Apophis nach 2029

Erdbegegnungen und Einschlagsrisiko bis Ende 2050

Retzlaff, Proto · Untersuchung vom 28. November 2026

Ergebnis

Ein Einschlag von Apophis ist für den Zeitraum 2030 bis einschließlich 2050 nach dem aktuellen Stand der Bahnbestimmung ausgeschlossen. Die offiziellen Risikosysteme führen den Asteroiden nicht als Einschlagskandidaten. Die engste neue Erdannäherung in diesem Zeitraum liegt im August 2044 bei rund 12 Millionen Kilometern, etwa 31 mittleren Mondentfernungen. [1–4]

Die NASA-Auswertung von 2021 schloss einen Einschlag für mindestens die folgenden 100 Jahre aus. Diese Aussage deckt 2050 ab; ihr Ausgangsjahr bleibt 2021. Beim erneuten Abruf am 28.11.2026 meldet Sentry Apophis als entfernt, die SBDB enthält keine virtuellen Impaktoren und auch die aktuelle ESA-Risikoliste enthält keinen Eintrag für ihn. [1–4]

Die katalogisierten Begegnungen im Hauptzeitraum

Datum TDB	Nominal Mio. km	Formaler 3σ-Bereich Mio. km	Mond-entfernungen	Relativtempo km/s
27.03.2036	46,336	46,212 – 46,461	120,5	15,01
31.12.2036	49,369	49,362 – 49,377	128,4	6,84
24.09.2037	33,382	33,234 – 33,529	86,8	12,37
06.02.2044	41,842	41,761 – 41,923	108,9	5,78
24.08.2044	12,012	11,814 – 12,211	31,2	3,96

Tabelle 1. NASA/JPL CAD, Lösung 220; Abgleich mit SBDB. Alle Abstände gelten vom Erdmittelpunkt zum Asteroidenzentrum. 1 mittlere Mondentfernung = 384.400 km. Der 3σ-Bereich ist eine formale Unsicherheitsangabe, keine absolute physikalische Grenze. [2]

Die eigene Mehrkörperintegration bestätigt die Geometrie: Für August 2044 ergibt sie 12,006 Millionen Kilometer. Die lokale lineare Fortrechnung der vollständigen korrelierten Bahnunbestimmtheit liefert eine Standardabweichung des Mindestabstands von etwa 66.170 km. Diese eigene Rechnung prüft Bahn und Unsicherheit; sie ersetzt keine spezielle Suche nach extrem seltenen Impaktbahnen. [12]

Untersuchungsgrenze: Der Hauptzeitraum reicht vom 01.01.2030 bis 31.12.2050. Zusätzlich werden die neue Annäherung im November 2029 und die Begegnung im April 2051 als zeitlicher Kontext genannt. Die auslaufende April-2029-Passage ist keine zusätzliche Begegnung.

