach Objekt schwer umsetzbar (Größe)
Temperatur	Oberflächentempersensoren	– Hohe Genauigkeit	– Anbringung erfordert i. d. R. Verklebung oder hohen Anpressdruck; restauratorisch verträgliche Methoden siehe DBU-Abschlussbericht
	Infrarotthermometer	– Messung aus Distanz	– Manuelle Bedienung notwendig – Messfehler bei hellen/glänzenden Oberflächen
	Lufttemperatursensoren	– Quasi-kontinuierlich	
Luftfeuchte	Luftfeuchtesensoren		
Verformungen	Triangulationslaser	– Berührungslos – Hohe Genauigkeit – Quasi-kontinuierlich	– Für beste Ergebnisse Anbringung von Keramikendmaßen nötig – Punktmessung – Kosten
	Extensometer	– Quasi-kontinuierlich	– Gute Messergebnisse nur bei Verschraubung mit Objekt – Geringe Genauigkeit
	Dehnungsmessstreifen	– Hohe Genauigkeit – Messung über Bereich	– Oberflächenvorbereitung u. Rückbau problematisch – Risse können zu Messfehlern führen
	Optische Fasern	– Hohe Genauigkeit – Messung über gesamte Länge	– Oberflächenvorbereitung u. Rückbau problematisch

	Laserscans	<ul style="list-style-type: none"> – Einfache Erfassung ganzer Objekte 	<ul style="list-style-type: none"> – Geringere Genauigkeit – Messfehler bei hellen/glänzenden Oberflächen
	Streifenlichtscanner	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Genauigkeit – Messung ganzer Bereiche 	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Personalaufwand – Sehr hohe Investitionskosten
	Invar-Draht	<ul style="list-style-type: none"> – Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> – Eher zur Überwachung von Gebäuden geeignet
	Akustische Emission	<ul style="list-style-type: none"> – Liefert Hinweise auf Rissbildung 	<ul style="list-style-type: none"> – Interpretation erfordert hohes Maß an Erfahrung – Herkunft des Signals u. U. nicht eindeutig zuordenbar (siehe Biologische Umwelteinflüsse)
UV/Global/IR-Strahlung	Strahlungsmessung	<ul style="list-style-type: none"> – Liefert Einschätzung der Lichtexposition 	<ul style="list-style-type: none"> – Kosten für präzise Sensoren; sonst Fehleranfälligkeit
Biologische			
	Optisches Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> – Kein Spezial-equipment notwendig – Geeignet zur Vororientierung 	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Personalaufwand – Begrenzte Aussagekraft zur Art eines mikrobiellen Befalls
	Luftqualitätsmessung	<ul style="list-style-type: none"> – Quasi-kontinuierlich 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativ – Kosten
	ATP/AMP-Messung	<ul style="list-style-type: none"> – Schneller Nachweis zum Vorhandensein von Mikroorganismen 	<ul style="list-style-type: none"> – Begrenzte Aussagekraft bzgl. Aktivität des Befalls – Aussage örtlich u. zeitlich begrenzt – Keine Aussage zur Art der Mikroorganismen u. Gesundheitsrisiken – Hohe Fehleranfälligkeit (angepasste Probenahmemethode)
	Beprobung (aktiv/passiv)	<ul style="list-style-type: none"> – Artbestimmung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – Passiv: keine konkreten Aussagen zum Befall am Objekt möglich – Aktiv: ggf. invasiv (Materialprobe) bzw. Gefahr der Schädigung des Objektes
	Akustische Emission	<ul style="list-style-type: none"> – Beurteilung zur Befallsaktivität von holzzerstörenden Insekten 	<ul style="list-style-type: none"> – Interpretation erfordert hohes Maß an Erfahrung – Herkunft des Signals u. U. nicht eindeutig zuordenbar (s. Physikalische)

Anhang I: Material- und Geräteliste

00-Geräte- und Materialliste

Im Folgenden werden alle im und für das Projekt verwendeten Geräte und Materialien aufgelistet. Die Ordnung erfolgt anhand der Gliederung im Abschlussbericht. Es werden nur Punkte aufgezählt, in denen Geräte und / oder Materialien Verwendung fanden. Extern verwendete Geräte und Materialien werden hier nicht behandelt. Diese finden sich in den jeweiligen Untersuchungsberichten der Auftragnehmer.

