

3D-Erfassung von Schalensteinen im Landkreis Stade durch SfM-Photogrammetrie und ihre Visualisierung in Cesium

Mathias Bratke¹, Thomas P. Kersten¹, Maren Lindstaedt² & Daniel Nösler³

Zusammenfassung

Bislang wurden im Landkreis Stade 16 Schalensteine entdeckt. Eine solche Funddichte gibt es sonst nirgendwo in Niedersachsen. Als Schalensteine werden Findlinge bezeichnet, in die in prähistorischer Zeit kleine Mulden gepickelt oder geschliffen wurden. Dieser Brauch begann vor mehr als 4.500 Jahren, am Ende der Jungsteinzeit. Während der Bronze- und Eisenzeit wurde die Herstellung von Schalensteinen schließlich zu einem europaweiten Phänomen. Ihre genaue Funktion ist jedoch immer noch unbekannt. Im Rahmen einer Projektarbeit mit der Kreisarchäologie in Agathenburg (Landkreis Stade) wurden diese Schalensteine mittels Structure-from-Motion-Photogrammetrie erfasst und dokumentiert. Ihre Positionen wurden mit zwei Smartphone-Apps und mit einem präzisen GNSS erfasst. Die Aufnahmen der Schalensteine erfolgten mittels Bildserien von digitalen Spiegelreflexkameras (Nikon D7500, D90 und Sony Alpha 7). Aus den orientierten und skalierten Bildverbänden wurden in der Software „Agisoft Metashape“ vermaschte und texturierte 3D-Modelle erstellt. Durch die Berechnung der Differenz zwischen der jeweiligen konvexen Hülle und dem Originalmodell konnten die gepickelten Mulden anschaulich visualisiert werden. Anschließend wurden die 3D-Modelle der Schalensteine auf der Open-Source-Plattform CesiumJS im Internet visualisiert. Zudem wurde als Alternative eine Web-Präsentation mit Cesium Stories erstellt. Beide Visualisierungsansätze erlaubten es, die Modelle mit weiteren Informationen zu verknüpfen und interaktive, webbasierte Präsentationen zu erstellen. Mit diesen Darstellungen im Internet stehen die Informationen der Schalensteine für weitere Forschungen zur Verfügung, um die Bedeutung dieser Schalensteine möglicherweise zukünftig zu verstehen.

Schlagwörter 3D Archäologie Dreiecksvermaschung Modellierung Texturen Visualisierung

1 Einführung

Menschen stoßen immer wieder auf Überreste vergangener Zeitalter. Dazu gehören auch die sogenannten Schalensteine (siehe Abb. 1). Dabei handelt es sich um Steine, die mit meist halbkugelligen Vertiefungen, den sogenannten Schalen, versehen sind. Diese wurden vor bis zu 4.500 Jahren in die Steine gepickt oder geschliffen. Mit 16 bekannten Schalensteinen weist der Landkreis Stade eine hohe Dichte dieser Steine auf. Schon seit vielen Jahrzehnten sind diese Schalensteine Bestandteil archäologischer Forschung. Ihr Ursprung und Zweck konnten jedoch bis heute nicht eindeutig geklärt werden (Nösler, 2024). Die archäologische Dokumentation dieser Steine ist daher von großer Bedeutung. Klassische Dokumentationsmethoden wie Fotos, Zeichnungen und einfache Vermessungen liefern nur begrenzt räumliche Informationen und sind zudem zeitaufwendig. Insbesondere die

Schalen lassen sich mit herkömmlichen Methoden nur eingeschränkt darstellen. Daher werden moderne Methoden gesucht, um die Dokumentation zu vereinfachen, die wissenschaftliche Erschließung solcher Kulturdenkmäler zu verbessern und deren langfristigen Erhalt zu ermöglichen.



Abbildung 1 Typische Schalensteine im Landkreis Stade

Photogrammetrische Verfahren wie das Structure-from-Motion (SfM) haben sich bei der 3D-Aufnahme archäologischer Objekte bewährt (Kersten & Lindstaedt, 2012; 2017).

¹ HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetry & Laserscanning, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg, E-Mail: [Mathias.Bratke, Thomas.Kersten]@hcu-hamburg.de

² Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung, Neuenfelder Straße 19, 21109 Hamburg, E-Mail: maren.lindstaedt@gv.hamburg.de

³ Kreisarchäologie, Landkreis Stade, Schloss Agathenburg, 21684 Agathenburg, E-Mail: daniel.noesler@landkreis-stade.de

Das Verfahren wird in Luhmann (2023) ausführlich beschrieben. Es bietet nutzerfreundliche Möglichkeiten, Objekte wie die Schalensteine ohne hohen technischen Aufwand und teure Spezialausrüstung detailreich, maßstabgetreu und dreidimensional zu erfassen. Die aufgenommenen Bildverbände der Steine können in einer Bündelblockausgleichung automatisch orientiert und die Kameras kalibriert werden. Anschließend werden durch Dense Image Matching dichte, farbige 3D-Punktwolken generiert. Aus diesen werden durch Dreiecksvermaschung aussagekräftige 3D-Modelle der Steine erstellt (Luhmann, 2023: 488). Damit werden die Schalensteine nicht nur auf unbestimmte Zeit digital konserviert, sondern sie können auch einfacher für geometrische und visuelle Analysen interessierten Fachleuten zur Verfügung gestellt werden. Die 3D-Objekte können zudem für das Publikum in Museen oder im Internet präsentiert werden. Zusätzlich kann die Position der Schalensteine über einfache Smartphone-Apps mit der internen Sensorik der mobilen Geräte bestimmt werden.

Im Rahmen einer Projektarbeit mit der Kreisarchäologie in Agathenburg (Landkreis Stade) wurden zehn Schalensteine mittels SfM-Photogrammetrie aufgenommen und dokumentiert. Dabei wurde die jeweilige Position der Schalensteine mit einem GNSS und zwei Smartphone-Apps erfasst. Die aus den Bildserien generierten texturierten 3D-Modelle und die relevanten Metadaten wurden in der Open-Source-Plattform CesiumJS sowie mit Cesium Stories zusammengestellt und mit den entsprechenden Informationen visualisiert.

2 Schalensteine

Als Schalensteine werden Felsblöcke mit künstlich eingearbeiteten Vertiefungen, sogenannten Schalen oder Schälchen, bezeichnet (Neururer, 2016; siehe Abb. 1). Die Schälchen wurden in den Stein geschliffen oder gepickt (Nösler, 2024). Schalensteine sind häufig in der Nähe von Grabhügeln oder historischen Wegen zu finden (Neururer, 2016). Eine Übersicht der in Europa dokumentierten Felszeichnungen, zu denen auch die Schalensteine gehören, findet sich bei Schwegler (2020). Oft wird jedoch nicht gezielt nach ihnen gesucht und teilweise ist auch nicht bekannt, dass diese Steine etwas Besonderes sind. Im Landkreis Stade konnten bisher 16 Schalensteine entdeckt werden. In ganz Niedersachsen sind es 60, damit hat der Landkreis Stade die höchste Funddichte im Bundesland (Nösler, 2024). Die geringeren Funddichten in anderen Regionen Niedersachsens sowie weltweit lassen sich häufig auch mit einem unterschiedlichen Forschungsstand erklären (Hesse, 2003).