1 Abstände und Bedeutung einer kritischen Begegnung

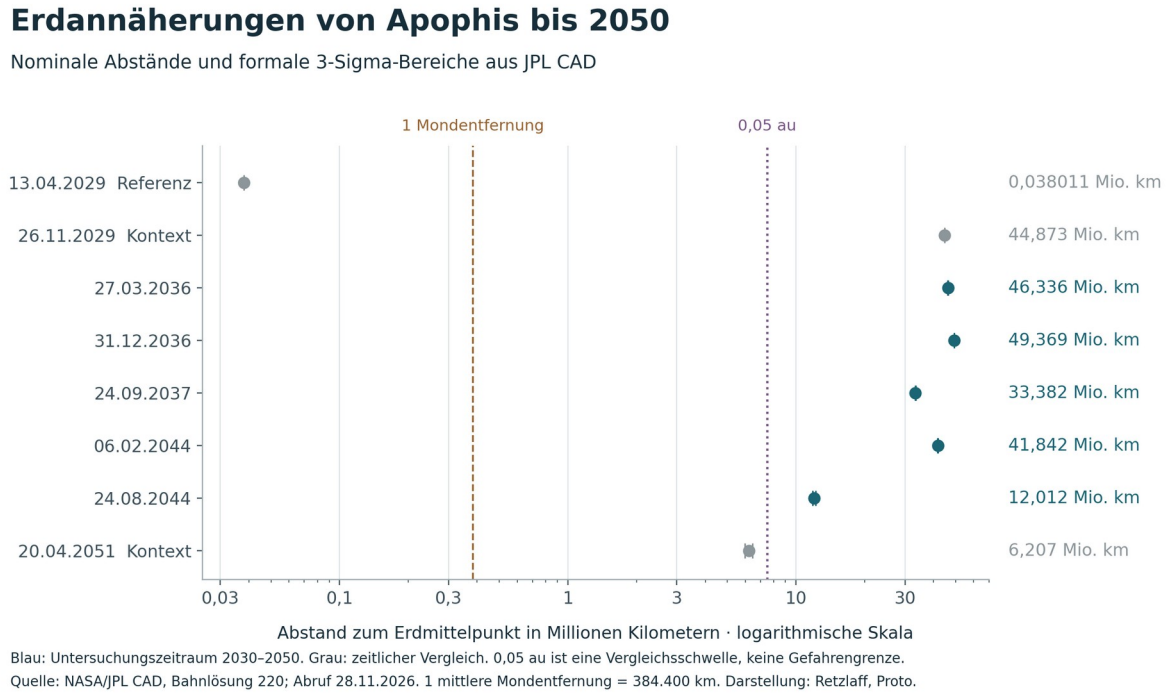

Abbildung 1. Nominale Erdannäherungen und formale 3σ-Bereiche. Die logarithmische Skala macht den außergewöhnlich geringen Abstand von April 2029 und die großen Abstände der späteren Begegnungen gemeinsam sichtbar. Die kurzen Unsicherheitsbalken sind bei mehreren Einträgen kleiner als das Punktsymbol. [2]

Der JPL-Nennwert für August 2044 beträgt 12.012.181 km. Die untere 3σ-Grenze liegt bei 11.813.797 km, entsprechend 30,73 mittleren Mondentfernungen. Die obere Grenze beträgt 12.210.703 km. Selbst die untere Grenze übertrifft den Erdradius um mehr als den Faktor 1.850. Eine solche Begegnung ist innerhalb des heutigen Modells für die Erde unkritisch. [2]

Der Ausdruck „kritisch“ benötigt eine definierte Bedeutung. Ein Einschlag erfordert eine Überschneidung der realen Körper beziehungsweise einen Atmosphäreneintritt. Eine Passage innerhalb einer mittleren Mondentfernung wäre eine besonders nahe Begegnung. Die häufig verwendeten 0,05 au entsprechen dagegen 7,480 Millionen Kilometern und sind hier nur eine Vergleichsschwelle. Auch diese wird bis Ende 2050 von keiner der gefundenen neuen Begegnungen erreicht. Eine feste Abstandsgrenze allein ist kein Risikomaß.

Die MOID ist der minimale Abstand zweier geometrischer Bahnen. Sie sagt nicht, ob Erde und Asteroid den betreffenden Ort gleichzeitig erreichen. Auch die Einstufung als potenziell gefährlicher Asteroid bedeutet daher keine aktuell positive Einschlagswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Zeitraum. Entscheidend sind die zeitlich fortgerechnete Bahn und ihre Unsicherheit. [3]

Zeitlicher Kontext

Nach dem April-Vorbeiflug folgt am 26.11.2029 ein neues Minimum bei 44,873 Millionen Kilometern. Jenseits des angefragten Zeitraums liegt am 20.04.2051 nach JPL eine nähere Passage bei 6,207 Millionen Kilometern, rund 16,15 Mondentfernungen. Auch dieser Kontextwert beschreibt keinen Einschlag. Er gehört ausdrücklich nicht zur Bewertungstabelle für 2030–2050. [2]

2 Eigene Fortrechnung über den gesamten Zeitraum

Die Bahn wurde eigenständig numerisch integriert. Ausgangspunkt bleibt jedoch die von JPL aus Beobachtungen bestimmte Lösung 220. Es handelt sich um eine unabhängige Fortrechnung mit gemeinsamen Anfangsdaten, nicht um eine zweite unabhängige Anpassung an neue Messungen. [12]