2 Grundlagenermittlung

2.3 Kunsttechnologischer Aufbau

ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Holzartenanalyse [Probenentnahme und Analyse]	Mikroskop	Axiophot	Zeiss	Zeiss
	Objektive	Epiplan Neofluar 5x 0.15 HD, 10 x 0.30 HD, 20 x 0.50 HD, 50 x 0,75 HD	Zeiss	Zeiss
	VIS-Quelle	Halogenlampe 12V / 100W	Zeiss	Zeiss
	UV-Quelle	LQ-HXP 120-UV, Quecksilberhöchst-drucklampe OSRAM HPX-R120W/45C UV	Lej	Zeiss
	Kamera	AxioCam MRc5	Zeiss	Zeiss
	Software	AxioVision SE64 Rel. 4.9	Zeiss	Zeiss
	MATERIALIEN	MODELL / MATERIAL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Skalpellgriff	Nr. 1	C. Bruno Bayha GmbH	Bayha-Skalpelle
	Skalpelloklingen	Nr. 11, 15, 19, 20	C. Bruno Bayha GmbH	Bayha-Skalpelle
	Einlegmittel (1:1)	Glycerin Demin. Wasser	k. A. k. A.	Carl Roth Carl Roth
Objektträger	Objektträger Kanten geschnitten, Ohne Mattrand	DWK Life Science	Carl Roth	
Deckgläschen	Borosilikatglas der 1. hydrolytischen Klasse; Stärke 1.5, 24 x 60 mm	Marienfeld	Carl Roth	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
C14-Datierung [Probenentnahme und Analyse]	Siehe Untersuchungsbericht CEZA, Dr. Susanne Lindauer.			
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Werg [Probenentnahme und Analyse]	Durchlichtmikroskop	Axiolab	Zeiss	Zeiss
	Objektive	Epiplan 10 x 0.20 Pol, 20 x 0.40 Pol, Neofluar 40 x 0,75	Zeiss	Zeiss
	Kamera	AxioCam MRc5	Zeiss	Zeiss
	Software	AxioVision SE64 Rel. 4.9	Zeiss	Zeiss
	MATERIALIEN	MODELL / MATERIAL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Skalpellgriff	Nr. 1	C. Bruno Bayha GmbH	Bayha-Skalpelle
	Skalpelloklingen	Nr. 11, 15, 19, 20	C. Bruno Bayha GmbH	Bayha-Skalpelle
	Schere	k. A.	k. A.	BLfD
	Einlegmittel	Demin. Wasser	k. A.	Carl Roth
	Objektträger	Objektträger Kanten geschnitten, Ohne Mattrand	DWK Life Science	Carl Roth
Präparier-Nadel	Länge 152 mm, Durchmesser 6,2 mm, Nadeldurchmesser 1,2 mm, gerade	Plano	Plano-em	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Pigment- und Bindemittelanalysen [Probenentnahme und Analyse]	FTIR: Siehe Untersuchungsbericht BLfD, Dr. Markus Roos. GC-MS: Siehe Untersuchungsbericht FH Erfurt, Dr Frank Mucha REM-EDS: Siehe Untersuchungsbericht BLfD, Simon Mindermann.			
	Mikroskop	Axiophot	Zeiss	Zeiss
	Objektive	Epiplan Neofluar 5x 0.15 HD, 10 x 0.30 HD, 20 x 0.50 HD, 50 x 0,75 HD	Zeiss	Zeiss
	VIS-Quelle	Halogenlampe 12V / 100W	Zeiss	Zeiss

	UV-Quelle	LQ-HXP 120-UV, Quecksilberhöchst-drucklampe OSRAM HPX-R120W/45C UV	Lej	Zeiss
	Kamera	AxioCam MRc5	Zeiss	Zeiss
	Software	AxioVision SE64 Rel. 4.9	Zeiss	Zeiss
	MATERIALIEN	MODELL / MATERIAL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Skalpellgriff	Nr. 1	C. Bruno Bayha GmbH	Bayha-Skalpelle
	Skalpellschlingen	Nr. 11, 15, 19, 20	C. Bruno Bayha GmbH	Bayha-Skalpelle
	Einbettmittel	Technovit® LC 2000	Kulzer Mitsui Chemicals Group	Kulzer Technik
	Objekträger	Objekträger Kanten geschnitten, Ohne Mattrand	DWK Life Science	Carl Roth
	Knetmasse	Plastic fermit, weiß	Fermit	Fermit
	Schleifpapier	Micromesh (Körnungen 1500 – 12000)		

