

Simulationstechnik - Abschlussbericht

Bearbeitet von:

Adrian Paschkowski 108 018 213 531

Celina Poltermann 108 018 241 655

Studiengang Angewandte Informatik

1 Einleitung

Straßen gehören zu den Grundbausteinen der Infrastruktur eines Landes. Sie ermöglichen den Transport verschiedenster Waren und Güter und sind ein wichtiger Teil des Soziallebens. Ebenfalls ermöglichen sie uns eine schnelle Übermittlung von Informationen und den Zugang zu grundlegenden Dienstleistungen. Doch auch Straßen haben einen Verschleiß, beispielsweise durch den Verkehr oder auch verschiedenen Witterungsbedingungen. Eine schlechte Qualität der Straßen in einer Stadt kann sich erheblich auf die Wirtschaftlichkeit als auch auf die Lebensqualität auswirken, weshalb es umso wichtiger ist, sie regelmäßig zu erhalten.

Dieser Sachverhalt soll in einem diskreten zeitgesteuerten Simulationsmodell nachgestellt und auf die Lebensdauer der Straßen sowie angenommene Kosten hin analysiert werden. Dazu wird eine konkrete Fragestellung gebildet, auf deren Beantwortung das Modell hinwirken soll. Nach Erstellung des Konzepts und Recherche hinsichtlich Straßenaufbau, Zerfall und Wartung sowie relevanter Kenngrößen in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 das konkrete Simulationsmodell aufgestellt und etwaige Modellannahmen erläutert. Daraus gewonnene Erkenntnisse werden in Kapitel 3 beleuchtet und anschließend in Kapitel 4 hinsichtlich ihrer allgemeinen Aussagekraft sowie dem Hintergrund der getroffenen Modellannahmen kritisch hinterfragt.

Besonderes Augenmerk soll in der Simulation auf den Zustand der betrachteten Straßen über lange Zeiträume gelegt werden, sowie auf die durch die Instandhaltung freigesetzten und verbrauchten Materialmengen und verbundene Kosten. Bisher existieren unseres Wissens nach noch keine vergleichbaren Simulationsmodelle, die diese Daten visuell aufbereiten und interaktiv darstellen.

1.1 Straßenaufbau

Im Allgemeinen besteht eine Straße aus fünf unterschiedlichen Schichten: Die Frostschuttschicht, die Schottertragschicht, die Tragschicht, die Binderschicht und die Deckschicht. Der Einfachheit halber wurden die Schottertrag- und Frostschuttschicht im Rahmen dieser Simulation zu einer einzelnen Schottertragschicht zusammengefasst. Sie besteht meist aus ungebundenen Kiesel, Sand, Schotter oder Splitt und dient der Vermeidung von Schäden durch Frost. Außerdem ist sie äußerst Klimabeständig und leitet eindringendes Wasser zügig ab. Die Tragschicht besteht in der Regel aus einer grobkörnigen Gesteinsmischung und sichert damit eine gleichmäßige Verteilung des Gewichts, ist somit also verantwortlich für die Tragfähigkeit der Fahrbahn. Über der Tragschicht liegt die Binderschicht, dessen Kernaufgabe es ist, Schubkräfte und Erschütterungen von der Oberfläche schnell und effektiv in die untere Schicht abzuleiten. Die Deckschicht ist die oberste Schicht und besteht aus einem feinkörnigen Material. Zum einen soll die Deckschicht eine dauerhaft verkehrssichere und gut befahrbare Oberfläche darstellen und zum anderen soll sie als Dichtungsschicht fungieren, um die unteren Schichten vor Verkehr und Witterung zu schützen [4].