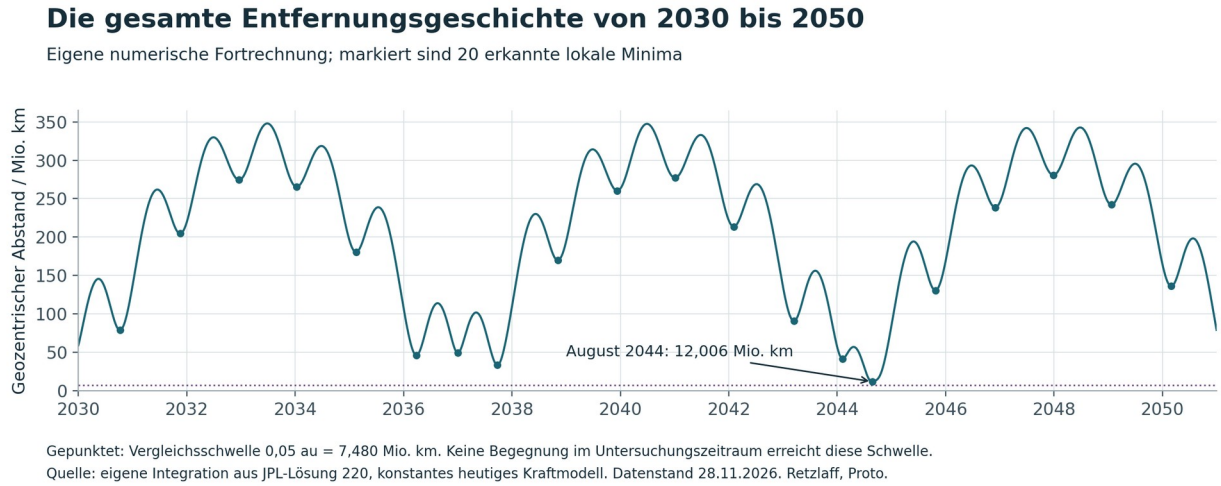

Abbildung 2. Geozentrischer Abstand aus dem vollständigen numerischen Lauf. Die Linie verbindet die integrierten täglichen Zustände; sie ist keine Verbindung der wenigen katalogisierten Vorbeiflüge. Markiert sind alle 20 im Hauptzeitraum erkannten lokalen Minima. [12]

Suche nach Begegnungen

Ein Tagesraster erfasst den Verlauf bis zum 01.01.2051. Lokale Minima wurden an Vorzeichenwechseln von r·v von negativ nach positiv erkannt und anschließend durch erneute direkte Integration und eine Brent-Nullstellensuche verfeinert. Dabei sind r und v die relative Position und Geschwindigkeit gegenüber der Erde. Am Minimum gilt:

$$g(t) = r(t) \cdot v(t) = 0$$

Die Suche findet 21 neue lokale Minima nach der April-2029-Begegnung, davon 20 zwischen 2030 und 2050. Fünf dieser 20 erscheinen in der hier abgefragten JPL-Nahbegegnungstabelle. Die übrigen sind weit entfernte relative Annäherungen und keine zusätzlichen Gefahrenereignisse. Der Suchansatz ist durch den zeitlichen Verlauf und den Vergleich mit den offiziellen Begegnungen geprüft; er ist kein abstrakter mathematischer Vollständigkeitsbeweis für beliebige Zwischenoszillationen.

Die CAD-Abfrage wurde mit einer Entfernungsgrenze von 10 au ausgeführt, damit der übliche Abfragefilter von 0,05 au die späteren Ereignisse nicht ausblendet. Dennoch ist der CAD-Katalog keine Liste sämtlicher ferner lokaler Minima. Das erklärt, weshalb eine eigene kontinuierliche Fortrechnung mehr Minima liefert als die Katalogabfrage. [2, 12]

Der noch kleine Abstand am 14.04.2029 gehört zur auslaufenden berühmten Begegnung vom Vortag. Er wird bei der Suche nach einer neuen Begegnung nicht als weiteres Ereignis gewertet. Das engste neue Minimum bleibt August 2044.

3 Datenbasis und überprüfte Genauigkeit

Ausgangsdaten und Kraftmodell

Bestandteil	Verwendeter Stand
JPL-Bahnlösung	220, berechnet am 25.06.2024; frisch abgerufen am 28.11.2026
Beobachtungen	15.03.2004–09.04.2022; 7.370 verwendete Beobachtungen
Start und Kovarianz	01.01.2021 TDB, JD 2459215,5; acht korrelierte Fitparameter
Numerik	ASSIST 1.2.3 und REBOUND 4.6.0; IAS15 mit adaptiver Schrittweite
Ephemeriden	Vollständiges DE440 sowie SB441-N16; Horizons-Referenz DE441
Kräfte	Sonne, acht Planeten, Mond, Plutosystem, 16 Asteroiden; EIH-Relativität; Erd-J_2, Sonnen-J_2; A_1 und A_2

