

---

# **Integration von Climate Risk und Geospatial Analyse zur Risikobewertung von Immobilienportfolios**

**Uyen Truong**

---

Masterarbeit

an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Fakultät für Informatik und Mathematik

Studienrichtung: Stochastic Engineering in Business and Finance

vorgelegt von

Uyen Truong

München, den 5. September 2024

Erstgutachter: Prof. Dr. Silja Grawert

## **Abstract**

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1 Zitate . . . . .	10
1.2 Bilder . . . . .	11
1.3 Tabellen . . . . .	11
1.4 Quellcode . . . . .	11
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b>	<b>12</b>
2.1 Wesentliche Begriffe . . . . .	12
2.1.1 Beleihungsauslauf . . . . .	12
2.1.2 Transitionsrisiken . . . . .	13
2.1.3 Physische Risiken . . . . .	13
2.1.4 Klimaszenarien des NGFS . . . . .	13
2.1.5 Abflussmenge bei Hochwasser . . . . .	16
2.1.6 Energieeffizienzklasse . . . . .	16
2.2 Statistische Grundlage . . . . .	17
2.2.1 Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit . . . . .	17
2.2.2 Stichprobenumfang . . . . .	18
<b>3 Portfoliostrukturierung und Datenanalyse</b>	<b>20</b>
3.1 Hypothekendaten . . . . .	20
3.2 Geodaten zu Hypotheken und Hochwasser . . . . .	21
3.2.1 Hypothekengeodaten . . . . .	21
3.2.2 Hochwassergeodaten . . . . .	25
3.2.3 Überflutungstiefen . . . . .	27
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

1	Mooresches Gesetz . . . . .	11
2	NGFS Klimaszenario-Framework. Quelle: NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors (June 2021) . . . . .	14
3	Verteilung der Bevölkerungsdichte Bayerns nach Postleitzahlenbereichen. Quelle: Eigene Darstellung . . . . .	23
4	Datenpunktverteilung im Hypothekenportfolio Bayern. Quelle: Eigene Darstellung . . . . .	24
5	EU-Hochwasserrisikokarte. Quelle: EZB 2022 Klimarisiko-Stresstest . . . . .	25
6	Visualisierung historischer Hochwasserereignisgebiete und Verteilung des Darlehensportfolios in Bayern. Quelle: Eigene Darstellung . . . . .	26

## Tabellenverzeichnis

1	Prozessoren . . . . .	11
2	Überblick über NGFS-Rahmen zur Klassifizierung von Klimarisiken. In Anlehnung an Quelle: NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors (June 2021). . . . .	15
3	Überblick über Energieeffizienzklassen für Gebäude. Quelle:Gebäudeenergiegesetz (2020) . . . . .	17
4	Wiederkehrperiode und Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit mit $HQ_{T_n}$	18
5	Verteilung des Beleihungsauslaufs im Wohnimmobilienportfolio der Münchener Hypothekenbank zum 31.12.2023. Quelle: Münchener Hypothekenbank eG (2023) . . . . .	21
6	Übersicht der Geodaten für Postleitzahlgebiete in Bayern . . . . .	22
7	Übersicht der Geodaten für generierte Portfolios in Bayern . . . . .	24

## Quellcodeverzeichnis

1	Hello World in Java . . . . .	11
---	-------------------------------	----

## Abkürzungsverzeichnis

<b>LtV</b>	Loan to Value
<b>EZB</b>	Europäische Zentralbank
<b>AEP</b>	Annual Exceedance Probability
<b>EPC</b>	Energy Performance Certificate
<b>NGFS</b>	Network for Greening the Financial System
<b>DGM</b>	Digitales Geländemodell
<b>RWA</b>	Risk-weighted asse
<b>EAI</b>	Expected Annual Impact
<b>EI</b>	expectedimpact

# 1 Einleitung

Im Rahmen des Klimarisiko-Stresstests 2022 konzentrierte sich die Bewertung physischer Risiken auf zwei extreme Wetterereignisse, die zentrale Klimarisiken in Europa darstellen: (1) eine große Überschwemmung und (2) eine schwere Dürre mit Hitzewelle (European Central Bank, 2022). Flussüberschwemmungen waren historisch betrachtet eine bedeutende Quelle physischer Risiken in Europa und werden aufgrund prognostizierter Niederschlagszunahmen voraussichtlich an Relevanz gewinnen. Diese Arbeit fokussiert sich spezifisch auf das Flusshochwasserrisiko in Bayern, Deutschland. Diese Eingrenzung ermöglicht eine detaillierte Analyse der regionalen Auswirkungen und Anpassungsstrategien im Kontext physischer Klimarisiken für den bayerischen Immobiliensektor.

Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, wie Zitate, Bilder, Tabellen oder Quellcode in die Arbeit eingefügt werden können.

Extreme weather events, such as floods, heat waves, cold waves, droughts, and hurricanes, can generate a significant impact on a bank's residential mortgage portfolio. Their impacts can be summarized as follows: Damage to property as collateral: They can cause damage to homes and other properties, making it difficult for homeowners to make their mortgage payments to the bank. Higher default rate: The bank will encounter higher default rates on mortgage loans in the region concerned. For instance, borrowers may become homeless because of severe damage to their properties and their wealth. Some borrowers may lose their jobs and find it hard to repay loans to the bank. Lower property valuation: In addition to direct damage to a property, extreme weather events can lower the market valuation of properties in the region concerned. Other banks may cut their residential mortgage lending for the region. Insurance companies may increase insurance premiums on properties in the region. All these factors lead to lower property values in the region. Then, the bank will encounter higher loan-to-value (LTV) ratios on mortgage loans, higher credit risk estimates on mortgage loans, and higher capital required to support the mortgage lending business. To deal with climate risks to banks, some bank regulators have taken steps to mitigate the risk of extreme weather events on residential mortgage loans. For example, the bank regulators of the EU, the USA, Canada, Australia, and Hong Kong have guidelines established for lenders to follow when evaluating the risk of default on a loan. These guidelines include requirements for lenders to assess the potential impacts of extreme weather events on a borrower's ability to make payments. The Prudential Banking Authority of the UK encourages banks to consider insurance coverage on residential mortgages against climate catastrophes. This aims to ensure that lenders are adequately protected in an