Die im Kontext dieses Simulationsmodells genutzten Straßentypen sowie deren genauer Aufbau kann Tabelle 1 entnommen werden. Die dort eingezeichneten zum Bau der einzelnen Schichten benötigten Materialien werden teils neu hergestellt, teils werden aber auch die alten Beläge recycled und den neuen Belägen zu 40 % beigemischt. Dieser wiederverwendete Asphaltbelag wird auch RAP (Reclaimed Asphalt Pavements) genannt [6]. Die Materialkosten, welche bei der Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme entstehen, hängen von den dabei behandelten Schichten und deren Dicke bzw. Gewicht ab. Eine Übersicht über die Materialkosten, die in diesem Simulationsmodell verwendet werden, ist in Tabelle 2 gegeben. Diese basieren auf der aktuellen Preisliste eines Asphaltherstellers [1].

1.2 Instandhaltungsmaßnahmen

Die Erhaltung von Straßen kann grob in drei Phasen unterteilt werden: Wartung (*Maintenance*), Sanierung (*Rehabilitation*) und Wiederaufbau (*Reconstruction*). Unter der Wartung einer Straße ist hier die Erneuerung der Deckschicht zu verstehen. Baumaßnahmen, bei denen die ersten beiden Schichten (Deckschicht und Binderschicht) erneuert werden, gehören zur Sanierung einer Straße. Sobald alle Schichten erneuert werden müssen, wird vom Wiederaufbau der Straße gesprochen [6]. Wann genau eine jeweilige Maßnahme durchgeführt werden muss, ist abhängig vom Straßentyp, wie in Tabelle 3 sichtbar. Beispielsweise muss eine Hauptstraße doppelt so oft wieder neu aufgebaut werden wie eine Wohnstraße. Auch das Material, welches für die Deckschicht der Straße verwendet wird, beeinflusst die Lebensdauer. Wie in Tabelle 4 zu erkennen, hat Splittmastixasphalt (SMA) im Normalfall eine höhere Lebensdauer als Asphaltbeton (AC).

Tabelle 1: Aufbau und Zusammensetzung der verschiedenen Straßentypen, aus [6]. Bei Wohnstraßen werden solche der Belastungsklasse 0,3 betrachtet, da diese laut [6] auf Dauer günstiger aufrechtzuerhalten sind.

| Straßentyp | Schicht | Material | Dicke (cm) |
|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| Hauptstraße | Deckschicht | SMA 8 S | 3 |
| | Binderschicht | AC 22 BS | 8 |
| | Asphalttragschicht | AC 32 TS | 14 |
| | Schottertragschicht | Schotter | 45 |
| Zufahrtsstraße | Deckschicht | SMA 8 S | 3 |
| | Binderschicht | AC 16 BS | 5 |
| | Asphalttragschicht | AC 22 TS | 10 |
| | Schottertragschicht | Schotter | 45 |
| Wohnstraße | Deckschicht | AC 8 DN | 3 |
| | Asphalttragschicht | AC 22 TN | 8 |
| | Schottertragschicht | Schotter | 39 |

1.3 Fragestellung

Die Erstellung dieses Simulationsmodells und der Durchlauf von Experimenten soll eine konkrete Fragestellung beantworten: "Welchen Einfluss hat die Verkehrsstärke und das verbaute Material auf den Zustand der Straßen und welche Massen werden dadurch verbraucht?". Dies dient dem Zweck, das Zusammenspiel von Straßentyp und Verkehrsstärke zu analysieren und insbesondere die Entwicklung der Straßenzustände dabei visuell aufzubereiten. Die verwendete Simulation soll dem Nutzer die Möglichkeit bieten, mittels der Änderung einzelner Faktoren wie z. B. der Verkehrslast oder den verbauten Materialien neue Zustandsverläufe zu simulieren. Das Modell soll möglichst viele Daten aus realen Messungen als Grundlage verwenden, um Statistiken mit Realitätsbezug zu erzeugen.