Tabelle 2. Daten und tatsächlich ausgeführtes Modell. Der Abruf im November 2026 ist keine neue Beobachtung von 2026. Die Bahnelemente der Standardausgabe und die Kovarianz haben unterschiedliche Epochen; verwendet wurde die zur Kovarianzepoche passende Anfangslage. Alle 27 Gravitationsparameter wurden geprüft. Die kurzen Ephemeridenausschnitte der früheren 2029-Rechnung wurden nicht extrapoliert. [2, 12]

2044 aus verschiedenen Datenprodukten

Quelle	Datum und Uhrzeit	Mindestabstand Mio. km
JPL CAD	24.08.2044, 07:17 TDB	12,01218
Horizons, eigene Minimumsuche	24.08.2044, 08:00 TDB	12,00518
Eigene Mehrkörperintegration	24.08.2044, 07:53 TDB	12,00625
ESA Aegis	23.08.2044, 14:15 UTC	12,17505

Tabelle 3. Zusätzliche Stellen dienen dem Verfahrenvergleich, nicht der Behauptung entsprechender physikalischer Vorhersagegenauigkeit. UTC und TDB sind ausdrücklich getrennt. Eine UTC-Umrechnung für 2044 setzt den heutigen Schaltsekundenstand voraus. [2, 4, 5, 12]

Die eigene Minimumentfernung liegt rund 1.068 km über der separat ausgewerteten Horizons-Minimumentfernung; das Ereignis liegt etwa 6 Minuten 35 Sekunden früher. Bei den 35 geprüften Referenzzuständen beträgt der größte dreidimensionale Positionsunterschied rund 1.540 km. Das sind beobachtete Vergleichsdifferenzen, keine allgemeine Fehlerobergrenze. Ein alternativer Start aus dem aktuellen Horizons-Zustand von 2026 verschiebt das eigene 2044-Minimum gegenüber dem Hauptlauf um rund −5.541 km.

Variierte Integratortoleranzen und Ausgabeschritte ändern den Mindestabstand um höchstens 4,963 km gegenüber dem Hauptlauf; die gesamte Spanne der geprüften Varianten beträgt 7,304 km. Kleinere Toleranzen verbessern das Ergebnis nach der starken 2029-Ablenkung nicht monoton. Diese numerischen Effekte sind von der rund 66.000 km großen formalen Standardabweichung und von Modellunterschieden zu trennen. [12]

ESA und JPL unterscheiden sich beim nominalen 2044-Abstand um rund 163.000 km und beim Zeitpunkt um etwa 17 Stunden. Ihre formalen Bereiche überlappen. ESA nennt 1σ-Werte, JPL in der Begegnungstabelle 3σ-Grenzen. Aus der ESA-Streuung ergibt sich für den Vergleich $\pm 3\sigma \approx \pm 242.441$ km. Die gemeinsame Beobachtungsbasis erlaubt keine Behandlung beider Lösungen als statistisch unabhängige Stichproben. Die Stundenabweichung wird nicht durch die etwa 69 Sekunden zwischen TDB und UTC erklärt. Die verbleibenden Ursachen wurden hier nicht vollständig aufgeschlüsselt. [2, 4]

4 Welche Wahrscheinlichkeitsaussage ist belastbar

Eine nominale Bahn liefert einen Mindestabstand, noch keine Einschlagswahrscheinlichkeit. Dafür muss die zulässige Verteilung der Anfangsbedingungen und Modellparameter untersucht werden. Formal lässt sich das gesuchte Ereignis so ausdrücken:

$$P_{Impakt} = \int 1\left[d_{min}(\theta) \le R_K\right] \; p(\theta \mid D) \; d\theta$$

Hier bezeichnet θ den Parametervektor, D die Beobachtungsdaten, d_{min} den kleinsten Abstand während des untersuchten Zeitraums und R_k den Kollisionsradius. Die Indikatorfunktion ist eins, wenn eine fortgerechnete Bahn kollidiert, sonst null. Eine Impaktsuche muss auch kleine, nichtlineare Teilbereiche der Unsicherheitsverteilung erfassen. Sentry-II verwendet dafür gezielte Verfahren; eine geringe Zahl zufällig gezogener Bahnen reicht zum Ausschluss sehr kleiner Wahrscheinlichkeiten nicht aus. [10]