Die Datierung der Schalensteine ist aufgrund häufig fehlender Befunde schwierig. In den meisten Fällen wird eine Datierung in das ausgehende Neolithikum bis in die vorrömische Eisenzeit mit einem deutlichen Verbreitungsschwerpunkt in der älteren Bronzezeit angenommen (Hesse, 2003). Da viele Schalensteine entlang damaliger Fernwege gefunden wurden, wird vermutet, dass das Anbringen von Schälchen in vorhandenen Steinen oder das Platzieren von Schalensteinen an Wegen eine Art Bittopfer für eine sichere Reise darstellte. Ebenso wurden viele Schalensteine in der Nähe von Grabhügeln gefunden (Ziermann & Alsdorf, 2002). Dies legt nahe, dass die Steine auch eine wichtige Rolle bei Bestattungen spielten. Umgekehrt können die Fundhäufigkeiten und die räumliche Verteilung der Steine auch Hinweise auf die damalige Nutzung der Fundorte sein. Beispielsweise kann es sich um Siedlungsgebiete oder anderweitig wichtige Gebiete gehandelt haben. Es gibt außerdem Vermutungen, dass die Schalen ein Zahlensystem oder Sternbilder darstellen. Dies konnte jedoch bisher nicht nachgewiesen werden. Allerdings konnten Zusammenhänge mit Opfergaben, Zeremonien und Festen festgestellt werden, auch im Landkreis Stade. Die tatsächlichen Verwendungszwecke der Schalensteine bleiben dennoch bis heute ungeklärt (Nösler, 2024).

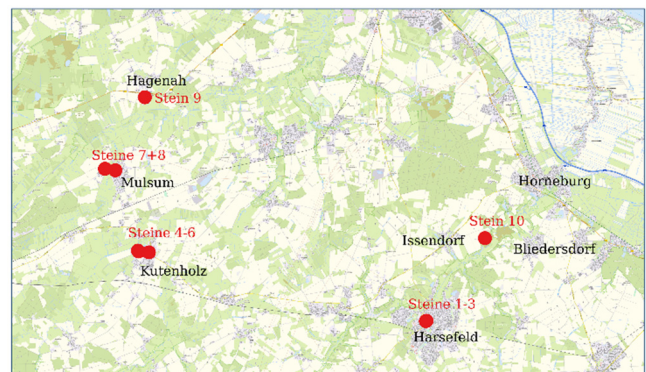


Abbildung 2 Übersicht der photogrammetrisch erfassten Schalensteine im Landkreis Stade

In den meisten Fällen lässt sich hinsichtlich der Form der Schalen eine unregelmäßig runde Struktur feststellen. Durchmesser und Tiefe der Schalen variieren stark. Auch die Anzahl der Schalen pro Stein unterscheidet sich deutlich. So konnten auf manchen Steinen im Landkreis Stade nur drei Schalen identifiziert werden, auf anderen hingegen über zehn. Es gibt sogar Exemplare mit über 100 Vertiefungen (Nösler, 2024). Für die Schalensteine in Mulsum (unter anderem der in Abbildung 1 links dargestellte Schalenstein) wurden archäologische Untersuchungen durchgeführt, die in Ziermann und Alsdorf (2002) dokumentiert sind. Abb. 2

zeigt eine Übersicht der photogrammetrisch erfassten Schalensteine im Landkreis Stade.

3 Datenerfassung

Die Datenerfassung wurde am 7. Mai 2025 durchgeführt. Dabei wurden die Schalensteine photogrammetrisch mit insgesamt drei digitalen Spiegelreflexkameras aufgenommen: einer Nikon D7500 mit einem Nikkor-Objektiv (18 mm), einer D90 mit einem Nikkor-Objektiv (24 mm) und einer Sony Alpha ILCE-7C mit einem Zeiss-Objektiv (FE 24–70 mm). Da die Steine teilweise vermoost und eingewachsen waren, musste vor der Bildaufnahme der angrenzende Bewuchs im notwendigen Rahmen entfernt und die Steine abgefegt werden. Pro Stein wurden jeweils mit zwei Kameras zwischen 30 und 150 Aufnahmen gemacht. Im Schnitt wurden 92 Bilder je Kamera pro Stein aufgenommen, da die Steine frei zugänglich waren und somit eine ausreichend gute Anordnung der Bilder gewährleistet werden konnte. Ein Schalenstein wurde auf dem Dachboden des Heimathauses der Gemeinde Kutenholz aufgenommen. Da es sich bei der Mehrbildaufnahme um geringe Genauigkeitsanforderungen handelte, wurde der Autofokus nicht abgeschaltet; die Brennweite, die Sensorempfindlichkeit und die Blende wurden jedoch für die spätere Kamerakalibrierung festgehalten. Im Objektraum wurden für die spätere Skalierung der Bildverbände ein kalibrierter Maßstab horizontal und zwei Nivellierlatten vertikal positioniert (siehe Abb. 3). Nach der photogrammetrischen Aufnahme wurden Panoramabilder der Umgebung der meisten Steine mit einem Smartphone (Samsung Galaxy S24 Ultra) gemacht, um diese in die CesiumJS-Anwendung einbinden zu können (siehe Abb. 4).

Zudem wurden die Koordinaten von fünf Steinen mit einem GNSS-Empfänger von Trimble (R12i-GNSS auf einem 2 m langen Carbon-Lotstab und einem Trimble TDC6 Controller) sowie mit zwei Smartphone-Apps („Mgrs & UTM Map“ und „GPS Daten – GPS-Koordinaten“) bestimmt, um die Genauigkeit der kostenlosen Smartphone-Apps einschätzen zu können. Beim anschließenden Vergleich wurde festgestellt, dass die durch die App „Mgrs & UTM Map“ ermittelten 2D-Koordinaten im Durchschnitt ca. 6 m von den durch den GNSS-Empfänger von Trimble bestimmten Koordinaten abweichen. Bei der App „GPS Daten – GPS Koordinaten“ sind es ca. 3,5 m in der Lage und ca. 5 m in der Höhe. Die Höhe konnte nur mit der App „GPS Daten – GPS Koordinaten“ bestimmt werden. Als maximale Differenz wurde bei einer Steinposition eine 2D-Abweichung von ca. 15,2 m mit der App „Mgrs & UTM Map“ festgestellt.