extreme weather event. Both the US and Australian regulators have developed guidelines for lenders to follow when providing relief to borrowers affected by extreme weather events. These guidelines include requirements for lenders to provide temporary payment relief and additional support for borrowers unable to make mortgage payments due to extreme weather. The Basel Committee makes it clear that banks should consider the possible impacts of extreme weather events on property values associated with collateralized loans and expects bank regulators to develop prudent valuation criteria for their jurisdictions [1]. The impact of extreme weather events on property values is a complex issue that has been the subject of much research in recent years. For instance, the types of climate hazard risks, the resilience of urban development, geolocation, types of buildings, types of economic activities in a region, etc., can affect how a climate hazard damages property values [2]. Banks have an urgent need to improve their property valuation models with multi-criteria techniques [3]. One challenge for bank regulators in managing climate risk on residential mortgage loans in a banking system is the lack of data and information about the potential impacts of extreme weather events. This makes it difficult for regulators to assess the risk of default on a loan and to develop effective strategies to mitigate this risk. In addition, there is a lack of understanding of the potential impacts of extreme weather events on the housing market. This can make it difficult for regulators to evaluate the potential impacts of climate change on the availability of housing and the cost of residential mortgages. Furthermore, there is a lack of agreement among regulators about how to best manage climate risks in the financial system. This can lead to a lack of coordination between regulators, making it difficult to effectively manage climate risk on mortgage loans. This paper aims to propose a framework to integrate two extreme weather risk measures, namely, stressed PD (probability of default) and stressed LGD (loss given default), into existing credit risk management frameworks used by banks following the internal-rating-based (IRB) approach of Basel II [4]. Since the implementation of Basel II, before 2010, many banks have developed their own IRB systems built for credit risk assessment and capital requirement calculations. These IRB systems continue to be used under Basel III, effective in January 2020. According to Basel Committee rules, the IRB systems produce three major credit risk measures, namely, probability of default (PD), loss given default (LGD), and exposure at default (EAD). Bank regulators convert these three credit risk measures into the capital required for credit risk business. By integrating the proposed extreme weather risk measures, banks can easily conduct climate stress tests on their residential mortgage loans. Meanwhile, bank regulators can easily compare the climate risks of residential mortgage loans from different banks. Traditional stress tests used by banks aim to evaluate worst-case losses resulting from undesirable economic scenarios. The stress scenarios can be specified by related regulators every year or on an ad hoc basis, associated with a bank's historical experience, based on expert projections, and/or

grounded in some statistical confidence levels of market or economic outcomes. Some banks prefer to consider a consistent set of stress scenarios. This enables them to compare the stressed losses of their different business units and perform a trend analysis of stressed losses. The stressed loss results under consistently applied scenarios can be conveniently translated into internal capital allocation and credit pricing. Such methodologies of economic stress tests can be converted to climate stress tests. The goal of the climate stress test is to set an extreme weather scenario and evaluate related losses. Extreme weather events did not happen very often in the past, but they will be more frequent in the future. Bank regulators may occasionally give banks some climate stress scenarios to consider. However, the banks themselves do have an urgent need to routinely evaluate stressed losses due to extreme weather events and determine their business and lending strategies. This is because extreme climate events may arrive with short notice. This paper considers a hypothetical case in which a bank wants to develop a routine climate stress test exercise for its portfolio of residential mortgage loans. The bank is determined to update the climate stress test results every 6 months, while most bank regulators perform the test at least once a year. This climate stress test exercise is complementary to the ad hoc climate stress tests required by the bank's regulator. It is assumed that the bank routinely updates the PD and LGD of every residential mortgage loan and its related stressed loss arising from a predetermined and hypothetical extreme weather event. With simulation techniques and the assumptions of default correlation, this paper evaluates the stressed loss of the bank's portfolio of residential mortgage loans. The results show that the bank can suffer a portfolio loss of 24.1. This paper will proceed as follows. Section 2 provides a literature review on the impacts of extreme weather on residential mortgage loans, credit risks in extreme weather conditions, and recent actions of bank regulators on climate risk management. Section 3 describes how the hypothetical case study is used in this paper. Section 4 discusses stress test assumptions and results. Section 5 concludes the paper.

## 1.1 Zitate

Menschen, die mit ihrem IQ prahlen, sind Versager.

## 1.2 Bilder

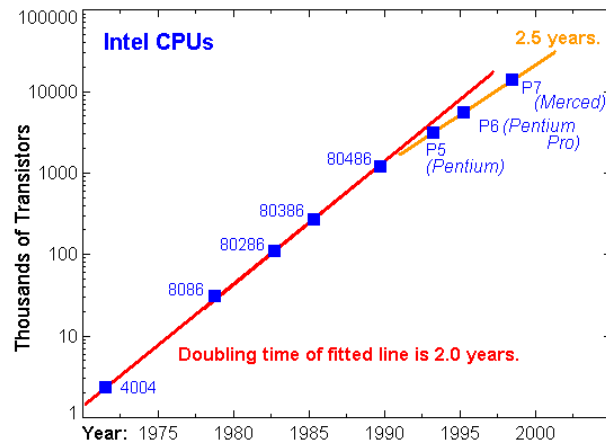


Abbildung 1: Mooresches Gesetz

## 1.3 Tabellen

Bezeichnung	Kerne	TDP
Intel Core i5	6	111 W
AMD Ryzen 7	8	178 W

Tabelle 1: Prozessoren

## 1.4 Quellcode

```
1  class HelloWorld {  
2      public static void main(String[] args) {  
3          // Display the string.y  
4          System.out.println("Hello World!");  
5      }  
6  }
```

Quellcode 1: Hello World in Java

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Wesentliche Begriffe

#### 2.1.1 Beleihungsauslauf

Der Beleihungsauslauf, auch als Loan to Value (LtV) bekannt, ist eine zentrale Kennzahl in der Immobilienfinanzierung (§3 BelWertV). Er wird definiert als:

$$\text{Beleihungsauslauf} = \frac{\text{Darlehensbetrag}}{\text{Beleihungswert}} \quad (1)$$

wobei:

- Der Darlehensbetrag ist die Höhe des Darlehens.
- Der Beleihungswert ist der langfristig erzielbare Wert einer Immobilie, unabhängig von kurzfristigen Marktschwankungen.

Ein niedrigerer Beleihungsauslauf signalisiert dem Kreditinstitut ein geringeres Ausfallrisiko. Ein höherer Beleihungsauslauf erhöht das Risiko und verschlechtert die Kreditbedingungen.