Tabelle 2: Materialkosten der verwendeten Materialien pro Tonne. Aus [1].

| Material | Kosten in €/Tonne |
|-----------------|------------------------------|
| SMA 8 S | 113,00 |
| AC 8 DN | 99,00 |
| AC 22 BS | 77,50 |
| AC 16 BS | 78,50 |
| AC 32 TS | 60,50 |
| AC 22 TS | 62,50 |
| Schotter | 25,00 |

Tabelle 3: Die verwendete Instandhaltungsstrategie verschiedener Straßentypen, entommen aus [6]. Es wurden die Zeitintervalle gewählt, die laut den Ergebnissen von [6] die insgesamt beste Strategie mit den geringsten Kosten repräsentieren.

| Straßentyp | Jahre bis | | |
|-------------------|------------------|------------------|---------------------|
| | Wartung | Sanierung | Wiederaufbau |
| Hauptstraße | 15 | 30 | 40 |
| Zufahrtsstraße | 20 | 35 | 50 |
| Wohnstraße | 40 | 60 | 80 |

Tabelle 4: Angenommene Lebensdauer der verschiedenen Oberflächenmaterialien, im Format Minimum..Duchschnitt..Maximum.

| Material | Lebensdauer (Jahre) |
|-----------------|----------------------------|
| SMA | 14..20..25 [7] |
| AC | 8..14..18 [7] |

2 Methodik

Als Untersuchungsbereich dient ein Ausschnitt der Berliner Innenstadt, welcher in der Simulation nachmodelliert ist. Von allen vorhandenen Straßen in diesem Bereich werden allerdings nur die Hauptstraßen betrachtet, da die Stadt Berlin nur zu solchen Statistiken über die Verkehrslast bereitstellt [8]. Ebenfalls sind viele Daten zu u. A. Verschleiß und Haltbarkeit nur für stärker befahrene, ergo für Hauptstraßen verfügbar. Dennoch gibt es auch bei den Hauptstraßen Unterschiede in der Stärke der Belastung. So kann experimentell davon ausgegangen werden, dass die schwächer befahrenen Straßen annäherungsweise Wohnstraßen entsprechen.

Die Straßen werden im Weiteren in homogene Abschnitte eingeteilt. Ein homogener Abschnitt beschreibt einen Straßenabschnitt, in dem durchgängig das gleiche Schadensbild vorliegt [5]. Jeder homogene Abschnitt hat einen Zustandswert, auf welchem der Kernfokus dieses Modells liegt, und verläuft im Modell zwischen zwei Hauptkreuzungen. Ein Abschnitt verläuft dabei bis zum Anfang einer Kreuzung, sodass sich keine zwei Abschnitte überlappen. Die Längen der Straßenabschnitte, die zur Berechnung der Materialmengen notwendig sind, sind mittels dem Längen-Messtool auf Google Maps gemessen worden. Ebenfalls wurde damit auch die Breite an mehreren Stellen eines homogenen Abschnitts gemessen. Bei variierender Breite innerhalb eines Abschnittes wurde der gewichtete Durchschnitt angesetzt.

Basierend auf den Daten der Verkehrsinformationszentrale Berlins [8] sind die homogenen Abschnitte einer der drei Verkehrsstärken "Stark", "Mittel" und "Niedrig" zugewiesen. Eine niedrige Verkehrsstärke entspricht dabei unter 10.000 Fahrzeugen pro Tag, eine starke Befahrung über 25.000 Fahrzeuge pro Tag. Darauf basierend wird der Straßentyp festgelegt. Stark befahrene Straßen dienen im Modell als Hauptstraßen, mittel befahrene als Zufahrtsstraßen, und niedrig befahrene als Wohnstraßen. Diese Einteilung basierend auf der Verkehrsstärke entspricht der Einteilung der Typen in Belastungsklassen aus [6].

Der Zustand eines Straßenabschnitts wird in der Simulation in Prozent angegeben. Zu Anfang der Simulation wird dieser zufällig zwischen 100 % und 50 % festgelegt. Ebenfalls wird die als nächstes anstehende Baumaßnahme zufällig gewählt und die verbleibene Zeitspanne bis zu dieser mit einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 skaliert. Das Modell hat eine diskrete Auflösung von einem Tag, d. h. die Zustandswerte werden einmal pro virtuellem Tag aktualisiert.