Eigene lokale Fortpflanzung der Unsicherheit

Verwendet wurde die vollständige 8D-Kovarianz der sechs Bahnelemente sowie A_1 und A_2, einschließlich ihrer Kreuzkorrelationen. Zentrale Differenzen entlang der Cholesky-Richtungen ergeben den lokalen Zusammenhang zwischen Parameterabweichungen und Begegnungsabstand. Die Differentialschritte wurden halbiert; die berechnete Abstandsstreuung verändert sich dabei nur um etwa $4 \cdot 10^{-6}$ relativ. Das prüft die numerischen Ableitungen, nicht die Normalverteilung in beliebig fernen Verteilungsschwänzen. [12]

Größe für August 2044	Eigene lineare Fortrechnung
Standardabweichung des Mindestabstands σd	66.170 km
Dreifache Standardabweichung 3σd	198.511 km
Standardabweichung des Minimumzeitpunkts σt	6,79 Stunden
Dreifache Standardabweichung 3σt	20,36 Stunden

Tabelle 4. Lokale lineare Unsicherheit bei unverändert fortgesetztem heutigen Kraftmodell. [12]

Die Unsicherheit des Ereigniszeitpunkts wurde aus der Bedingung r·v = 0 bestimmt. Die Änderung des Mindestabstands lautet in erster Ordnung δd = r̂·δr. Ein zusätzlicher linearer Zeitverschiebungsterm verschwindet am Nominalminimum, weil r̂·v = 0. Die separat gespeicherte 6×6-Zustandskovarianz gehört dagegen zu einem festen Zeitpunkt. [12]

Was daraus folgt und was nicht

Der formale Unsicherheitsbereich liegt Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Zusammen mit der speziellen Risikoanalyse der zuständigen Überwachungssysteme begründet das den Ausschluss eines Einschlags bis 2050 innerhalb der heutigen Bahnbestimmung. Für Apophis ist derzeit keine positive Einschlagswahrscheinlichkeit für diesen Zeitraum veröffentlicht. Eine erfundene Angabe wie „1 zu einer Billion“ würde die Datenlage nicht verbessern. [1–4]

Ein 3σ-Intervall ist keine harte Grenze. Die bei einer idealen eindimensionalen Normalverteilung außerhalb von ±3σ liegenden rund 0,27 Prozent sind insbesondere keine Einschlagswahrscheinlichkeit: Die meisten außerhalb liegenden Bahnen würden ebenfalls weit an der Erde vorbeiführen. Eine Extrapolation der lokalen Gauß-Näherung bis zur Erde würde eine scheinpräzise, wissenschaftlich nicht begründete Extremzahl erzeugen.

Die eigene Untersuchung berechnet deshalb keine neue Impaktwahrscheinlichkeit. Sie liefert eine geometrische und numerische Gegenprüfung sowie eine formale lokale Unsicherheit. Unbekannte zukünftige Änderungen des physikalischen Modells sind damit nicht automatisch statistisch erfasst. Diese Abgrenzung relativiert die belastbare Risikobewertung bis 2050 nicht; sie bestimmt deren Geltungsbereich.

5 Historische Schlüssellöcher und der thermische Rückstoß

Warum 2036 früher diskutiert wurde

Eine nahe Erdpassage kann die Umlaufzeit des Asteroiden stark verändern. Ein eng begrenzter Bereich der 2029-Begegnungsgeometrie könnte zu einer späteren Resonanzrückkehr führen, bei der Apophis die Erde trifft. Ein solcher Bereich heißt gravitativer Schlüsselbereich oder „Schlüsselloch“. Die historische 2036-Konfiguration entsprach einer 7:6-Resonanz: sieben Erdumläufe während sechs Apophis-Umläufen. Eine 2013 untersuchte Schlüssellochbreite lag bei etwa 616 Metern. Diese Zahl gehört zu jener historischen Lösung. [6]

Frühere Arbeiten behandelten außerdem mögliche Rückkehrbahnen für 2041, 2042 und 2044. Diese historischen Kandidaten sind keine heutigen Risikoeinträge. Die gegenwärtige Bahn führt 2036 bei den katalogisierten Minima in rund 46 beziehungsweise 49 Millionen Kilometern Abstand vorbei. Die alte Einschlagsgefahr für 2036 ist durch die verbesserten Bahndaten ausgeschlossen. Die häufig zitierte historische Wahrscheinlichkeit von 2,7 Prozent betraf die damalige Sorge um 2029, nicht eine heutige Gefahr für 2036. [1, 2, 6, 7]