Zur Veranschaulichung wird ein Fallbeispiel einer Immobilienfinanzierung herangezogen. Dabei bewertet zunächst ein Gutachter ein Objekt, dessen Beleihungswert bei 500.000 Euro liegt. Ein Käufer beantragt einen Kredit von 275.000 Euro für den geplanten Hauskauf. Der Beleihungsauslauf wird gemäß Gleichung 1 folgendermaßen berechnet:

$$\text{Beleihungsauslauf} = \frac{\text{Darlehensbetrag}}{\text{Beleihungswert}} = \frac{275.000\text{€}}{500.000\text{€}} = 0,55 = 55\% \quad (2)$$

Der Beleihungsauslauf in diesem Fall beträgt 55%. Das bedeutet, dass 55% des Immobilienwertes von der Bank finanziert. Die restlichen 45% müssen durch Eigenkapital oder andere Einnahmequellen abgedeckt werden.

### 2.1.2 Transitionsrisiken

Transitionsrisiken bezeichnen finanzielle Risiken für Verluste, die im Zuge des Übergangs zu einer Wirtschaft mit weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen und einer umweltfreundlicheren Ökonomie auftreten können (Europäische Zentralbank, 2020). Dies sind Risiken im Zusammenhang mit Technologie, Marktpreisen, Regulierung und Reputation

Der Bereich der Immobilien ist stark betroffen, da er für 40% der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich ist (United Nations Environment Programme Finance Initiative, 2023). Die neuen Gesetze zu Energiepreisen und CO<sub>2</sub>-Steuern verursachen die Hauptursachen dieser Risiken. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, sind Anpassungen unumgänglich.

### 2.1.3 Physische Risiken

Unter physischen Risiken versteht man Gefahren aus Naturereignissen mit negativen Folgen für Gesellschaft, Wirtschaft und Ökosysteme (Green Vision Solutions, 2023). Diese Risiken werden in zwei Kategorien unterteilt. Akute Risiken entstehen durch plötzliche extreme Ereignisse wie Überschwemmungen oder Stürme. Chronische Risiken ergeben sich aus langfristigen klimatischen Veränderungen. Beispiele dafür sind der Meeresspiegelanstieg, Wasserstress, Biodiversitätsverlust und Mangel an Ressourcen.(Schellekens und Toor, 2019).

### 2.1.4 Klimaszenarien des NGFS

Das Network for Greening the Financial System (NGFS) hat 72 verschiedene Klimaszenarien entwickelt, wovon sechs für diese Arbeit ausgewählt wurden. Diese sechs Szenarien repräsentieren ein breites Spektrum möglicher Entwicklungen unter Berücksichtigung verschiedener physischer Risiken und Transitionsrisiken (Network for Greening the Financial System, 2021). In Abbildung 2 ist die Darstellung der sechs Haupt-Szenarien des NGFS im Rahmenwerk zu sehen. In Tabelle 2 sind ausführliche Erläuterungen zu diesen Situationen enthalten.

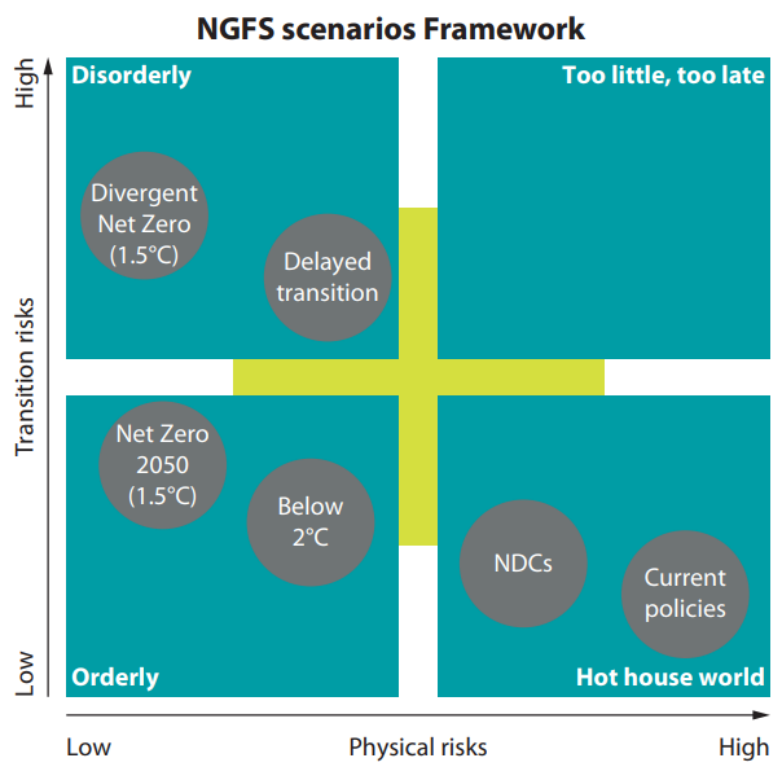


Abbildung 2: NGFS Klimaszenario-Framework. Quelle: NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors (June 2021)

Tabelle 2: Überblick über NGFS-Rahmen zur Klassifizierung von Klimarisiken. In Anlehnung an Quelle: NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors (June 2021).

Szenario	Transitionsrisiken	Physische Risiken	Beschreibung
Orderly	Niedrig	Niedrig	Maßnahmen zur Klimapolitik werden frühzeitig eingeführt und schrittweise verschärft. Sowohl Transitions- als auch physische Risiken bleiben gering.
Disorderly	Hoch	Niedrig	Höhere Transitionsrisiken aufgrund verzögerter oder inkonsistenter Klimapolitiken
Hot house world	Niedrig	Hoch	Begrenzte Klimapolitik in einigen Ländern; globale Bemühungen unzureichend gegen Erwärmung. Folge: Schwere physische Risiken mit irreversiblen Auswirkungen wie Meeresspiegelanstieg.
Too little, too late	Hoch	Hoch	Extremste Szenarien. Unzureichende Maßnahmen führen zu Katastrophen und erzwingen einen ungeordneten Übergang.

Die Szenarien „Orderly“, „Disorderly“ und „Hot House World“ für die Jahre 2030, 2040 und 2050 stehen im Mittelpunkt. Im EZB-Klimarisiko-Stresstest werden sie mittels eines Bottom-up-Ansatzes berücksichtigt und beinhalten sowohl Transitions- als auch physische Risiken (European Central Bank, 2022). Diese Szenarien bilden die Grundlage für die Analyse der potenziellen Auswirkungen verschiedener Klimapolitiken auf den Immobiliensektor über einen längeren Zeitraum und ermöglichen eine detaillierte Untersuchung der Bruttowertschöpfung in diesem Sektor.