2.1 Modellannahmen

Da der Zerfall von Straßen im Allgemeinen ein hochkomplexes Thema ist und aus vielen verschiedenen Faktoren zusammengesetzt ist [3], geht die Simulation vereinfacht von einem linearen Zerfall aus. Dennoch entstammen die finalen Lebensdauern, die das Modell nutzt, einer Zufallsverteilung, deren Parameter von der verwendeten Deckschicht abhängen.

gen. Die verwendeten Werte für die Lebensdauern der Straßenbeläge lassen sich Tabelle 4 entnehmen. Da nur die Minimal-, Maximal- sowie ein Durchschnittswert vorhanden sind, eignet sich eine Dreiecksverteilung. Außerdem wird so realistischer simuliert, dass der Zerfall nicht zu jedem Zeitpunkt gleich ist, sondern gewissen zufälligen Schwankungen unterliegt.

Weiterhin ist der Zerfall abhängig von der Belastung der Straße; bei niedriger Belastung ist der Zerfall geringer. Für Abschnitte mit hoher Verkehrsstärke gelten die Lebensdauern aus Tabelle 4. Bei einem Abschnitt mit mittlerer Auslastung wird der Zerfall um 20 % gemindert und bei einem Abschnitt mit niedriger Auslastung um 60 %. Diese Faktoren entsprechen der Vergrößerung der Zeitintervalle der Instandhaltungsstrategien für Haupt- und Zufahrts- bzw. Haupt- und Wohnstraßen aus Tabelle 3.

Nach Erreichen der Lebensdauer des Belags ist die Straße nicht sofort zerstört. Stattdessen wird angenommen, dass die Straße nach Ablauf der Lebensdauer einen Zustand von 50 % hat, sodass baldige Reparaturen empfohlen werden. Erst nach der doppelten Lebensdauer gilt die Straße mit 0 % Zustand als zerstört.

Nach Ablauf der Zeitintervalle aus Tabelle 3 wird für einen Straßenabschnitt die entsprechende Baumaßnahme gestartet, welche nach Abschluss den Zustand der Straße verbessert. Bei einem Wiederaufbau der Straße wird der Zustandwert auf 100 % zurückgesetzt, da nach Ende dieser Maßnahme eine brandneue Straße im besten Zustand steht. Für die relative Zustandsverbesserung nach Wartung und Sanierung können keine konkreten Werte bestimmt werden [3], sodass hier von einer Verbesserung von 20 % für Wartung bzw. 30 % für Sanierung ausgegangen wird. Diese Werte sorgen dafür, dass der Zustand der Straßen sich immer innerhalb des erwarteten Wertebereichs befindet und nicht unerwartet stark steigt oder fällt. Bei der Ausführungsdauer einer Maßnahme wird von 2 Wochen bei Wartung, 4 Wochen für Sanierung und 8 Wochen für Wiederaufbau ausgegangen. Diese Werte dienen primär der visuellen Darstellung und haben keinen großen Einfluss auf das Modellverhalten. Während einer aktiven Baumaßnahme wird der Zerfall der Straße pausiert.

Die Kosten pro Tonne für jedes verwendete Material wurden bereits in Abschnitt 1.1 vorgestellt. Dieses Simulationsmodell arbeitet allerdings mit Volumen in m^3 . Um das Volumen in eine Masse zwecks Preisberechnung umzuwandeln, wird der Umrechnungsfaktor $1 m^3 = 1,8 t$ verwendet, welcher die durchschnittliche Dichte von Asphalt einbezieht [2].

Weiterhin wurden experimentell die durch die Baumaßnahmen entstehenden Gesamtkosten betrachtet, wie in Tabelle 5 zu sehen. Diese entstammen der Stadt Münster [6] und unterscheiden sich je nach Baumaßnahme. Die Werte beziehen sich auf einen Kilometer einer sieben Meter breiten Straße und werden im Modell entsprechend der tatsächlichen Länge und Breite des homogenen Abschnitts skaliert.