Abbildung 3 Maßstäbe im Objektraum (links) und Aufnahmeconfiguration (schwarze Punkte als Bildpositionen) um einen Stein (rechts)



Abbildung 4 Panoramaaufnahme um einen Schalenstein

4 Erstellung der 3D-Modelle

4.1 Verarbeitung der Bildverbände mit Agisoft Metashape

Die verschiedenen Bildverbände der Schalensteine wurden mit der Software „Agisoft Metashape Professional 1.8.4“ der Firma Agisoft LLC verarbeitet. Um Beeinträchtigungen der Qualität von Ausrichtung und Textur möglichst zu vermeiden, wurde die automatische Bildqualitätsbewertung von Agisoft Metashape angewendet. Diese bestimmt für jedes Bild einen Wert zwischen 0 und 1: Bilder mit einem Wert unter 0,5 wurden nicht für den Ausrichtungsprozess und die Texturgenerierung verwendet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Objektdeckung durch eine ausreichende Anzahl von Bildern trotzdem gewährleistet war.

Für die Berechnung der relativen Bildorientierung (Alignment) und die Kamerakalibrierung mittels Bündelblockausgleichung wurde in den Originalbildern mit der Qualität „high“ eine dünne Punktwolke aus automatisch gemessenen Verknüpfungspunkten generiert. Nur bei einem Stein musste die Qualität auf „medium“ gesetzt werden, um eine erfolgreiche Bildorientierung zu erreichen. Nach der Orientierung der Bilder wurden die Marker auf drei im Objektraum platzierten Maßstäben zur korrekten Skalierung in den Bildern gemessen. Die Abweichungen der Maßstäbe lagen zwischen 0,7 und 2,0 mm, der Durchschnitt betrug 1,3 mm. Dies ist für diese Aufgabe ausreichend genau. Vor der finalen Bündelblockausgleichung wurden ca. 15 % der Bildpunkte pro Stein als Messfehler in den Verknüpfungspunkten eliminiert, und zwar durch verschiedene Filterungen

(Projektionsgenauigkeit, Reprojektionsfehler und Rekonstruktionsunsicherheit). Nach der Fehlerbereinigung wurde eine endgültige Bündelblockausgleichung durchgeführt, um die äußere Orientierung der Bilder und die Kamerakalibrierungsparameter zu bestimmen. Anhand der geringen Standardabweichungen der inneren Orientierungsparameter konnte eine signifikante Kalibrierung der Kameras bestätigt werden. Im Anschluss erfolgte die Erzeugung der dichten Punktwolke in Metashape auf Grundlage von Tiefenkarten, die durch Dense-Image-Matching je Bildpaar mit der Qualität „high“ und einer milden Tiefenfilterung berechnet wurden.

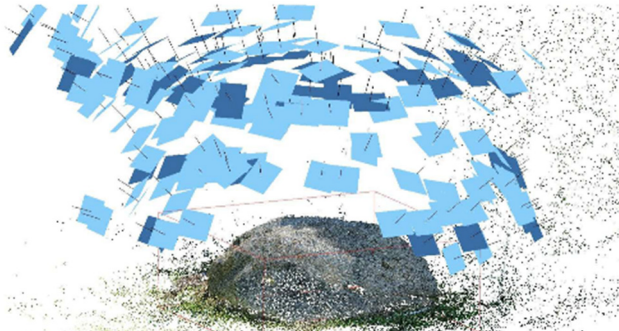


Abbildung 5 Dünne Punktwolke eines Schalensteins mit orientierten Bildpositionen (blau)



Abbildung 6 Dichte farbige Punktwolke eines Schalensteins

Basierend auf der dichten Punktwolke wurde für jeden Stein ein Mesh aus Dreiecksflächen als 3D-Modell ohne Textur berechnet (siehe Abb. 7, links). Vor der Berechnung wurde die maximale Anzahl der Dreiecksflächen auf ein Fünftel der Punktanzahl der verwendeten dichten Punktwolke (Qualität „high“) festgelegt. Außerdem wurde die Interpolation kleinerer Löcher in der Steinoberfläche ermöglicht, um eine geschlossene Oberfläche zu erhalten. Um neben den texturlosen Modellen auch realistisch aussehende Modelle zu erhalten, wurde die grundlegende Textur jedes Schalensteins anhand der orientierten Bilder des Modells

erstellt (siehe Abb. 7, rechts). Die Schalensteine wurden als Mesh im GLB-Format für die nachfolgende Bearbeitung in MeshLab sowie als gekacheltes Modell im Cesium-ZIP-Format für die Nutzung in der Cesium Ion Cloud exportiert.



Abbildung 7 Vermaschtes 3D-Modell eines Schalensteins mit den Schalen an der oberen Fläche und Pflugspuren am unteren Bereich (links) und texturiertes 3D-Modell eines Schalensteins (rechts)

4.2 Bearbeitung der 3D-Modelle mit MeshLab

Das zentrale Ziel der Modellierung der Schalensteine war eine bessere Identifikation und Sichtbarkeit der Schalen. Bereits durch die Entfernung der Textur konnte eine Verbesserung der Sichtbarkeit der Schalen erreicht werden. Um eine noch bessere Lösung zu erzielen, wurde mithilfe der Software MeshLab eine konvexe Hülle um jeden Stein berechnet. Eine konvexe Hülle stellt die kleinste das 3D-Modell umschließende Fläche dar, bei der alle Außenwinkel nach außen gewölbt, also konvex, sind (Schiewe, 2022: 104). In einem zweiten Schritt wurde die Differenz zwischen der konvexen Hülle und dem Originalmodell berechnet. Anschließend wurde das 3D-Modell auf Grundlage dieser Differenz eingefärbt. An den Stellen des Modells, an denen der Abstand zwischen der konvexen Hülle und dem Originalmodell groß ist, wurde der Stein rot eingefärbt, an Stellen mit keiner Differenz hingegen blau (siehe Abb. 8). Dieses Verfahren ist zwar schon sehr gut, aber auch hierbei besteht die Gefahr, dass Schalen auf den Steinen übersehen werden, wenn sie beispielsweise in einer großflächigen Einbuchtung des Steins liegen.

Abschließend wurden die 3D-Modelle nach der Einfärbung auf Grundlage der Distanz zwischen konvexer Hülle und Originalmodell als Mesh im OBJ-Format exportiert. Ein Export im GLB-Format ist mit MeshLab nicht möglich. Da dieses Format jedoch Voraussetzung für das Laden von lokal abgespeicherten Modellen in die CesiumJS-Anwendung ist, wurden die Modelle mit der Software Metashape zurück in das GLB-Format konvertiert. Zusätzlich wurde in diesem Zuge aus den eingefärbten Modellen auch ein gekacheltes

Modell erstellt. Da Metashape dafür eine Textur benötigt, wurde die bereits vorhandene Einfärbung des Meshes in Metashape als Textur definiert. Das gekachelte Modell konnte im Cesium-ZIP-Format aus Metashape exportiert und direkt in die Cesium Ion Cloud hochgeladen werden.