2.4 Voruntersuchungen und erste Maßnahmen

ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
Klimaaufzeichnungen	USB-Logger	EL-USB-2 RH / TEMP DATA LOGGER	Lascar Electronics	Lascar Electronics	
	Software	EL-USB-WIN	Lascar Electronics	Lascar Electronics	
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
Elektrischer Widerstand [Messungen Vorprojekt + Elektrodenauswahl]	Feuchtemessgerät	Serie testo 606-2	Testo	Testo	
	Sensor	Gigamodul Multisensor	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH	
	Datenlogger (2x)	Thermofox	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH	
	Leitgummielektroden	k. A.	k. A.	Bestand TUM	
	Einsteckelektroden	k. A.	k. A.	Bestand TUM	
	Verbindungskabel	k. A.	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH	
	RH / TEMP-Sensoren		FHAD 46-C2, FHAD46C2L05	Ahlborn	Ahlborn
			FHAD 46-C2, FHAD46C2L10	Ahlborn	Ahlborn
	Waage (gravimetrische Feuchtemessung)	k. A.	Sartorius	k. A.	
	Software	SoftFOX - Analysesoftware (USB) CD-ROM inkl. USB-Interface	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH	
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
	Probekörper Beschichtung [Bindemittel und Lösemittel]	Probekörper Träger	Fichtenholz		
			Blätterschellack, hell, entfärbt, wachsfrei	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
			Champagnerkreide, natürliches Calciumcarbonat	ETIQUETTE VIOLETTE	Kremer Pigmente
Bologneserkreide, italienisch, 30 - 40 µ			k. A.	Kremer Pigmente	
Hautleim (7%), Gries, Rinderhaut			Kremer Pigmente	Kremer Pigmente	
Gummi Mastix (1:6 in Ethanol) «Chios, griechisch, Tränen, beste Qualität»			Kremer Pigmente	Kremer Pigmente	
Dammar Harz (1:4 in Balsamterpentinöl)			Kremer Pigmente	Kremer Pigmente	
Paraloid® B-72 (1,5% in Methoxypropanol PM), "beste Qualität"			Kremer Pigmente	Kremer Pigmente	
Leinölfirnis, mit Mangan sikkativiert, kobaltfrei, schnelltrocknend			Kremer Pigmente	Kremer Pigmente	
Demin. Wasser			Carl Roth	Carl Roth	
Ethanol	Carl Roth	Carl Roth			
Balsamterpentinöl	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente			
Methoxypropanol PM	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente			
Tesa® Aluminium Tape 10m x 50mm	Tesa®	Amazon			
Klebeband					
Sandpapier	k. A.	k. A.	k. A.		