Tabelle 5: Pauschale Instandhaltungskosten (in Euro) eines sieben Meter breiten und einen Kilometer langen Straßenstücks. Aus [6].

| Straßentyp | Wartung | Sanierung | Wiederaufbau |
|----------------|---------|-----------|--------------|
| Hauptstraße | 191.940 | 243.124 | 844.536 |
| Zufahrtsstraße | 177.975 | 291.879 | 711.900 |
| Wohnstraße | 77.000 | 126.280 | 308.000 |

2.2 Implementation

Der gegebene Sachverhalt ist in der Simulationssoftware AnyLogic [9] implementiert. Im Hintergrund liegt dabei ein Screenshot einer Karte des betrachteten Berliner Straßenausschnitts. Auf dieser Karte sind händisch die Straßenzüge der Hauptstraßen bzw. der gewählten homogenen Abschnitte mit Elementen aus der Präsentationsbibliothek eingezeichnet. Gerade Abschnitte können mit Rechtecken approximiert werden, während komplexere Formen mittels geschlossener Polylines nachgestellt sind. Diese Rechtecke und Polylines bilden ein Overlay, welches der Visualisierung des Zustandes des jeweiligen Abschnitts dient. Ein "guter" Zustand (100%) ist dabei in grün dargestellt, ein "mittelmäßiger" Zustand (50%) in gelb, ein "schlechter" Zustand (10%) in rot und ein "zerstörter" Zustand (0%) in dunkelrot. Zwischen diesen Schwellwerten werden gewichtete Mischungen der Farben verwendet, um einen zeitlichen Farbverlauf zu erzeugen.

Die beschriebene Visualisierung ist in Abbildung 1 gezeigt. Ebenfalls dort sichtbar ist ein Popup, das erscheint, wenn der Nutzer einen Straßenabschnitt auswählt. Dieses Popup zeigt die stets aktuellen Daten zu diesem Abschnitt. Dazu gehören der Name, der Typ, die Verkehrsstärke, der aktuelle sowie durchschnittliche Zustand, und die derzeitige oder zukünftige Baumaßnahme.

Jeder homogene Abschnitt ist durch die Instanz eines unsichtbaren **Street**-Agenten repräsentiert, welcher wiederum alle Daten zu diesem Abschnitt, wie z. B. den aktuellen Zustand, enkapsuliert und verwaltet. Die Gründe für diese Wahl sind in Kapitel 4 aufgeführt. Der Agent heißt **Street** statt **Road**, da letzteres bereits eine in AnyLogic integrierte Klasse ist. Als Parameter erhält der Agent eine Referenz zu dem Rechteck bzw. der Polyline, die ihn visuell repräsentiert, sowie den Namen des Abschnitts, die dortige Verkehrsstärke, den Typ der Straße, sowie die Länge und Breite des Abschnitts in Metern.

2.2.1 Statechart

Über den Button im Popup aus Abbildung 1 kann der Nutzer die Detailansicht des jeweiligen Straßen-Agenten öffnen. Diese ist in Abbildung 2 sichtbar. In der Detailansicht