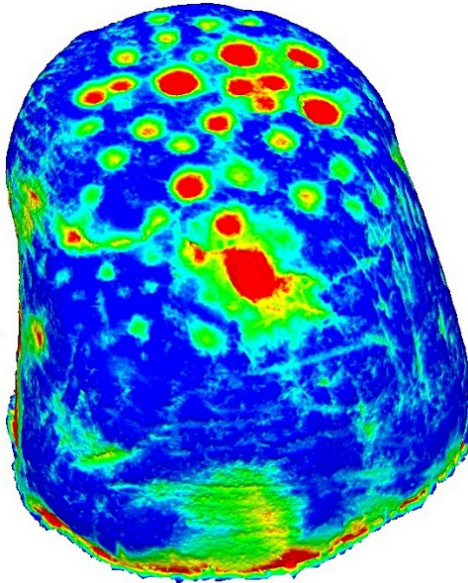


Abbildung 8 Mit MeshLab erzeugte Einfärbung eines 3D-Modell eines Schalensteines (Stein 2) zur besseren Visualisierung der Schalen

4.3 Ableitung und Interpretation von Informationen aus den 3D-Daten

Anhand der 3D-Modelle lassen sich viele relevante Informationen ableiten. Diese werden im Folgenden stichpunktartig aufgelistet:

- Länge, Breite, Höhe, Oberfläche und Volumen des gesamten Steins (Volumen und Oberfläche des Steins können nur abgeschätzt werden, da die Unterseite der meisten Steine nicht erfasst werden konnte)
- Räumliche Verteilung (Lage der Schälchen auf dem Stein und Lage der Schälchen zueinander) sowie der Durchmesser, die Form und die Tiefe der Schälchen auf dem Stein
- Auffälligkeiten auf der Steinoberfläche (abgesehen von den Schälchen), z. B. Risse, Ausbrüche, Schleifspuren oder Beschädigungen durch landwirtschaftliche Maschinen (z. B. Pflugspuren)

Diese digitalen 3D-Daten ermöglichen eine erweiterte und flexiblere Erforschung der Steine, da eine vollständige Dokumentation der Steine mit hoher Auflösung über die im folgenden Kapitel vorgestellten Webapplikationen verfügbar ist.

5 Integration und Visualisierung in Cesium

In diesem Kapitel wird nach der Erstellung der 3D-Modelle die Visualisierung der Schalensteine mit CesiumJS und Cesium Stories vorgestellt. Für die performante Darstellung der Grafiken wird WebGL verwendet. Eine detaillierte Beschreibung ist in Bratke (2025) zusammengefasst.

5.1 CesiumJS

Für die Erstellung einer Webapplikation mit den freien Tools von CesiumJS wird mindestens eine HTML-Datei benötigt, die auch JS- und CSS-Abschnitte enthalten kann. In den meisten Fällen werden die JS- und CSS-Abschnitte jedoch in jeweils eine JS- und eine CSS-Datei ausgelagert. Um eine Cesium-Webapplikation zu erstellen, die über die Inhalte der Schnellstart-Anleitung von Cesium hinausgeht, sind Programmierkenntnisse in HTML, JavaScript und CSS erforderlich.

Die Datei *index.html* kann während der Entwicklung fortlaufend erweitert werden. Für die im Rahmen dieser Projektarbeit erstellte CesiumJS-Anwendung wurden eine Koordinatenanzeige, eine Seitenleiste, Copyright-Hinweise und einige Buttons hinzugefügt. Parallel dazu wurde in der CSS-Datei das Design dieser Elemente mittels der Klassen und IDs festgelegt.

Um CesiumJS nutzen zu können, muss in der initialen JavaScript-Datei (*index.js*) zunächst ein Access Token (ein digitaler Schlüsselcode) angegeben werden. Beim Erstellen des Tokens kann festgelegt werden, auf welche Ressourcen mit dem Token zugegriffen und wie das Token verwendet werden darf (Cesium GS Inc., 2025a). Für die Zwecke dieser Arbeit reichte es aus, die Standardeinstellungen von Cesium für Zugriffsregelungen für öffentliche Bereiche beizubehalten, d. h. das Lesen von Metadaten, der Zugriff auf die in der Cesium-Ion-Cloud vorhandenen Geodaten sowie die Cesium-eigene Suche nach Orten (*Geocoder*) zu erlauben (Cesium GS Inc., 2025b). Der Token kann über einen eigenen Cesium-Ion-Account erhalten werden. Dafür sind eine gültige E-Mail-Adresse, ein Benutzername und ein Passwort erforderlich. Cesium Ion ist ein von Cesium bereitgestellter Cloud-Service. In die Cesium Ion Cloud können verschiedene Arten geodatenbasierter Inhalte wie 3D-Gebäudemodelle, Punktwolken, Geländedaten etc. in unterschiedlichen Dateiformaten hochgeladen werden. Bei Bedarf können diese in Cesium-kompatible Formate (z. B. 3D-Tiles) konvertiert werden. Eine Übersicht über die unterstützten Datenformate wird auf der Webseite von Cesium bereitgestellt.

In der Datei *index.js* wurden zudem drei Möglichkeiten zur Integration von Basiskarten umgesetzt. Einerseits wurden Sentinel-2-Bilder aus der Cesium Ion Cloud anhand der Asset-ID geladen. Die Asset-ID ist für jeden Datensatz in der Cloud individuell und wird beim Hochladen der Daten automatisch vergeben. Andererseits wurde über einen Link die OpenStreetMap vom OpenStreetMap.org Tile-Server geladen. Die dritte Möglichkeit war das Laden der Natural-Earth-II-Basemap als gekachelte Karte im JPG-Format, die lokal in der CesiumJS-Bibliothek abgelegt ist. Alle drei Varianten sind sehr ähnlich aufgebaut. Je nachdem, ob die Karten in einem lokalen Projektverzeichnis vorliegen, über eine URL im Internet erreichbar sind oder in der Cesium Ion Cloud gespeichert sind, kann eine der drei Varianten ausgewählt werden. Auch das Einbinden eines WMS als Basiskarte wäre möglich.

In der Skriptdatei *layer.js* wurden zusätzliche Layer und das Terrain der Anwendung hinzugefügt. Das Terrain wurde als digitales Geländemodell vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) kostenlos als TIF-Datei online zur Verfügung gestellt. Da Cesium keine TIF-Dateien direkt als Terrain darstellen kann, wurden die Dateien mit der Cesium Ion Cloud in ein Quantized Mesh konvertiert (siehe Tabelle 1) (Cesium GS Inc., 2025c). Das Quantized Mesh konnte dann entweder direkt über die Asset-ID aufgerufen oder heruntergeladen und lokal eingebunden werden.