### 2.1.5 Abflussmenge bei Hochwasser

Die Festlegung von Hochwasserrisikogebieten in Deutschland erfolgt gesetzlich anhand der Anzahl von  $HQ_{T_n}$ -Ereignissen gemäß dem § 73 Abs. 1 WHG. Hierbei steht HQ für die Abflussmenge bei Hochwasser, während  $T_n$  für den statistische Wiederkehrperiode des Ereignisses. Beispielsweise bezeichnet ein  $HQ_{100}$  ein statistisch einmal in 100 Jahren auftretendes Hochwasserereignis. In Bayern erfolgt eine detailliertere Klassifizierung von Hochwasserereignissen anhand ihrer statistischen Häufigkeit (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2019):

- $HQ_{\text{häufig}}$ : Ein Hochwasser, das im Mittel alle 5 bis 20 Jahre auftritt und als "häufiges Hochwasser" bezeichnet wird.
- $HQ_{100}$ : Ein Ereignis, das statistisch einmal in 100 Jahren zu erwarten ist.
- $HQ_{\text{extrem}}$ : Ein sehr seltenes Extremhochwasser, das zu deutlich höheren Wasserständen als ein  $HQ_{100}$  führen kann.

Durch diese Einteilung ist es möglich, Hochwassergefahren genauer zu bewerten und die Entwicklung von Schutzmaßnahmen zu unterstützen.

### 2.1.6 Energieeffizienzklasse

Der Energieeffizienzklassen, auch Energy Performance Certificate (EPC) bekannt, ist eine zentrale Kennzahl in der Immobilien. Sie bewertet, wie viel Energie ein Gebäude verbraucht. Es gibt Klassen von A+ bis H, wobei A+ am besten und H am schlechtesten ist. Diese Einteilung



zeigt, wie energiesparend ein Haus oder eine Wohnung ist. Das ist wichtig für Hausbesitzer, Mieter und Käufer. Mit dieser Information können sie besser entscheiden, wie viel Energie ein Gebäude braucht. Die Klassifizierung für Energieeffizienzklassen erfolgt anhand der Effizienz, die in kWh pro m<sup>2</sup> gemessen wird (Gebäudeenergiegesetz, 2020). Dabei dient die Nutzfläche als Grundlage, welche meist etwas größer als die Wohnfläche ist. Aus Tabelle 3 ergeben sich folgende Grenzwerte für die Klassen.

Tabelle 3: Überblick über Energieeffizienzklassen für Gebäude. Quelle: Gebäudeenergiegesetz (2020)

Energieverbrauch (kWh/m <sup>2</sup> a)	Energielabel
≤ 30	A+
30 – 50	A
50 – 75	B
75 – 100	C
100 – 130	D
130 – 160	E
160 – 200	F
200 – 250	G
≥ 250	H

## 2.2 Statistische Grundlage

### 2.2.1 Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit

Der Begriff des „100-jährlichen Ereignisses“ oder HQ<sub>100</sub>, wie in Abschnitt 2.1.5 erläutert, ist im öffentlichen Diskurs weit verbreitet. Diese Terminologie kann zu Missinterpretationen führen, da sie impliziert, dass solche Ereignisse nur alle 100 Jahre auftreten. Um dieses Missverständnis zu vermeiden, verwendet man in den Geowissenschaften das Konzept der Annual Exceedance Probability (AEP), auch bekannt als Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit (United States Water Resources Council, 1981). Die AEP, basierend auf der Theorie der unabhängigen Wahrscheinlichkeit, quantifiziert die jährliche Auftretswahrscheinlichkeit von Extremereignissen als Prozentwert. Die Formel für die AEP lautet:

$$AEP = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Wobei:

- T: Wiederkehrperiode in Jahren
- n: Anzahl der betrachteten Jahre

Für ein einzelnes Jahr ( $n = 1$ ) vereinfacht sich die Formel zu:

$$AEP = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird, hat ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren (ein „100-jährliches Ereignis“) eine jährliche Auftretswahrscheinlichkeit von 1%. Im Gegensatz dazu weist ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrperiode von 2 Jahren (ein „2-jährliches Ereignis“) eine jährliche Auftretswahrscheinlichkeit von 50% auf.

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird, hat ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren (ein „100-jährliches Ereignis“) eine jährliche Auftretswahrscheinlichkeit von 1%. Im Gegensatz dazu weist ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrperiode von 2 Jahren (ein „2-jährliches Ereignis“) eine jährliche Auftretswahrscheinlichkeit von 50% auf.

Tabelle 4: Wiederkehrperiode und Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit mit  $HQ_{T_n}$

$HQ_{T_n}$	Wiederkehrperiode (Jahre)	Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit
HQ <sub>2</sub>	2	50%
HQ <sub>10</sub>	10	10%
HQ <sub>25</sub>	25	4%
HQ <sub>50</sub>	50	2%
HQ <sub>100</sub>	100	1%
HQ <sub>500</sub>	500	0,2%
HQ <sub>1000</sub>	1000	0,1%

### 2.2.2 Stichprobenumfang

Stichprobenverfahren werden genutzt, um die Verteilung der Merkmale in der Gesamtheit zu schätzen. Zur Gewährleistung der Repräsentativität bei begrenzter Teilmengengröße sind präzise statistische Kriterien erforderlich. Diese umfassen die Berechnung des Stichprobenumfangs und die Wahl der geeigneten Methode.

Für die Berechnung des erforderlichen Stichprobenumfangs bei einer theoretisch unendlichen Grundgesamtheit wird die Cochran-Formel (Cochran, 1953) herangezogen. Die Cochran-Formel lautet:

$$n = \frac{Z^2 \cdot P(1 - P)}{\varepsilon^2} \quad (4)$$

Hierbei repräsentiert  $n$  den initialen Stichprobenumfang.  $Z$  steht für den Z-Wert des gewählten Konfidenzintervalls.  $P$  bezeichnet die erwartete Wahrscheinlichkeit des untersuchten Merkmals, und  $\varepsilon$  repräsentiert den tolerierten Fehler.

Für Populationen mit bekannter, endlicher Größe wird die Cochran-Formel modifiziert. Die Originalformel 4 dient als Eingabeparameter für die folgende Gleichung 5. Diese berechnet den erforderlichen Stichprobenumfang für ein Portfolio der Größe  $N$ :

$$n' = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}} \quad (5)$$

In dieser Gleichung steht  $n'$  für die angepasste Stichprobengröße einer begrenzten Population.  $N$  repräsentiert die Gesamtpopulationsgröße.

### 3 Portfoliostrukturierung und Datenanalyse

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Erstellung eines repräsentativen Hypothekenportfolios erläutert. Der Prozess der Portfoliokonstruktion sowie die herangezogenen Datenquellen werden dargelegt. Diese methodische Grundlage ermöglicht die Analyse von physischen Risiken und Transitionsrisiken für Immobiliendarlehen.