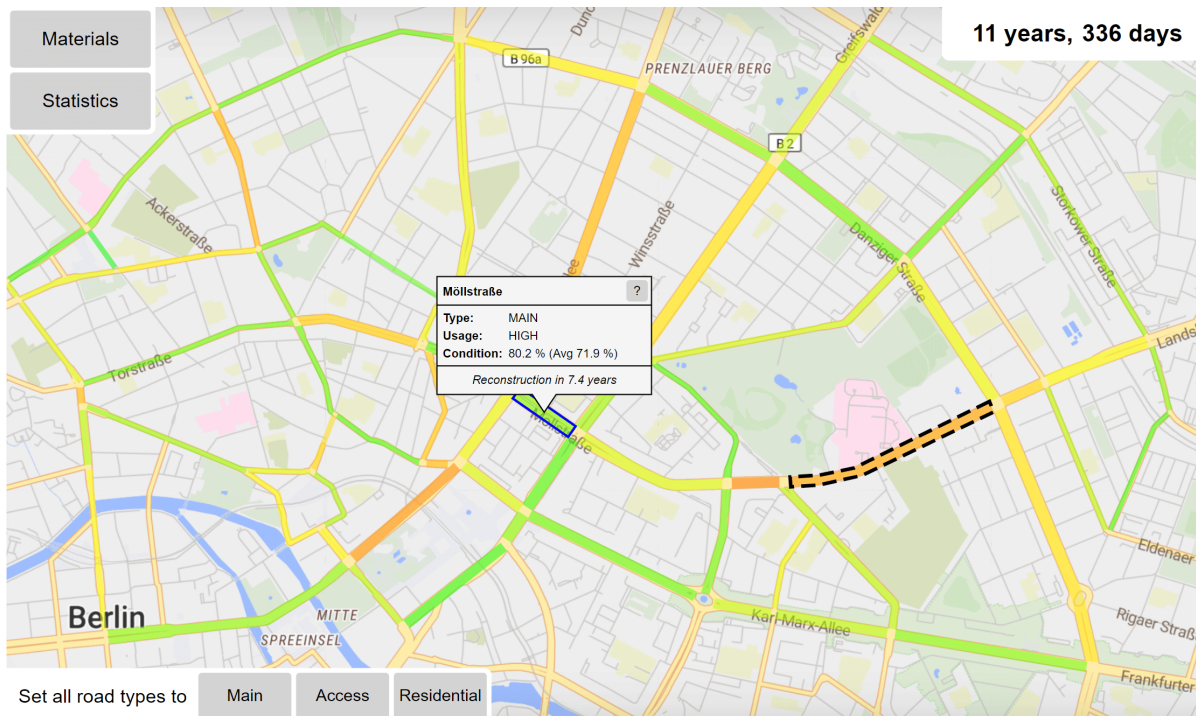


Abbildung 1: Screenshot der Hauptansicht des implementierten Simulationsmodells. Jeder homogene Abschnitt einer Hauptstraße hat einen Zustand, welcher durch ein farbiges Overlay repräsentiert ist. Die Details zu einem der Abschnitte sind sichtbar. Die schwarz umrandete Straße rechts daneben befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einer Bauphase.

kann der Nutzer alle Eingabeparameter sowie den derzeitigen Zustand des Straßenabschnitts sehen. Dazu gehört eine grafische Aufbereitung des Zustands über die Zeit sowie das Statechart, welches die Baumaßnahmen des Abschnitts steuert. Der Großteil der Zeit wird dabei im Idle-State verbracht. Die Wartezeit sowie der nächste Zustand werden über die nebenliegenden Variablen gesteuert, welche wiederum durch Funktionen wie `setNextRoadworkAction` befüllt werden. Je nach anstehender Baumaßnahme unterscheiden sich die Wartezeiten, welche in einer AnyLogic-Datenbank gespeichert sind.

2.2.2 System Dynamics

Bei einer laufenden Baumaßnahme berechnet jeder Straßen-Agent die dabei anfallenden Massen (in m^3) in Abhängigkeit von der Größe des Straßenabschnitts sowie der Schichten, die bei dieser Maßnahme erneuert werden. Die Berechneten Werte werden den Parametern des System Dynamics-Diagramm im Main-Agenten zugespielt, welches in Abbildung 3 zu sehen ist. Dieses sammelt die Massen sowie die Kosten, die bei den Baumaßnahmen aller Straßenabschnitte anfallen. Der Materialverbrauch ist in zwei Kreisläufe unterteilt: Einen für Oberflächenmaterial, und einen für Binde- und Tragschichten.