Als zusätzliche Layer wurden neben den Steinmodellen LoD2-Gebäudemodelle, DOPs mit einer Auflösung von 20 cm und ein Polygon der Verwaltungsgrenze des Landkreises Stade eingebunden (siehe Abb. 9). Diese dienen der realistischeren Darstellung der Umgebung der Steine. Auch die LoD2-Gebäudemodelle und die DOPs mussten für die Verwendung in Cesium konvertiert werden (siehe Tabelle 1). Die DOPs hätten auch über ein WMS eingebunden werden können. Dies hat in diesem Projekt jedoch zu Performanceproblemen geführt, weshalb es nicht final umgesetzt wurde.

Tabelle 1 Datenquellen und Formate der Geodaten, bei denen eine Konvertierung in ein Cesium-kompatibles Format nötig war, sowie die für die Konvertierung verwendeten Werkzeuge

Daten	DGM	LoD2	DOP
Datenquelle	LGLN	LGLN	LGLN
Datenformat	TIF	GML	TIF
Werkzeug zur Konvertier. neues Datenformat	Cesium Ion Cloud quantized-mesh	Cesium Ion Cloud 3D-Tiles	Cesium Ion Cloud Rasterbilder

Das Polygon der Verwaltungsgrenze lag im GeoJSON-Format vor und konnte daher direkt in dieses eingebunden werden. Da die GeoJSON-Datei zunächst noch alle Landkreise Niedersachsens enthielt, wurde die Umgrenzung des Landkreises Stade mit der Open-Source-Software QGIS separiert. In der Webapplikation können die DOPs, die LoD2-Gebäudemodelle und das Umgrenzungspolygon des Landkreises Stade über einen Layerswitcher ein- und ausgeblendet werden (siehe Abb. 11).

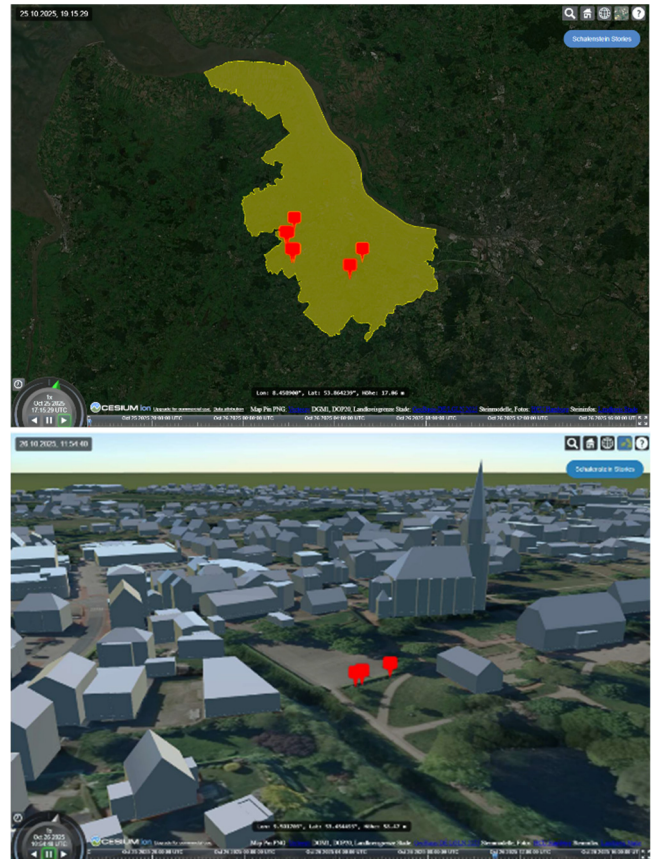


Abbildung 9 Visualisierung der Positionen von Schalensteinen mit CesiumJS mit roten Pins in einem Polygon (gelb) der Verwaltungsgrenze des Landkreises Stade (oben) und mit einem 3D-Stadtmodell (LoD 2) (unten)

Das Skript zum korrekten Laden der Modelle der Schalensteine in der CesiumJS-Anwendung wurde in der Datei *models.js* geschrieben. Jeder Stein kann als texturiertes und eingefärbtes Modell oder als Modell ohne Textur angezeigt werden (siehe Abb. 10). In der finalen Version der Webanwendung werden die Steinmodelle aus der Cesium Ion Cloud mittels der Asset-ID geladen. Dazu wurden die 3D-Modelle zunächst im GLB-Format in die Cloud hochgeladen und währenddessen in 3D-Kacheln konvertiert. Es stellte sich jedoch heraus, dass dies bei größeren Modellen (ab

140 MB) nicht erfolgreich funktionierte. Deswegen wurde dieses Vorgehen teilweise verworfen. Die texturierten Modelle konnten alternativ mit Metashape als gekachelte Modelle erstellt und so direkt und ohne Konvertierung in die Cesium Ion Cloud hochgeladen werden. Dieses Vorgehen funktionierte auch für die eingefärbten Modelle einwandfrei, die im OBJ-Format aus MeshLab exportiert wurden, da die Einfärbung in Metashape als Textur festgelegt werden konnte. Für Modelle ohne Textur kann Metashape jedoch keine gekachelten Modelle erstellen. Die drei größten Modelle wurden deswegen in Metashape erneut berechnet, diesmal jedoch mit reduzierter Qualität bzw. Auflösung, um die Dateigröße zu verringern. Die reduzierten Modelle (max. 70 MB) wurden im FBX-Format exportiert, da dieses Format etwas weniger Speicherplatz benötigt als das GLB-Format. Die Modelle konnten erfolgreich in die Cesium Ion Cloud hochgeladen und dabei in 3D-Kacheln konvertiert werden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 Datenquellen und Formate der Schalensteinmodelle sowie die verwendeten Werkzeuge für die Konvertierung in ein Cesium-kompatibles Format

Steinmodell	Texturlos	Texturiert	Eingefärbt
Datenformat	FBX	3D-Tiles	OBJ
Werkzeug zur Konvertier.	Cesium Ion Cloud	Nicht notwendig	Agisoft Metashape
neues Datenformat	3D-Tiles	-	3D-Tiles

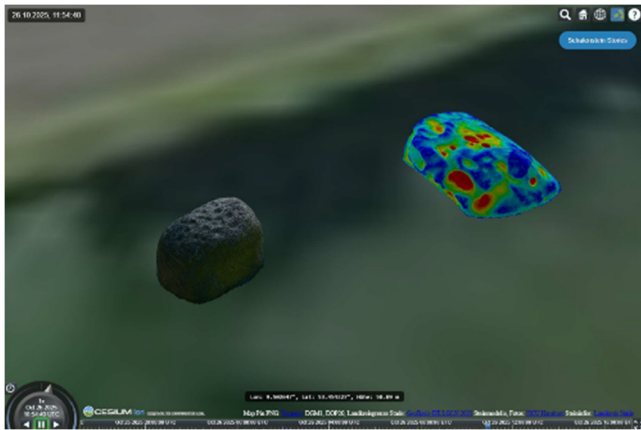


Abbildung 10 Visualisierung der Schalensteinen mit CesiumJS mit unterschiedlicher Textur (texturiert und eingefärbt)

Es ist auch möglich, lokal abgespeicherte Steinmodelle im GLB-Format anstelle der Modelle aus der Cesium Ion Cloud in die Webanwendung zu laden. So könnte beispielsweise eine Offline-Version der Anwendung erstellt werden. Nachdem die ersten Steinmodelle nach diesem Vorgehen

testweise geladen wurden, kam es zu einigen Browserabstürzen. Aus diesem Grund wurde entschieden, diese Vorgehensweise nicht standardmäßig in der finalen Version der Webapplikation zu ermöglichen. Die Browserabstürze traten vermutlich auf, weil die Dateigrößen der Steinmodelle im GLB-Format zu groß waren. Falls also in Zukunft eine Offline-Version der Schalensteine-Anwendung benötigt wird, könnte ein Browserabsturz vermieden werden, indem die Dateigrößen der 3D-Modelle reduziert werden.