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Methodik zur Generierung eines repräsentativen Musterportfolios erläutert, das als Grundlage für die Prognose klimabedingter Schäden dient. Trotz des umfangreichen Datenbestands der Finanzinstitute über ihre Kreditengagements hat die limitierte Zugänglichkeit zu detaillierten Datensätzen bisher umfassende empirische Analysen der Kreditrisiken eingeschränkt. Zur Überwindung dieser Limitation wird ein Musterportfolio konstruiert, das eine fundierte Approximation der erwarteten Verluste aus Wohnimmobilienkrediten ermöglicht. Die Quantifizierung essenzieller Risikoparameter basiert primär auf dem Geschäftsbericht der Münchener Hypothekenbank (Münchener Hypothekenbank eG, 2023), ergänzt durch ausdifferenzierte Datensätze zur Distribution von Energieeffizienzklassen und regionalen Verteilung von Wohneinheiten. Diese Datenaggregation bildet die Basis für eine detaillierte Analyse der Anfälligkeit verschiedener Immobilienarten und Standorte gegenüber umweltbedingten Wertänderungen, physischen Risiken sowie Transitionsrisiken.

#### 3.1 Hypothekendaten

In diesem Abschnitt wird die Analyse des Geschäftsberichts der Münchener Hypothekenbank durchgeführt. Um Schäden an spezifischen Gebäuden vorherzusagen, wird ein Portfolio benötigt, das ein repräsentatives Bankportfolio widerspiegelt. Es ist notwendig, ein Portfolio zu erstellen, das in etwa realistisch ist, da die vertraulichen Wohnimmobilien-Hypothekenportfolios von Banken nicht öffentlich bekannt gegeben werden. Es wird analysiert, welche Aspekte berücksichtigt werden, um die Größe und Struktur eines Portfolios von Wohnimmobilien-Hypotheken festzulegen. Außerdem wird erläutert, wie Informationen zu Kreditmerkmalen, speziell Beleihungsquoten, in das Portfolio eingebunden werden.

Zum Stichtag 31.12.2023 belief sich der ausstehende Bestand an Wohnimmobilienfinanzierungen im Portfolio der Münchener Hypothekenbank eG (2023) in Bayern auf 8.921.489.311,00 €, wobei die durchschnittliche Größe der Darlehen für Wohnimmobilien circa 163.700,00 €

betrug. Zur Ermittlung der Anzahl der Darlehen im Portfolio wird zunächst der Gesamtbestand durch die durchschnittliche Größe der Darlehen dividiert, was gerundet 54.500 Darlehen ergibt. Unter Anwendung der Gleichung 4 zur Berechnung der erforderlichen Stichprobengröße für das theoretische Szenario einer unendlichen Anzahl von Immobilien im Portfolio ergibt sich bei einem Konfidenzintervall von 99% und einer Fehlermarge von 2% ein notwendiger Stichprobenumfang von 4.147 Datenpunkten. Die in Gleichung 5 präsentierte Formulierung für endliche Populationen führt jedoch zu einer Reduktion auf 3.853 Darlehen als erforderliche Stichprobengröße für Portfolios mit 54.500 Elementen.

Neben der Anzahl der Darlehen ist auch deren Qualität, insbesondere der Beleihungsauslauf, von entscheidender Bedeutung für die Repräsentativität des Portfolios. Da die in den Geschäftsberichten ausgewiesenen Kreditbestände lediglich das Risikoexposure des Kreditinstituts reflektieren und nicht den realen Immobilienwert repräsentieren, ergibt sich die Notwendigkeit, den Property Value in Relation zum Gesamtrisikoexposure zu evaluieren. Die Münchener Hypothekbank hat in ihrem Jahresbericht die Verteilung des Beleihungsauslaufs in tabellarischer Form offengelegt (siehe Tabelle 5). Darüber hinaus wurde ein durchschnittlicher Beleihungsauslauf von 54,1% für die Wohnimmobilienfinanzierung angegeben. Diese Informationen stellen die fundamentalen finanziellen Parameter dar, die für die Konstruktion eines repräsentativen Immobilienportfolios essenziell sind.

Tabelle 5: Verteilung des Beleihungsauslaufs im Wohnimmobilienportfolio der Münchener Hypothekbank zum 31.12.2023. Quelle: Münchener Hypothekbank eG (2023)

LtV	$\leq 60\%$	60–70%	70–80%	80–90%	90–100%	$> 100\%$
Prozentanteil	39,2%	15,0%	16,4%	10,2%	8,2%	11,0%

## 3.2 Geodaten zu Hypotheken und Hochwasser

### 3.2.1 Hypothekengeodaten

Für die Kompatibilität von Hypotheken- und Hochwasserdaten sind geografische Koordinaten erforderlich. Dieser Abschnitt befasst sich mit der Generierung präziser Koordinaten für die Datenpunkte.

Eine zufällige Verteilung in Bayern würde die Struktur eines Kreditportfolios nicht korrekt abbilden, da eine ungleichmäßige Verteilung von Immobilien sowohl in Deutschland

als auch in Bayern zu beobachten ist. Zurek (2022) analysierte die Beziehung zwischen Bevölkerungsdichte und Kreditvergabe in Deutschland. Die Studie zeigt, dass Regionen mit stärkerem Wirtschaftswachstum höhere Immobilienpreise aufweisen. Dies führt zu einer erhöhten Kreditnachfrage. Auf Basis dieser empirischen Erkenntnisse wird die Bevölkerungsdichte als Grundlage für die Zuweisung spezifischer Koordinaten zu jedem Datenpunkt herangezogen.

Die verwendete Datenquelle stammt von [www.suche-postleitzahl.org](http://www.suche-postleitzahl.org) (2023). Sie kombiniert OpenStreetMap-Daten mit Einwohnerzahlen von Statistisches Bundesamt (2023). Dies ermöglicht eine präzise Segmentierung in Postleitzahlenzonen. Tabelle 6 zeigt die Daten dieser geographischen Strukturierung.