	Hydromette	HT 85 T	Gann	Gann
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Notsicherungen	Pinself	Retouchierpinsel, Rotmarderhaare, Gr. 4 extra kurz, rund, Ø 3,1 mm, sichtbare Haarlänge: 12,5 mm	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
	Colorshaper	HONSELL Soft Brush Sets Gummipinsel, Größe 2	Honsell	Gerstaecker
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Binde- und Lösemittel	Tylose MH300 (2 % in demin. Wasser)	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Klucel® E	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Methocel™ A15	DuPont	DuPont
		Methocel™ A15C	DuPont	DuPont
Japanpapier	Demin. Wasser	Carl Roth	Carl Roth	
Hollytex® Polyester Vlies	Langfaserpapier, weiß, zäh	Japico	Japico	
		3257 34 g / m³ und 30 g / m³	Deffner & Johann	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Einhausung	Akku-LED- Arbeitsleuchte	AKKU-LED-Arbeitsleuchte DCM; 2500 Lumen	Würth GmbH	Würth GmbH
	Arbeitsleuchte Akku	NOVA 2 CONNECT	Scnagrip A/S	Scnagrip A/S
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Trockenbauwände	Metallständerwerk, Gipskarton - Platten mit spezieller Verwen- dungsmöglichkeit für Räume mit erhöhter Luftfeuchte	k. A.	Firma Adldinger
		Spachtelmasse	Gips	k. A.
	Anstrich, außen	Grundierweiss GP 5	Pufa	Firma Adldinger
	Dämmmaterial	CapaDIN Innenfarbe weiss	Caparol	Firma Adldinger
	Abdichtung	Mineralwolle	k. A.	Firma Adldinger
	Staubschutz	dampfdiffusionsdichter Folie		Firma Adldinger
	Arbeitslicht	Tyvek® 1623E, 41 g/m³	k. A.	Deffner & Johann
	Haken	Worklight S LED	LEDVANCE	Hagebaumarkt
	Hängeeimer 12C	k. A.	k. A.	Hagebaumarkt
	Hängeeimer 16	12C	k. A.	Hagebaumarkt
	Klapptrittleiter	16	k. A.	Hagebaumarkt
Klebeband Verlegeband 50mmx10mm doppelseitig, extra stark	601016100A	Wenko	Hagebaumarkt	
	tesa®	tesa	tesa	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Lichtschutz	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Stange	Gardinia-Spannstange, nickell- optik, ausziehbar 80-130 cm	GARDINIA	
	Lichtschutztextil	Auto-Frontscheibenabdeckung aus reflektierender Isolierfolie Thermostoff Isotherm, Meterware	Cartrend	
	Befestigung	Magneten	k. A.	k. A.
Klettverschluss		k. A.	k. A.	
	3M TM Gewebeklebeband 1900, 50 mm	3M Deutschland GmbH		
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Biozid-Screening	Staubsauger	MUNTZ 555-MU-E-HEPA Museumsstaubsauger	MUNTZ	Anton Glaser
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	PSA Filter für Gebläsehelm	Filter Dräger X-plore® 8000 Filter A1B1E1K1 Hg P R SL	Dräger	Kleinschmidt GmbH
Staubsaugerbeutel	MUNTZ PH-722	MUNTZ	Anton Glaser	

3 Konzeptentwicklung und Monitoringkonzept

3.1 Mess- und Monitoringkonzept

ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Stützkonstruktion und Aufbau Messtechnik	Kabel	ALMEMO-USB- Datenkabel galv.getrennt Länge = 5 m, ZA1919DKU-05	Ahlborn	Ahlborn
	Akku-Bohrschrauber	DDF485Z 00088381866316	Makita	k. A.
	Datenlogger	Thermofox Universal Datenlogger	Scantronik Mugrauer GmbH	k. A.
	Datenlogger	ALMEMO 5690 Datenlogger inkl. Netzteil	Ahlborn	k. A.
	Gigamodul	Materialfeuchte Gigamodul	Scantronik Mugrauer GmbH	k. A.
	Temperatur-Sensor	Externer T-Sensor, 1,5 m-Kabel	Scantronik Mugrauer GmbH	k. A.
		Oberflächen-T-Sensor FPA 611 x	Ahlborn	k. A.
		Externer T-Sensor, 6,0 m-Kabel	Scantronik Mugrauer GmbH	k. A.
	Mess-PC inkl. Netzteil	Lenovo ThinkPad	Lenovo	BLfD, IT
	Software ALMEMO 5690	AMR WinControl 8	Akrobit	TUM
	Kabel	USB 2.0 Typ A auf Typ B Druckerkabel, Kabel, 5 m	Goobay	Goobay
		Stromkabel für Steuerungstechnik	k. A.	k. A.
		Gigamodul Messleitung (5 m) BNC auf Ringkabelschuh	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH
	Zeitrelais	Zeitrelais finder 80.91.0.240.0000	finder	finder
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
CFK	Lamellen	Carbon-Express GmbH	Carbon-Express GmbH	
	Rohr 25,0 x 20,0 x 3000 mm Winding/Braiding	Carbon-Express GmbH	Carbon-Express GmbH	
	L-Winkel Profil 1250 mm	Carbon-Express GmbH	Carbon-Express GmbH	
Alu-Profilsschiene	40x40x2200 mm, PIL4040SNN	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Verbinder	40x40 Set, FAS 4041	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Gelenk	40 Set, GUS 4041	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Einschwenkmutter	M6, TIN4506	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Einschwenker	TIN9990	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Abdeckkappe	40x40 Set, CAP4041	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Winkel	100 einfach Set, GUS1101	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
	100 Set, GUS1001	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Transportkisten	Kunststoff	Robotunits GmbH	Robotunits GmbH	
Klebeband	Gleittape iglidur®	igus	k. A.	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Sensoranbringung	-	-	-	-
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Klebeband	Doppelseitiges Klebeband, 50 mm	RENOVO	k. A.
		Tesa® Verlegeband, extra stark klebend	k. A.	k. A.
Platte	KAPA® Line, 15,0 x 1000 x 1400 mm	k. A.	Kohlschein GmbH & Co. KG	
Binde- und Lösemittel	Tylose MH300 (2 % in demin. Wasser)	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente	