Was nach 2029 physikalisch anders sein kann

Die Erdgezeiten können den Rotationszustand verändern. Dadurch kann sich der Yarkovsky-Effekt ändern: Die zeitlich und räumlich ungleichmäßige thermische Abstrahlung erzeugt eine kleine Beschleunigung. Im gegenwärtigen Fit wird die tangentiale Komponente durch $A_2 \approx -2{,}90177 \cdot 10^{-14}$ au/Tag² beschrieben. Ein unverändert fortgesetztes A_2 ist eine Modellannahme. Seine heutige Fitunsicherheit ist keine vollständige Verteilung möglicher Änderungen nach 2029. [2, 7, 8]

Die Rotationsstudie von Ďurech und Mitarbeitern aus 2026 untersucht mehrere noch zulässige Rotationsmodelle. Eine gravitationsbedingte Änderung der Achsneigung und thermische Skalierung können den langfristigen Drift beeinflussen. Ihre Ergebnisse sind Modellprognosen; insbesondere darf eine relative Änderung von da/dt nicht ohne Umrechnung als dieselbe relative Änderung von A_2 eingesetzt werden. [8]

Bewusst gesetzte Empfindlichkeitstests

Annahme ab 15.04.2029	Änderung des 2044-Abstands	Änderung des Minimumzeitpunkts
A_2 unverändert	Referenz	Referenz
A_2 auf null gesetzt	−139 km	+51 Sekunden
Vorzeichen von A_2 umgekehrt	−278 km	+102 Sekunden

Tabelle 5. Alle Fälle starten von exakt demselben Zustand am 15.04.2029, 00:00 TDB. Verglichen wird mit dem passenden unveränderten Neustart; ein numerischer Neustarteffekt wurde damit aus den Differenzen entfernt. Dies sind Sensitivitätstests ohne zugewiesene Eintrittswahrscheinlichkeit. [12]

In diesen zwei Testfällen beträgt die Abstandsänderung bis 2044 nur einige hundert Kilometer. Das ist gegenüber dem Abstand von etwa 12 Millionen Kilometern klein. Daraus folgt jedoch keine universelle Obergrenze für jede denkbare zukünftige Störung. Die Tests sagen weder ein Abschalten noch eine Umkehr des Yarkovsky-Effekts voraus.

6 Seltene Störungen und der richtige Umgang mit neuen Daten

Kleine Einschläge auf Apophis

Wiegert untersuchte 2024, ob eine unerkannte Kollision mit einem kleinen Objekt die Apophis-Bahn noch vor April 2029 wesentlich verändern könnte. Für einen Einschlag auf Apophis mit einem zur erheblichen Verschiebung gegenüber den Schlüssellöchern ausreichenden Impuls nennt die Arbeit eine Wahrscheinlichkeit unter 10^{-6}. Das ist weder die Wahrscheinlichkeit einer geeigneten Impulsrichtung oder eines bestimmten Schlüssellochtreffers noch die eines Erdeinschlags bis 2050. Die untersuchte Zeitspanne reicht von Mai 2021 bis April 2029. Für einen durch eine solche Kollision verursachten direkten Erdeinschlag 2029 ergibt die Studie eine Größenordnung unter 10^{-9}. [9]

Diese Wahrscheinlichkeiten dürfen nicht auf den Zeitraum 2030–2050 umetikettiert oder zu einer vermeintlichen Gesamtgefahr addiert werden. Dafür wären eine gemeinsame Ereignisdefinition, ein physikalisches Stoßmodell, die Verteilung der Stoßzeitpunkte und Richtungen sowie eine anschließende Bahn- und Impaktanalyse erforderlich. Die publizierten Zahlen liefern keine solche Gesamtwahrscheinlichkeit.