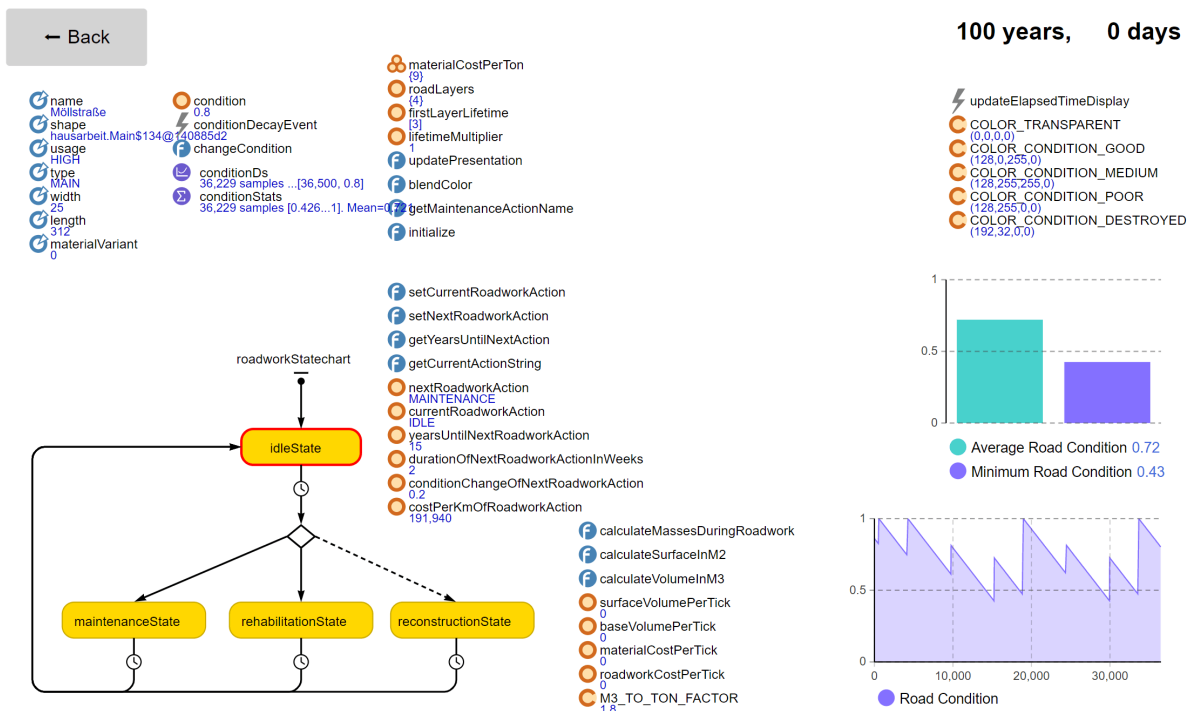


Abbildung 2: Screenshot der Detailansicht eines einzelnen Straßen-Agenten. Sichtbar sind oben links die Eingabeparameter dieser Straße sowie der aktuelle Zustand als Variable, welcher unten rechts im zeitlichen Verlauf gezeigt wird. Unten links liegt das Statechart, welches zusammen mit den anliegenden Variablen und Funktionen die Baumaßnahmen auf dem jeweiligen Straßenabschnitt steuert.

Bei einer laufenden Baumaßnahme wird der Verbrauch von Material für Deck- und Tragschicht sowie die entstehenden Kosten der Straßenlänge entsprechend angepasst. Zu Beginn der Baumaßnahme werden dazu die durch den Straßen-Agenten errechneten Werte für Oberflächen- und Deckschichtverbrauch sowie Kosten auf die entsprechenden Parameter addiert und am Ende wieder abgezogen, sodass während der Baumaßnahme durchgängig Material verbraucht wird. Jedes neu verbaute Deckschichtmaterial wird zugekauft. Gegebenenfalls abgetragenes Material aus alten Deckschichten wird zwischengelagert und dem Material für neue Trageschichten aus RAP zu 40 % zugemischt, falls auf Lager, während nur die restlichen 60 % (oder mehr, falls kein Recyclingmaterial mehr auf Lager ist) zugekauft werden.

Es ist anzumerken, dass die Eingänge der Flows mit Stocks versehen wurden, deren Wert beim Durchlauf der Simulation stetig negativer wird. Diese Stocks dienen der einfachen Veranschaulichung des entsprechenden Gesamtwertes und sind "gedanklich" als positiv zu betrachten.