Es ist möglich, weitere Steinmodelle der Anwendung „Schalensteine“ hinzuzufügen. Eine entsprechende Anleitung dazu wurde in der Datei *README.md* bereitgestellt.

Um in einer Webanwendung Informationen, Buttons und Einstellungsmöglichkeiten anzuzeigen, wird der Benutzeroberfläche häufig ein Menü hinzugefügt. Für die Schalensteine-Anwendung wurde eine entsprechende Seitenleiste programmiert. Diese enthält für jeden Schalenstein ein ausklappbares Element mit Informationen zu den Steinen, Bildern des jeweiligen Schalensteins und mehreren Buttons. Um automatisch zu einem Schalenstein zu „fliegen“, kann der Button „Zoomen auf“ angeklickt werden. Durch Klicken auf den Button „Umkreisen starten/stoppen“ wird der entsprechende Schalenstein von der Kamera umkreist. Falls die Umkreisung bereits gestartet wurde, wird sie durch Klicken auf den Button gestoppt.

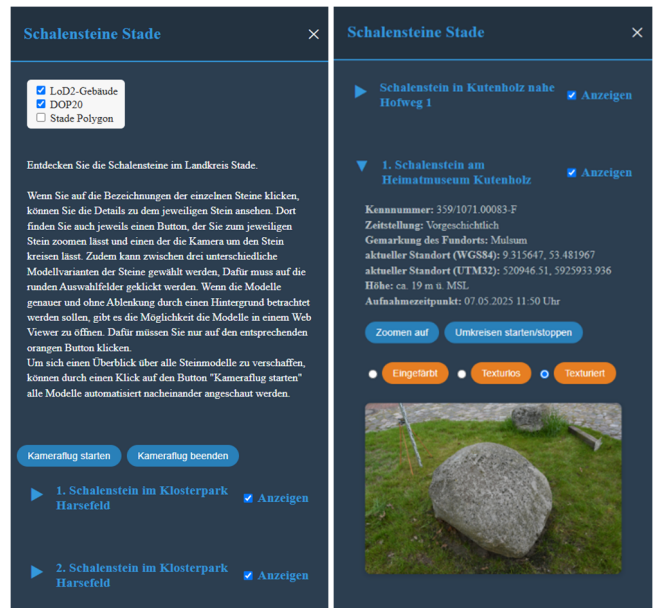


Abbildung 11 Seitenleiste in der CesiumJS-Webanwendung mit Informationen zu den Schalensteinen

Neben den beiden bereits genannten Buttons gibt es drei weitere mit den Beschriftungen „Eingefärbt“, „Texturlos“ und „Texturiert“. Durch Klicken auf einen dieser Buttons wird das entsprechende Steinmodell in einem separaten

Browser-Tab angezeigt (siehe Abb. 12). Dafür wird die HTML-Datei *model-viewer.html* ausgeführt. In dieser Datei wird der Aufbau des neuen Browser-Tabs festgelegt. Damit die Modelle in dem neuen Browser-Tab angezeigt werden können, wird in der *model-viewer.html* die Google-Webkomponente *model-viewer* von einem CDN (Content Delivery Network) geladen. Mit dieser Webkomponente kann die Ansicht der Modelle in vielerlei Hinsicht gestaltet werden. Beispielsweise kann eine automatische Rotation des Modells im Browser-Tab aktiviert oder die Bewegungssteuerung mit dem Mauszeiger ermöglicht werden. Zu beachten ist, dass die Modelle wie bei CesiumJS mit WebGL geladen werden und deshalb nur Modelle im GLB-Format verarbeitet werden können (Google Inc., 2025).

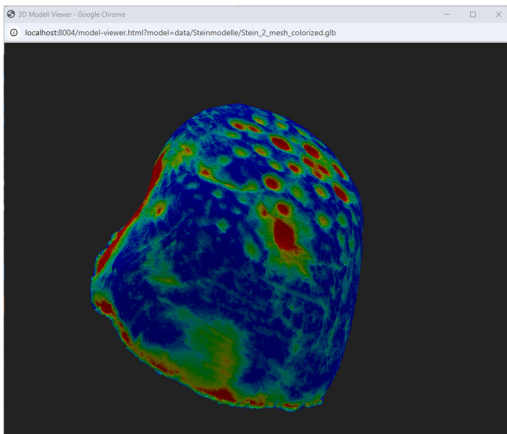


Abbildung 12 Model-Viewer für die Visualisierung der Schalensteine mit CesiumJS

Neben den drei eben erklärten Buttons gibt es jeweils einen Radiobutton. Damit kann ausgewählt werden, welche der Modellvarianten (texturiert, texturlos oder eingefärbt) in der Cesium-Anwendung eingeblendet werden soll. Es kann immer nur eine Modellvariante angezeigt werden. Oberhalb der ausklappbaren Elemente der Seitenleiste mit den Steininformationen und Buttons werden zwei weitere Buttons mit den Beschriftungen „Kameraflug starten“ und „Kameraflug stoppen“ angezeigt. Mit diesen kann, wie die Beschriftung bereits vermuten lässt, ein Kameraflug von Stein zu Stein gestartet und gestoppt werden.

Die Quellcode-Dateien und die lokal abgelegten Daten, die in der CesiumJS-Anwendung verwendet werden, wurden in einem intuitiv angelegten Projektverzeichnis abgespeichert (siehe Abb. 13). Die Quellcode-Dateien sind nach der verwendeten Sprache (HTML, CSS, JavaScript) sortiert. Alle verwendeten Geodaten, Fotos etc. wurden außerdem in einen Ordner gespeichert. Um CesiumJS lokal einzubinden, wurde die Bibliothek von der Cesium-Webseite

heruntergeladen und in das Projektverzeichnis integriert. Eine mögliche Alternative ist das Einbinden aus einem CDN (Content Delivery Network). Dafür ist eine Internetverbindung notwendig.