Oberflächenänderungen und Masseverlust

Studien zu den Erdgezeiten behandeln mögliche seismische Anregung, Regolithbewegung und Oberflächenänderungen. Eine interne Umverteilung von Material erzeugt jedoch für sich keinen beliebigen Rückstoß des Gesamtschwerpunkts. Ein solcher Rückstoß erfordert unter anderem entweichende Masse und deren gerichteten Impuls. Aus einer modellierten Oberflächenbewegung lässt sich daher ohne zusätzliche Angaben keine neue Einschlagswahrscheinlichkeit der Erde ableiten. Eine quantitative Risikoverteilung für 2030–2050 folgt aus diesen Arbeiten nicht. [13]

Sehr lange Zeiträume sind eine andere Fragestellung

Die 2026 veröffentlichte Untersuchung von Fuentes-Muñoz und Mitarbeitern betrachtet langfristige Begegnungen und Bahnnähen über Jahrhunderte bis Jahrtausende. Statistiken über solche Zeiträume sind keine Wahrscheinlichkeiten für einzelne Begegnungen bis 2050. Sie ändern den hier geprüften Befund nicht. [11]

Wie die Bewertung aktualisiert werden sollte

Vor einer neuen Auswertung müssen Bahnlösung, Kovarianz und Referenzephemeriden konsistent erneut abgerufen werden. Zu dokumentieren sind Lösungsversion, Lösungsdatum, letzter Beobachtungstag, Epochen, Zeitskala und physikalisches Modell. Anschließend werden Nominalbahn, Begegnungen, Unsicherheit und Referenzvergleich gemeinsam wiederholt. Ein neuer Abruf allein ist noch keine neue Bahnbestimmung.

Nach den Messungen der 2029-Begegnung lassen sich auch geänderte Rotation und thermischer Rückstoß wesentlich besser bestimmen. Die aktuelle Berechnung ist deshalb ein überprüfbarer Stand vom 28.11.2026. Für die heutige Frage bleibt die Aussage eindeutig: Bis Ende 2050 wird keine kritische Erdbegegnung im Sinne einer plausiblen Einschlagsbahn erwartet.

Datenpaket und Wiederholung

Das beigefügte ZIP enthält Rohantworten, Abrufmetadaten, Ergebnisdateien, Code, Abbildungen und eine Anleitung. Die zwei großen Ephemeridenkerne sind nicht eingebettet; das beigefügte Downloadskript lädt die festgelegten Originaldateien und prüft ihre SHA256-Werte. Die archivierte Rechnung ist reproduzierbar, aber keine automatische laufende Risikoüberwachung. Details zur Aktualisierung stehen im README. [12]

Anhang A Alle erkannten lokalen Minima von 2030 bis 2050

Diese Tabelle zeigt die eigene Nominalrechnung. Zusätzliche ferne Minima sind keine weiteren JPL-Risikoeinträge. Die Rundung auf 0,001 Millionen Kilometer dient der Lesbarkeit; sie ist keine Zusicherung einer Vorhersagegenauigkeit von 1.000 km. [12]

Datum TDB	Abstand Mio. km	Abstand au	Relativgeschwindigkeit km/s
08.10.2030	78,983	0,5280	21,46
17.11.2031	204,609	1,3677	47,42
18.12.2032	274,437	1,8345	63,01
10.01.2034	265,430	1,7743	60,96
14.02.2035	180,592	1,2072	42,43
27.03.2036	46,332	0,3097	15,01
31.12.2036	49,370	0,3300	6,84
24.09.2037	33,386	0,2232	12,37
05.11.2038	169,847	1,1354	40,06
10.12.2039	260,426	1,7408	59,72
03.01.2041	277,145	1,8526	63,74
02.02.2042	213,596	1,4278	49,44
14.03.2043	90,951	0,6080	23,95
06.02.2044	41,844	0,2797	5,78
24.08.2044	12,006	0,0803	3,96
23.10.2045	130,733	0,8739	31,96
30.11.2046	238,689	1,5955	54,82
27.12.2047	280,821	1,8772	64,61
21.01.2049	242,171	1,6188	55,70
28.02.2050	136,164	0,9102	33,18

Tabelle 6. Sämtliche im Tagesraster erkannten und durch direkte Integration verfeinerten Minima. [12]

Die engste neue Annäherung ist August 2044. Weitere Minima etwa 2041 und 2042 liegen in dieser heutigen Nominalrechnung mehr als 200 Millionen Kilometer entfernt. Diese Datumsangaben bezeichnen keine historischen hypothetischen Impaktbahnen.