		Klucel® E	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Methocel™ A15	DuPont	DuPont
		Methocel™ A15C	DuPont	DuPont
		Lascaux® HV 360 (jetzt HV 303)	Lascaux	Lascaux
		Heißsiegelkleber	Workpro	Amazon
		Demin. Wasser	Carl Roth	Carl Roth
	Japanpapier	Langfaserpapier, weiß, zäh	Japico	Japico
	Hollytex® Polyester Vlies	3257 34 g / m³ und 30 g / m³	Deffner & Johann	Deffner & Johann
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Klimamonitoring	Befeuchter	B 500 Professional	Brune	BLfD, Brune
	Entfeuchter	OD 150 TH ECO	Air Blue	AirBlue
	Vorschaltgeräte	sicCareFOX-1H (ehemals PASSFox)	PASStec	PASStec
	Ventilator	TV 36-SL Tischventilator	Casa Fan	Casa Fan
	RH / TEMP-Sensoren	FHAD 46-C2, FHAD46C2L05	Ahlborn	Ahlborn
			FHAD 46-C2, FHAD46C2L10	Ahlborn
	OF / TEMP-Sensoren	FPA611	Ahlborn	Ahlborn
	USB-Logger	EL-USB-2 RH / TEMP DATA LOGGER	Lasca Electronics	Lasca Electronics
	Software	EL-USB-WIN	Lasca Electronics	Lasca Electronics
	Wannen für Be- und Entfeuchter	Auffangwanne für Kleingebinde, ohne Gitterrost, Kapazität 16 l Auffangwanne für Kleingebinde, ohne Gitterrost, Kapazität 64,5 l	SSI Schäfer Shop GmbH	SSI Schäfer Shop GmbH
			SSI Schäfer Shop GmbH	SSI Schäfer Shop GmbH
	Thermografiekamera	VarioCAM® high resolution32	InfraTec	InfraTec
	Software	IRBIS® remote 3.0	k. A.	TUM
MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
Mittel gegen Schimmel und Algen für Befeuchter	Wasserfrisch 1L	Brune	Brune	
Entkalker für Befeuchter	Kalklöser Entkalker für Luftbefeuchter 1 L	Brune	Brune	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Holzträgermonitoring	Wegaufnehmer Laser / Triangulationslaser	CMOS-Laserwegmesssystem, Sensorkopf mit Laserlinie, Messbereich +/- 40mm, LK-H157	Keyence	Keyence
		CMOS Laserwegmesssystem Steuerung ohne Display PNP, LK-G5001P	Keyence	Keyence
		LK-H-Verbindungskabel 10 m, CB-A10	Keyence	Keyence
		LK-H Erweiterungseinheit für einen Messkopf, LK-HA100	Keyence	Keyence
	Extensometer	Keramik-Endmaß FWA050TX2	Mitutoyo	Mitutoyo
	Feuchtefühler	FWA050TX2	Ahlborn	Ahlborn
	Handbohrer	k. A.	k. A.	BLfD
	Schraubendreher	k. A.	k. A.	BLfD
	Waage	ED623S-CW	Sartorius	Sartorius
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	-	-	-	-
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Datenmanagement	Datenlogger elektrischer Widerstand	Thermofox Universal Datenlogger	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH
	Datenlogger OF-T, Klimasensoren	ALMEMO 5690 Datenlogger inkl. Netzteil	Ahlborn	Ahlborn