Tabelle 6: Übersicht der Geodaten für Postleitzahlgebiete in Bayern

plz	einwohner	qkm	geometry	ort	landkreis	bundesland
81248	121	1984763	POLYGON((...))	München		Bayern
96103	8519	14585957	POLYGON((...))	Hallstadt	Landkreis Bamberg	Bayern
63930	1552	16628516	POLYGON((...))	Neunkirchen	Landkreis Miltenberg	Bayern
94530	2071	2414777	POLYGON((...))	Auerbach	Landkreis Deggendorf	Bayern
85051	31592	3878506	POLYGON((...))	Ingolstadt		Bayern
63916	4002	51878059	POLYGON((...))	Amorbach	Landkreis Miltenberg	Bayern
...	...	...	...	...	...	...
83024	16249	9466746	POLYGON((...))	Rosenheim		Bayern

Tabelle 6 wurde aus Shapefile-Daten der Postleitzahlenregionen generiert und umfasst die Bevölkerungsverteilung. Vier Spalten sind von besonderer Relevanz: Ort, Landkreis, Geometrie und Einwohner. Die Geometriespalte enthält die geografischen Koordinaten der Gemeinden, dargestellt als Polygon oder Multipolygon. Ein Multipolygon setzt sich aus mehreren Einzelpolygonen verschiedener Formen zusammen. Zur räumlichen Referenzierung dient das Koordinatensystem EPSG:3035. Abbildung 3 visualisiert die aus diesen Daten abgeleitete Bevölkerungsdichteverteilung Bayerns nach Postleitzahlenbereichen.

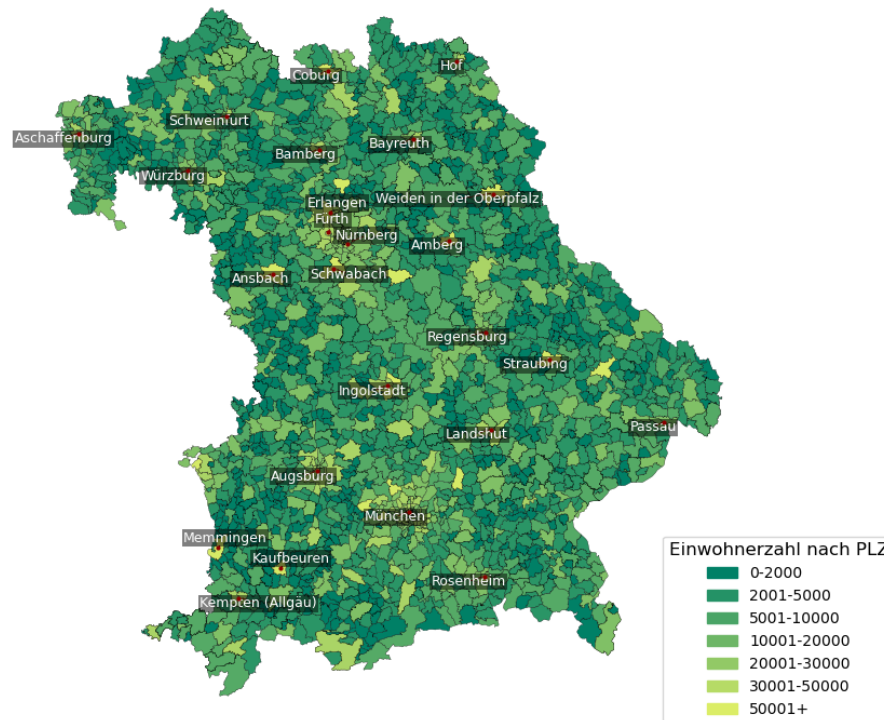


Abbildung 3: Verteilung der Bevölkerungsdichte Bayerns nach Postleitzahlenbereichen. Quelle: Eigene Darstellung

Zur repräsentativen Verteilung der 3853 Datenpunkte, entsprechend der Anzahl der Hypothekarkredite, wird ein proportionaler Ansatz implementiert, der auf der Einwohnerzahl jeder Region basiert. Innerhalb der Postleitzahlgebiete erfolgt die Platzierung mittels eines kontrollierten stochastischen Verfahrens. Für jede Region wird eine zuvor determinierte Anzahl von Zufallspunkten innerhalb der definierten Gebietsgrenzen generiert. Jedem Punkt werden spezifische Koordinaten in Form von Latitude (Breitengrad) und Longitude (Längengrad) zugewiesen. Anschließend wird eine Verifikation der Lage innerhalb des jeweiligen Polygons durchgeführt. Bei erfolgreicher Validierung wird der Punkt mit seinen Latitude- und Longitude-Koordinaten in die Liste der akzeptierten Datenpunkte integriert. Die resultierenden Daten werden in Tabelle 7 dargestellt. Abbildung 4 zeigt die resultierende Distribution der Datenpunkte auf der Karte Bayerns.

Tabelle 7: Übersicht der Geodaten für generierte Portfolios in Bayern

plz	ort	landkreis	latitude	longitude
637390	Aschaffenburg		49.9725	9.1401
979040	Dorfprozelten	Landkreis Miltenberg	4.9711	9.3921
815470	München		48.1047	11.5764
850980	Großmehring	Landkreis Eichstätt	48.7748	11.5158
820640	Oberhaching	Landkreis München	47.9859	11.4903
863430	Königsbrunn	Landkreis Augsburg	48.2435	10.8994
972470	Eisenheim	Landkreis Würzburg	49.8850	10.1471
...	...	...	...	...
852380	Petershausen	Landkreis Dachau	48.4000	11.5212

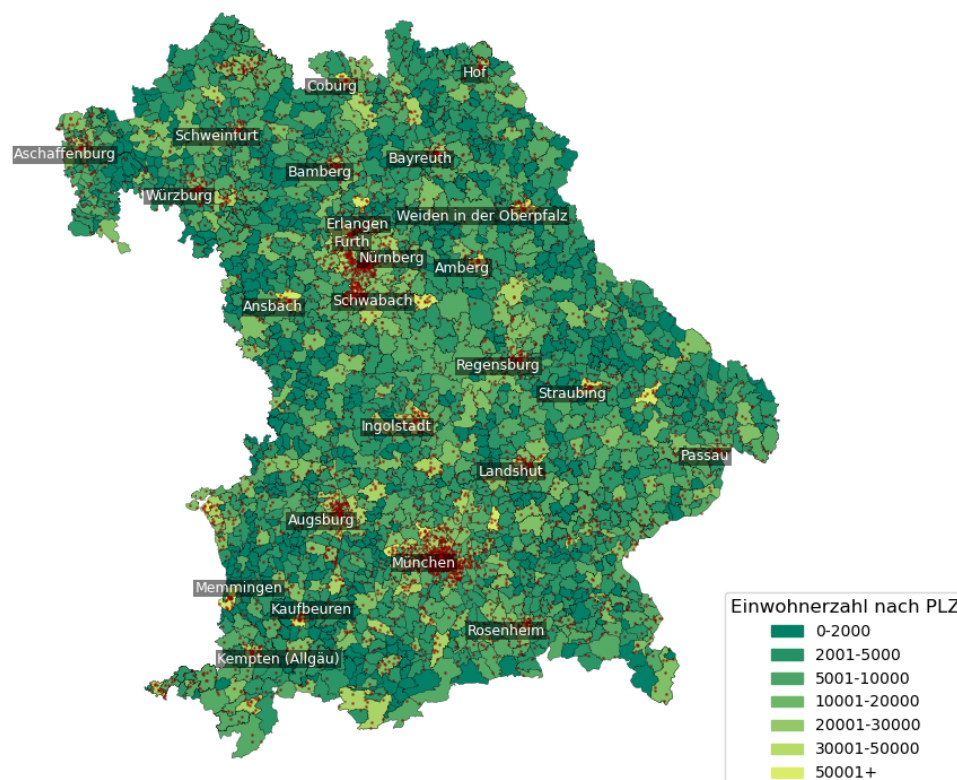


Abbildung 4: Datenpunktverteilung im Hypothekenportfolio Bayern. Quelle: Eigene Darstellung