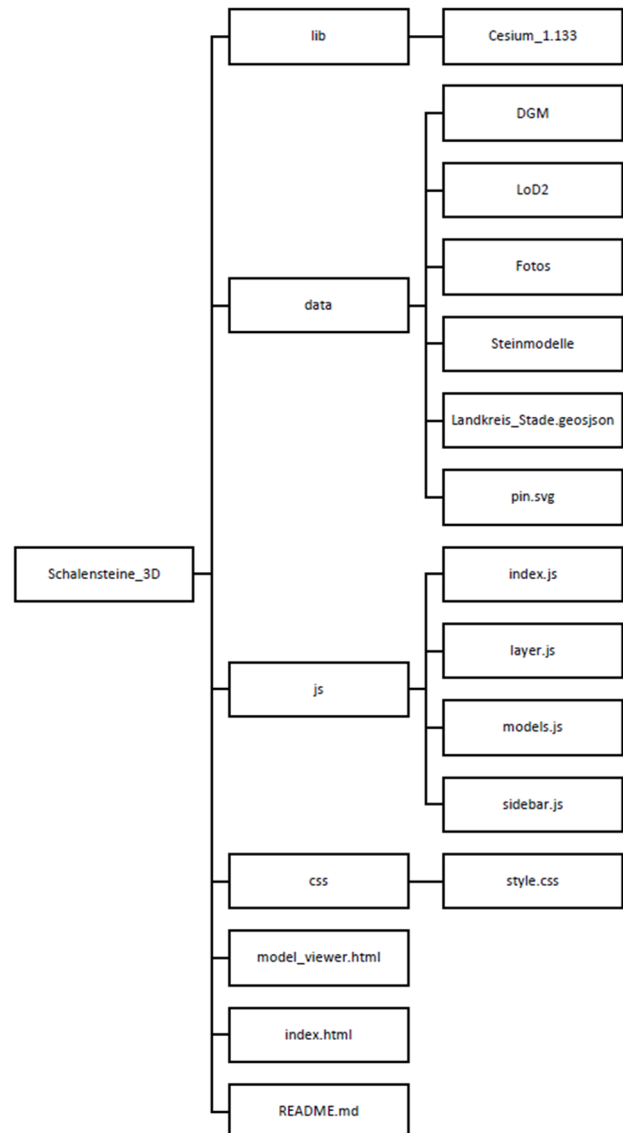


Abbildung 13 Projektverzeichnis für die CesiumJS-Anwendung

5.2 Cesium Stories

Eine Alternative zur aufwendigen Programmierung mit CesiumJS sind die Cesium Stories. Diese können über Cesium Ion erstellt werden. Dafür ist ebenfalls ein Cesium-Ion-Account notwendig. Bei Cesium Stories handelt es sich um eine Art Präsentation, bei der nacheinander Folien gezeigt werden. Es gibt zwei Arten von Folien. Die Kartenfolie besteht hauptsächlich aus einer Kartenansicht (siehe Abb. 14). Zu dieser Kartenansicht kann für jede Folie eine

Seitenleiste erstellt werden, die einen Titel sowie eine Infobox mit Text, Bildern und Links enthalten kann. Die Kartenansicht kann für jede Folie geändert und gespeichert werden. Dabei ist die gespeicherte Ansicht nur die Startansicht. Während der Präsentation kann die Ansicht vom Nutzer geändert werden. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, Punkte, Linien oder Polygone auf die Folien zu zeichnen. Eine weitere Folienart sind Fullscreen-Folien. Damit sind Folien gemeint, die über die gesamte Fläche ein Bild anzeigen. Auch auf diesen Folien können ein Titel und eine Infobox hinzugefügt werden. Die Folien können als Diashow oder manuell gewechselt werden. Um die Präsentation anderen Nutzern zur Verfügung zu stellen, kann ein Link generiert werden, über den auf die Präsentation zugegriffen werden kann. Über diesen Link kann der Nutzer nichts an der Story ändern. Somit wird gewährleistet, dass nur der Ersteller selbst die Präsentation bearbeiten kann. Praktisch ist dabei, dass die Story automatisch aktualisiert wird. Sobald der Ersteller etwas ändert, wird nach einem erneuten Laden der Webseite über denselben Link die aktuelle Version der Story erreicht. Soll die Story nicht mehr von anderen Personen aufgerufen werden können, kann der Link jederzeit deaktiviert werden. Zum Erstellen der Cesium Stories werden keine Programmierkenntnisse benötigt, da dies ausschließlich über die Benutzeroberfläche von Cesium Ion erfolgt. Die Geodaten (3D-Modelle, Karten, ggf. Flugrouten bei Verwendung dynamischer Daten) müssen dafür bereits in der Cesium Ion Cloud vorliegen.

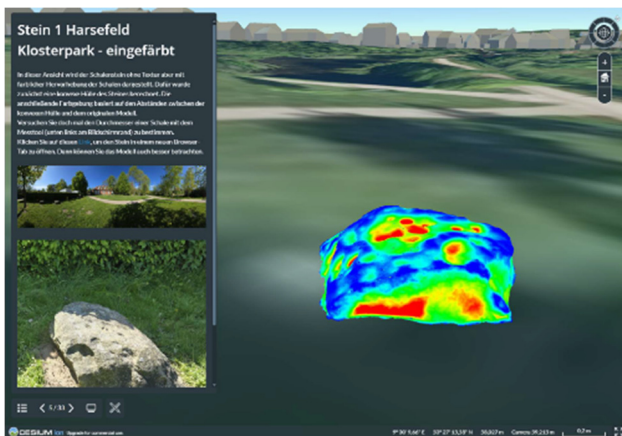


Abbildung 14 Eine Ansicht/Folie der Schalensteine-Story mit Cesium Stories

Für die Schalensteine wurde in diesem Projekt eine Cesium-Story mit Karten- und Vollbildfolien erstellt. Im Textfeld wurden neben einem Text auch Bilder und Links hinzugefügt. Die Erstellung der Story konnte sehr zügig und einfach umgesetzt werden.

5.3 Vergleich CesiumJS mit Cesium Stories

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Vorgehen zur Erstellung einer Webapplikation mit CesiumJS bzw. Cesium Stories erläutert. Je nach Einsatzgebiet haben beide Methoden ihre Vor- und Nachteile.

Beim Erstellen der beiden Webapplikationen konnte festgestellt werden, dass die Gestaltung der Benutzeroberfläche mit CesiumJS deutlich freier ist als mit Cesium Stories. Für einfache Präsentationen sind die Gestaltungsmöglichkeiten von Cesium Stories jedoch völlig ausreichend. Zudem werden für die Umsetzung keinerlei Programmierkenntnisse benötigt. Das kann ein großer Vorteil sein, da es die Bearbeitung erleichtert.