Einheiten und Zeitangaben

Die astronomische Einheit beträgt exakt 149.597.870,7 km. Abstände sind geometrische geozentrische Abstände. TDB ist die für die dynamische Rechnung verwendete Zeitskala; ESA zeigt UTC. Zukunftsangaben in UTC verwenden die vorhandene Schaltsekundentabelle. Zeiten mit Sekunden und Entfernungen mit weiteren Dezimalstellen sind im Datenpaket zur Reproduktion gespeichert. Für die Risikobeurteilung genügen die gerundeten Zahlen.

Anhang B Quellen und Reproduktionsnachweis

Primärquellen und Datensätze. Abruf der dynamischen Daten und Risikoprodukte am 28.11.2026. In den Rohdaten stehen vollständige Anfrage-URLs, Zeitstempel und Dateiprüfsummen. Die Nummern entsprechen den Belegen im Text.

[1] NASA/JPL (25.03.2021). NASA Analysis: Earth Is Safe From Asteroid Apophis for 100-Plus Years. Offizielle Risikobewertung nach den Radar- und optischen Beobachtungen. JPL-Mitteilung

[2] NASA/JPL SSD und CNEOS. Close-Approach Data API und Small-Body Database API, Apophis 99942, Lösung 220. CAD- und SBDB-Begegnungswerte wurden feldweise abgeglichen. Archiv: data_agent/. CAD-Daten · CAD-Dokumentation · SBDB

[3] NASA/JPL CNEOS. Sentry, aktueller Objektstatus und Erläuterungen. Die API meldet das Objekt als entfernt; die SBDB enthält keine virtuellen Impaktoren. Sentry-Status · Erläuterungen

[4] ESA NEO Coordination Centre. Apophis-Objektseite, Aegis-Begegnungen und aktuelle Risikoliste. Aegis-Berechnung vom 30.07.2026; Unsicherheitskonvention laut NEOCC-Hilfe. Objektseite · Hilfe · Risikoliste

[5] NASA/JPL Horizons. Baryzentrischer Anfangszustand 2021 und geozentrische geometrische Vektoren bis 2050, Lösung 220, DE441. Gesondert gespeicherte Ereignisfenster zur Referenzauswertung. Horizons-Dokumentation

[6] Farnocchia et al. (2013). Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. Icarus 224, 192–200. Historische Schlüssellöcher und damalige Bahnlösung. DOI · Manuskript

[7] Farnocchia und Chesley (2022). Apophis Trajectory, Impact Hazard, and Sensitivity to Spacecraft Contact. Apophis T−7 Years, Abstract 2007. Fachliche Einordnung nach 2021. Originalabstract

[8] Ďurech et al. (2026). The spin state of asteroid Apophis and a prediction of its change during the 2029 close encounter with Earth. Astronomy & Astrophysics 709, A278. Modellabhängige Aussagen zu Achslage und Yarkovsky-Drift. DOI · Manuskript

[9] Wiegert (2024). On the sensitivity of Apophis's 2029 Earth approach to small asteroid impacts. The Planetary Science Journal 5, 184. Betrachtetes Störungsfenster: Mai 2021 bis April 2029. DOI · Manuskript

[10] Roa, Farnocchia und Chesley (2021). A Novel Approach to Asteroid Impact Monitoring. The Astronomical Journal 162, 277. Methodik des Sentry-II-Systems. DOI · Manuskript

[11] Fuentes-Muñoz, Farnocchia, Chesley und Park (2026). The Hazardous NEOs of the Future: Long-term Predictions under Uncertainty. The Journal of the Astronautical Sciences 73, 61. DOI

[12] Retzlaff, Proto (28.11.2026). Eigene Apophis-Fortrechnung bis 2050. run_post2029.py; summary_for_report.json; run_manifest.json; Kovarianz-, Validierungs- und Szenariodateien. Alle eigenen Tabellen und Abbildungen sind aus diesen gespeicherten Ergebnissen beziehungsweise den archivierten offiziellen Daten erzeugt.

[13] Kim, DeMartini, Richardson und Hirabayashi (2023). Tidal resurfacing model for (99942) Apophis during the 2029 close approach with Earth. MNRAS 520, 3405–3415. Ballouz et al. (2024). Shaking and Tumbling: Short- and Long-timescale Mechanisms for Resurfacing of Near-Earth Asteroid Surfaces from Planetary Tides and Predictions for the 2029 Earth Encounter by (99942) Apophis. The Planetary Science Journal 5, 251. Kim et al. · Ballouz et al.