### 3.2.2 Hochwassergeodaten

Nach der Erfassung der geographischen Koordinaten der Hypothekendarlehen ist es erforderlich, die Lage der entsprechenden Immobilien in Bezug auf Hochwasserrisikogebiete zu ermitteln. Infolgedessen erläutert dieser Abschnitt die Methodologie zur Erstellung einer detaillierten Hochwasserrisikokarte für Bayern. Diese basiert auf EU-Stresstest-Szenarien sowie regionalen Daten und beschreibt die Integration diverser Datenquellen zur präzisen Risikoanalyse.

Im Rahmen eines EU-weiten Stresstests stellt die Europäische Zentralbank (EZB) den Banken zur Simulation eines schweren Überschwemmungsszenarios eine Hochwasserrisikokarte (Abbildung 5) zur Verfügung.

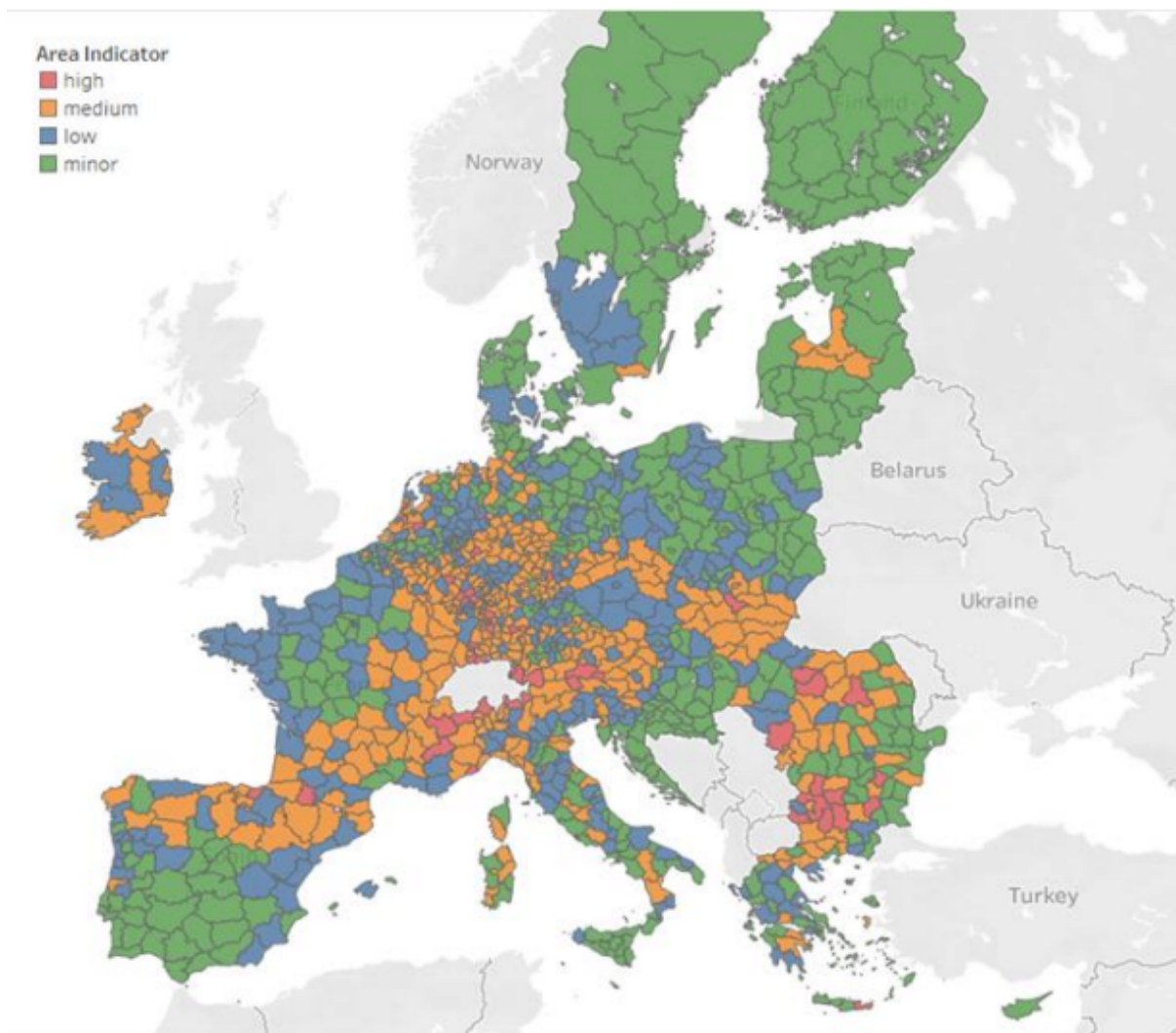


Abbildung 5: EU-Hochwasserrisikokarte. Quelle: EZB 2022 Klimarisiko-Stresstest

Diese Karte basierend auf Informationen der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen

Kommission und ergänzt durch Daten von Four Twenty Seven kategorisiert Regionen nach Risikoklassen (European Central Bank, 2022). Da jedoch die zugrundeliegenden Daten von der EZB nicht veröffentlicht wurden und die visuelle Repräsentation keine präzise Identifikation spezifischer Regionen ermöglicht, erweist sich für Bayern die Notwendigkeit einer differenzierteren Analyse als evident.