Ein weiterer gravierender Unterschied zwischen den beiden Methoden ist, dass in Cesium Stories nur Daten geladen werden können, die in der Cesium Ion Cloud gehostet werden. Bei größeren Datenmengen muss gegebenenfalls ein kostenpflichtiges Upgrade erworben werden, um mehr Speicherplatz zu erhalten. Dieses Problem kann zwar auch bei der Einbindung von Daten aus Cesium Ion in die CesiumJS-Anwendung auftreten, aber mit CesiumJS können alternativ auch auf einem eigenen Server gehostete Daten geladen werden. Darüber hinaus kann die Webanwendung so aufgebaut werden, dass sie offline nutzbar ist, während für Cesium Stories eine Internetverbindung erforderlich ist. Zudem ist der zeitliche Aufwand für die Erstellung der Webanwendungen sehr unterschiedlich. Beim Erstellen einer CesiumJS-Anwendung ist der initiale Aufwand im Vergleich zu Cesium Stories sehr hoch, da der Quellcode für die Anwendung selbst geschrieben werden muss. Da dies bei Cesium Stories nicht der Fall ist, beschränkt sich der Aufwand dort auf das Hochladen der Geodaten und Fotos, die verwendet werden sollen, sowie auf die Gestaltung der Folien, die jedoch nur mit den vorgegebenen Möglichkeiten erfolgen kann.

Für beide Methoden wird ein Cesium-Ion-Account benötigt. Dieser ist grundsätzlich kostenfrei, in der kostenfreien Version jedoch nicht unbegrenzt nutzbar. So ist beispielsweise der Speicherplatz der dazugehörigen Cloud begrenzt. Dieser kann durch den Kauf einer kostenpflichtigen Version erweitert werden. Es gibt jedoch noch weitere Einschränkungen, die auf der Cesium-Webseite nachgelesen werden können. Die kommerzielle Nutzung ist in jedem Fall kostenpflichtig.

Welche Methode für eine bestimmte Anwendung am sinnvollsten ist, muss für das jeweilige Projekt und den vorgesehenen Anwendern entschieden werden.

6 Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag werden zwei erfolgreich entwickelte Webapplikationen zur Visualisierung von Schalensteinen im Landkreis Stade (Niedersachsen) präsentiert: CesiumJS und Cesium Stories. Grundlage für die Visualisierung war die photogrammetrische Erfassung und 3D-Modellierung der Schalensteine mit Agisoft Metashape. Die Ergebnisse lagen als Dreiecksvermaschung mit und ohne Textur sowie als farbliche Abstandsdarstellung der Steine zur konvexen Hülle vor.

Die photogrammetrische Erfassung der zehn Schalensteine wurde innerhalb eines Außendiensttages mit drei digitalen Spiegelreflexkameras durchgeführt. Da keine hohen Genauigkeitsanforderungen an die 3D-Modelle gestellt wurden, wurden die Steine für scharfe Bilder mit Autofokus aufgenommen. Die Bearbeitung der Bildverbände konnte in Agisoft Metashape von der Bildpunktmessung bis zur Erstellung der 3D-Modelle mit einem hohen Automatisierungsgrad und einem zeitlichen Aufwand von ca. 26 Stunden durchgeführt werden. Die farbliche Hervorhebung der Schalen in den 3D-Modellen durch konvexe Hüllen stellt dabei eine innovative Lösung dar.

Bei der Entwicklung der Webanwendung hat sich gezeigt, dass sich Geodaten in Form von Schalensteinen, LoD2-Gebäuden, Geländedaten, digitalen Orthofotos und Verwaltungsgrenzen mit der JavaScript-Bibliothek CesiumJS interaktiv darstellen lassen. Dabei muss bei der Einbindung von lokal gespeicherten Daten das erforderliche Dateiformat berücksichtigt werden. Wenn stattdessen die Cesium Ion Cloud verwendet wird, um Geodaten in die Cesium-Anwendung einzubinden, kann eine Konvertierung in ein Cesium-kompatibles Format beim Hochladen in die Cloud erfolgen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Kombination aus SfM-Photogrammetrie und Webvisualisierung mit Cesium großes Potenzial bietet, historische Objekte sowohl wissenschaftlich zu dokumentieren als auch der Öffentlichkeit sichtbar und erlebbar zu machen. Der erarbeitete Workflow für die digitale Erfassung und Präsentation archäologischer Kleinobjekte kann als Grundlage für weiterführende Projekte in den Bereichen Archäologie und Denkmalpflege dienen.

Literaturverzeichnis

- Bratke, M. (2025). Erfassung von Schalensteinen im Landkreis Stade durch SfM-Photogrammetrie und ihre Visualisierung in Cesium. Unveröffentlichte Bachelorarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik, HafenCity Universität Hamburg, 197 S.
- Cesium GS Inc. (2025a). Cesium ion Access Tokens. <https://cesium.com/learn/ion/cesium-ion-access-tokens/>, letzter Zugriff 16. Januar 2026.
- Cesium GS Inc. (2025b). Cesium ion REST API. <https://cesium.com/learn/ion/rest-api/>, letzter Zugriff 16. Januar 2026.
- Cesium GS Inc. (2025c). Tiler Data Types and Formats. <https://cesium.com/learn/3d-tiling/tiler-data-formats/>, letzter Zugriff 16. Januar 2026.
- Google Inc. (2025). <model-viewer> — Easily display interactive 3D models on the web & in AR. <https://modelviewer.dev/>, letzter Zugriff 18. Januar 2026.
- Hesse, S. (2003). Zu den sogenannten Schalen- und Schälchensteinen im Landkreis Rotenburg (Wümme). *Archäologische Berichte des Landkreises Rotenburg (Wümme)*, 10, 93–116.
- Kersten, T., & Lindstaedt, M. (2012). Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, Heft 6, 727–740.
- Kersten, T., & Lindstaedt, M. (2017). Mit Kamera, Maßstab und Laptop - Best Practice zur Erstellung von 3D-Modellen für eine Museumsausstellung am Beispiel vietnamesischer Kulturobjekte. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 26, Tagungsband der 37. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, 8.-10. März 2017 in Würzburg (auf CD), 35–44.
- Luhmann, T. (2023). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen–Methoden–Beispiele*. 5. neu bearbeitete Auflage. Wichmann Fachmedien, VDE-Verlag, Berlin-Offenbach.
- Neururer, F. (2016). Jahreszeitenberechnung mit Schalensteinen. <https://www.schalensteine.at/FACHARTIKEL.pdf>, letzter Zugriff 09. Januar 2026.
- Nösler, D. (2024). Schalenstein gesichert. *Archäologie in Deutschland*, 06/2024, S. 57.
- Schiewe, J. (2022). *Kartographie: Visualisierung georäumlicher Daten*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schwegler, U. (2020). Verbreitung der Schalensteine in Europa. <http://www.ssdi.ch/Uebersicht/Verbreitung.pdf>, letzter Zugriff 09. Januar 2026.
- Ziermann, D., & Alsdorf, D. (2002). Geländeuntersuchungen an Schalensteinen in Mulsum, Ldkr. Stade. *Die Kunde*, N.F. 53, 243–257.