	Software	SoftFOX - Analysesoftware (USB) CD-ROM inkl. USB- Interface	Scantronik Mugrauer GmbH	Scantronik Mugrauer GmbH	
	Router	Cudy-D37D	Cudy	TUM	
	Laptop	Thinkpad	Lenovo	TUM	
	Smart Steckdosen	Shelly Plug	k. A.	k. A.	
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
	Batterien	Mignonzellen, 8x AA	Aerocell	Aerocell	
		Mignonzellen, 8x AAA	Aerocell	Aerocell	
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
Malschichtmonitoring	Kamera (Zeitrafferaufnahmen)	Z6 II Objektiv Z 24-70 mm 1:4 S	Nikon Nikon	Nikon Nikon	
	Ringlicht	F&V R300 SE Daylight LED Ringleuchte, Objektiv Adapter Ring, CW, 5600K, 50°	Huss Licht & Ton	Huss Licht & Ton	
	Software	Photoshop	Adobe	Adobe	
	3D Streifenlichtscanner	COMET LED 5M	Carl Zeiss Optotechnik GmbH (ehemals Steinbichler Optotechnik GmbH)	Carl Zeiss Optotechnik GmbH (ehemals Steinbichler Optotechnik GmbH)	
	Laserscanner	Faro Focus S 350	FARO	FARO	
	Software	FARO Scene 2020.0.7 und Faro Scene 2020 Cloud Compare v.2.12.0	FARO FARO Cloud Compare	FARO FARO Cloud Compare	
		Geomagic Wrap, in GOM Inspect, bzw. seit 2023 dann ZEISS Inspect	Zeiss	Zeiss	
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
	ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Korrosivitäts- und Luftqualitätsmonitoring	Iair Sensoren	Iair Kupferfoliensensor	Care For Art	Care For Art
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	

3.2 Hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche

ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Herstellung Probekörper <i>s. a. entsprechender Anhang</i>	Zuschnitt Holz	k. A.	k. A.	TUM
	Abrichten Holz	k. A.	k. A.	TUM
	Zwingen	Ganzstahl-Zwingen, unterschiedliche Spannweiten und Ausladungen	BESSEY	Dieter Schmid Feine Werkzeuge
	Glasreibplatte	k. A.	k. A.	BLfD
	Glasläufer	Glasläufer, hoch, groß Ø ca. 10 cm, Gewicht ca. 1400 g	Made in Germany	Kremer Pigmente
	Waage	Feinwaage KB 1200-2N; d = 0,01 g; Max 1210 g	Kern	Kern
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Holz	Fichte (PCAB) lose Ware, 40x4100x490 mm, unbesäumt	Klöpperholz GmbH & Co. KG	
	Glas-Fritten	Filter Discs, Porosität 4, ø 90 mm	DURAN	DURAN
	Holztränke	Hasen-Hautleim (40% in demin. Wasser), Gries Demin. Wasser	Kremer Pigmente Carl Roth	Kremer Pigmente Carl Roth

	Grundierung	Champagnerkreide, natürliches Calciumcarbonat	ETIQUETTE VIOLETTE	Kremer Pigmente
		Demin. Wasser	Carl Roth	Carl Roth
		Grünspan (synthetisch), grobes, blau-grünes Pigment, enthält Kupfer	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
	Farben und deren Bindemittel	Blutstein (natürliches Eisenoxid), farbstark in Pulver	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Kremserweiß (Bleiweiß), Bleicarbonat, bleihaltig, giftig	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Demin. Wasser	Carl Roth	Carl Roth
		Sonneneingedicktes Leinöl, natur kaltgeschlagen	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Sangajol (Testbenzin)	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
	Überzug	Leinölfirnis (Mangan sikkativiert, kobaltfrei, schnelltrocknend)	Kremer Pigmente	Kremer Pigmente
		Borstenpinsel - 50mm	k. A.	Lieblingshaus
	Pinsel	Pinsel flach, aus Interlon Fasergemisch, Gr. 2	Lascaux	Kremer Pigmente
	Schleifpapier	180 bis 400er Körnung	k. A.	Bauhaus
Klebeband	Tesa® Aluminium Tape 10m x 50mm	Tesa®	Amazon	
	Aspergillus niger, Aspergillus nidulans, Penicillium chrysogenum und Penicillium griseofulvum	k. A.	TU München, Professur für Pilztechnologie in der Holzwissenschaft	
Pilzmischung				
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	-	-	-	-
Baukonstruktives/bauphysikalisches Modell: Masterarbeit Kocan	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Holz	Fichte (PCAB) lose Ware, 40x4100x490 mm, unbesäumt	k. A.	k. A.
	Acrylfarbe	Galeria Acrylic Titanweiß	Winsor&Newton	Schachinger Künstlerbedarf
	Kunststoffbehälter	k. A.	k. A.	k. A.
	Klebeband	Tesa® Aluminium Tape 10m x 50mm	Tesa®	Amazon
	Lehmbauplatte	k. A.	Lehmorenge	Bestand TUM
	Textil	Baumwolle	k. A.	Galeria Kaufhof
	Salzlösung	NaCl+destill. Wasser	k. A.	k. A.
	Infusionsbeutel	k. A.	k. A.	k. A.
	Präzisionstropfenregler	k. A.	k. A.	k. A.
	Elektronisch automatisierte Wasserzufuhr auf Basis der Arduino-Plattform	Eigenentwicklung	k. A.	k. A.
	Weitere?	k. A.	k. A.	k. A.
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Bestimmung der Materialkennndaten	Prüfgefäß	k. A.	k. A.	IBP
	Klimakammer	k. A.	k. A.	IBP
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Ammoniumdihydrogenphosphat	k. A.	k. A.	IBP
	Silicagel	k. A.	k. A.	IBP
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Hygrothermische Simulation mit WUFI®	Software	WUFI® Pro	k. A.	IBP
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	-	-	-	-
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE

Klimaschrankversuche an Probekörpern	Klimaschrank	ClimeEvent C/340/40/3/MWeiss	Umwelttechnik GmbH	Weiss Umwelttechnik GmbH
	Waage	k. A.	k. A.	KDWT
	3D Streifenlichtscanner	COMET L3D 5M	Carl Zeiss Optotechnik GmbH (ehemals Steinbichler Optotechnik GmbH)	Carl Zeiss Optotechnik GmbH (ehemals Steinbichler Optotechnik GmbH)
	Laserscanner	Faro Focus S 350	FARO	FARO
	Software	FARO Scene 2020.0.7 und Faro Scene 2020 Cloud Compare v.2.12.0 Geomagic Wrap, in GOM Inspect, bzw. seit 2023 dann ZEISS Inspect	FARO	FARO
			FARO	FARO
			Cloud Compare	Cloud Compare
MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE	
-	-	-	-	

3.3 Weitere Untersuchungen

ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Luftströmungsmessung	Nebelhandgerät	FlowMarker	Flow Marker	Flow Marker
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Nebelfluid	FlowMarker Fog Fluid	Safex (Günther Schaidt Safex® – Chemie GmbH Schenefeld)	Flow Marker
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Luftwechselrate	Notebook	k. A.	k. A.	IDK
	Gerät zur Einbringung des Referenzgases	k. A.	k. A.	IDK
	Sensoren	k. A.	k. A.	IDK
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Referenzgas	CO ₂	k. A.	IDK
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Thermografie	Kamera	VarioCAM® high resolution32	InfraTec	InfraTec
	Software	IRBIS® remote 3.0	k. A.	TUM
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
-	-	-	-	-
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Untersuchung der Raumschale	XRD-Messung: Siehe Untersuchungsbericht BLfD			
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
-	-	-	-	-
ANLASS	GERÄTE	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
Schimmeluntersuchung und -monitoring	ATP-Gerät	kikkoman Lumitester PD-20	Kikkoman Biochemifa	Kikkoman Biochemifa
	ATP-Messstäbchen	LuciPac™ Pen	Kikkoman Biochemifa	Kikkoman Biochemifa
	Luftfiltergerät	Atem X	IQ Air	IQ Air
	Software	AirVisual	IQ Air	IQ Air
	Staubsauger	MUNTZ 555-MU-E-HEPA Museumsstaubsauger	MUNTZ	Anton Glaser
	MATERIALIEN	MODELL	HERSTELLER	BEZUGSQUELLE
	Lösemittel	Demin. Wasser	Carl Roth	Carl Roth
		Ethanol	Carl Roth	Carl Roth
	Inkubationsträger	Kartoffel-Dextrose-Agar (PDA)	k. A.	TU München, Pilztechnologie Holzwissenschaft
	Staubsaugerbeutel	MUNTZ PH-722	MUNTZ	Anton Glaser