Als potenzielle Lösung für diese Problematik könnten die vom Bayerischen Landesamt für Umwelt im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements entwickelten Kartierungen herangezogen werden. Diese spezifischen Kartierungen für die Einzugsgebiete von Donau, Rhein und Elbe bieten eine detaillierte Darstellung der Hochwassergefährdung, der potenziell betroffenen Landnutzungen sowie historischer Hochwasserereignisse, wodurch eine präzisere regionale Risikoeinschätzung ermöglicht wird (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2023). Die ursprünglich im ETRS89-Koordinatensystem vorliegenden Daten werden für die Analyse in das EPSG:3035-System konvertiert. Diese Transformation ermöglicht eine präzise Integration und Darstellung aller Datensätze auf einer einheitlichen Karte Bayerns. Eine abschließende Abbildung 6 präsentiert einen umfassenden Überblick über die potenziell von Hochwasser betroffenen Gebiete in Bayern, wodurch die räumliche Verteilung des Risikos verdeutlicht wird.

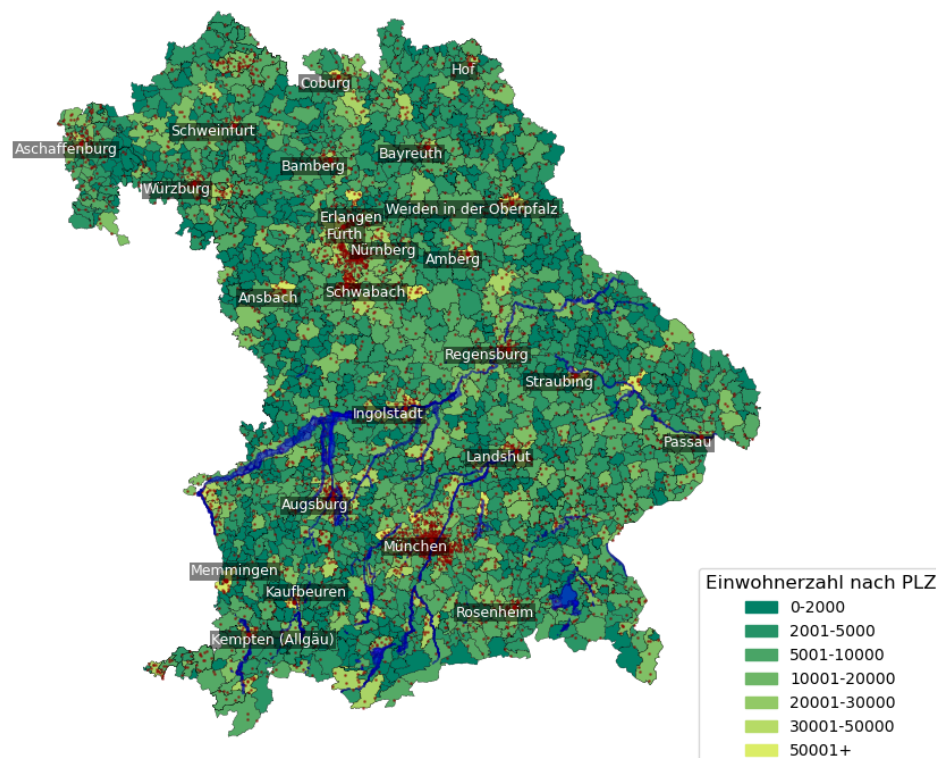


Abbildung 6: Visualisierung historischer Hochwasserereignisgebiete und Verteilung des Darlehensportfolios in Bayern. Quelle: Eigene Darstellung

### 3.2.3 Überflutungstiefen

Die Schäden durch Überschwemmungen hängen von der Wassertiefe ab. Tieferes Wasser verursacht meist größere und teurere Schäden an Häusern. Für die Analyse der Überflutungstiefe in Bayern benötigt man Überflutungstiefen-Geodaten. Digitales Geländemodell (**DGM**) Modell beschreibt die Höhe des Bodens, wobei eine hohe Auflösung genaue Ergebnisse liefert (Vermessungsverwaltung, 2019). Hochwasserstände aus Messungen sind wichtig für präzise Berechnungen. Dafür wurden Daten vom Bayern (2016) für aktuelle Pegelstände betrachtet. Historische Hochwasserdaten helfen bei Einschätzungen künftiger Ereignisse und sind in Berichten und Karten enthalten. Diese wurden vom Bayerisches Landesamt für Umwelt (2023) bezogen, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

## Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2019). *Hochwasserrisikomanagement*. Infoblatt, S. 16.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2023). *UmweltAtlas Bayern: Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten*. Kartendienst. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Bayern, H. (2016). *Hochwassernachrichtendienst Bayern*.
- Cochran, W. G. (1953). *Sampling Techniques*. 1st. New York: John Wiley & Sons, S. 50–51.
- Europäische Zentralbank (Mai 2020). *Entwurf eines Leitfadens zu klima- und umweltbezogenen Risiken*, S. 10.
- European Central Bank (Juli 2022). *2022 Climate Risk Stress Test*. Report. European Central Bank.
- Gebäudeenergiegesetz (13. Aug. 2020). *Gebäudeenergiegesetz: Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze*. Bd. 2020. Bundesgesetzblatt Teil I, S. 1728–1794.
- Wasserhaushaltsgesetz (31. Juli 2009). *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts*. Wasserhaushaltsgesetz - WHG. Version Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 18.08.2021. Berlin.
- Green Vision Solutions (7. Sep. 2023). *Transitorische Risiken / Übergangsrisiken allgemein betrachtet*.
- Münchener Hypothekenbank eG (2023). *MünchenerHyp Geschäftsbericht 2023*. Techn. Ber.
- Network for Greening the Financial System (Juni 2021). *NGFS Klimaszenarien für Zentralbanken und Aufsichtsbehörden - Phase 2*. Technischer Bericht. Paris: Network for Greening the Financial System.
- Schellekens, G. und Toor, J. van (2019). *Values at Risk? Sustainability risks and goals in the Dutch financial sector*.
- Statistisches Bundesamt (2023). *Bevölkerung und Demografie - Bevölkerungsstand*.
- United Nations Environment Programme Finance Initiative (2023). *Real Estate Sector Risks Briefing*, S. 10.
- United States Water Resources Council (1981). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Washington, D.C.: United States Water Resources Council.
- Vermessungsverwaltung, B. (2019). *Geländemodell*.
- Beleihungswertermittlungsverordnung* (12. Mai 2006). *Verordnung über die Ermittlung der Beleihungswerte von Grundstücken nach § 16 Abs. 1 und 2 des Pfandbriefgesetzes*.
- www.suche-postleitzahl.org (2023). *Suche Postleitzahl - Deutsche Postleitzahlenkarte und Gemeinden*.
- Zurek, M. (2022). „Real estate markets and lending: does local growth fuel risk?“ In: *Journal of Financial Services Research* 62.1, S. 27–59.

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen verwendet habe.

München, den 5. September 2024

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'Z' followed by a horizontal line and a small upward stroke.