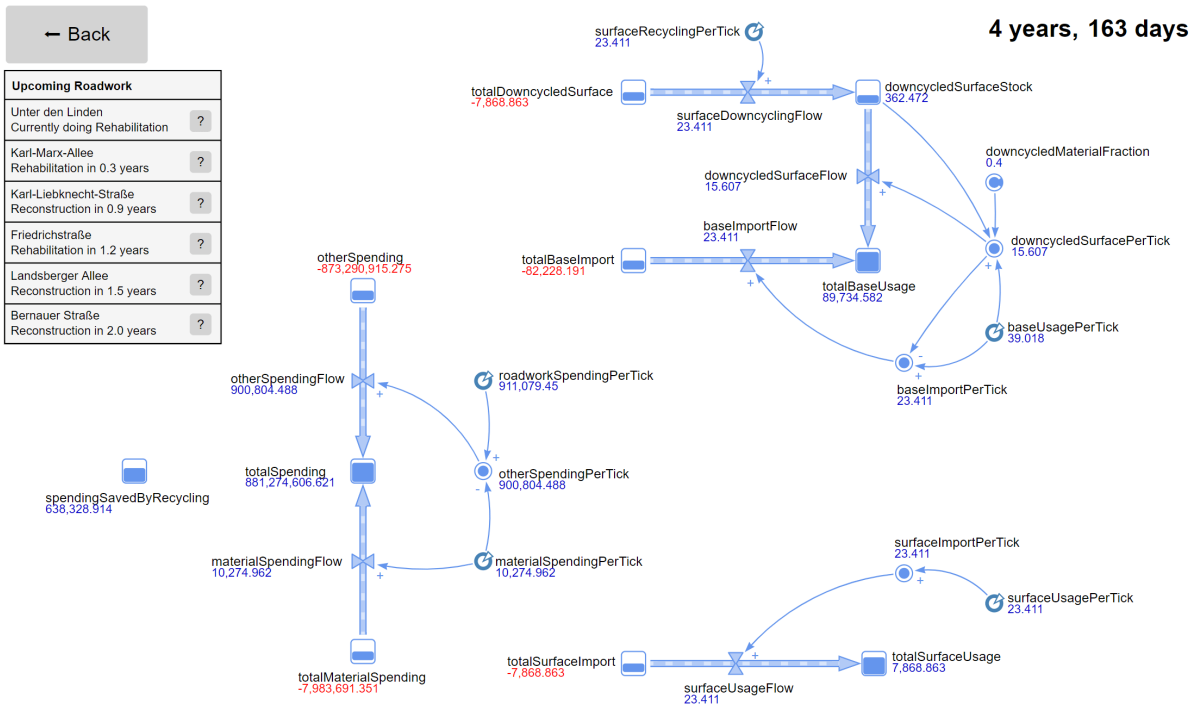


Abbildung 3: Screenshot des System Dynamics-Diagramms. Die Parameter des Modells werden von den einzelnen Straßen-Agenten für die Länge ihrer Baumaßnahme entsprechend angepasst. Ebenfalls sichtbar ist eine Liste an aktuellen sowie bevorstehenden Straßenbauarbeiten im Simulationsmodell.

Das System Dynamics-Modell beinhaltet ebenfalls eine grundlegende Kostenrechnung. Jeder Straßen-Agent berechnet die durch seine aktuelle Baumaßnahme entstehenden Kosten dynamisch basierend auf den dabei erneuerten Schichten, deren Volumen sowie den Preisen der jeweiligen Materialien, wie in Abschnitt 1.1 und 2.1 erläutert. Diese berechneten Kosten sowie die pauschalen Gesamtkosten für den Bau, welche auf der Größe des Straßenabschnitts basieren, werden den entsprechenden Parametern auf der linken Seite zugeführt. Diesen Gesamtkosten werden noch die Materialkosten abgezogen, um die sonstigen anfallenden Kosten darzustellen, wie für z. B. Arbeit und Maschinen. Ein Stock auf der linken Seite gibt die Materialkosten an, die durch die Verwendung von RAP gespart werden. Aufgrund der Modellarchitektur ließ sich dieser leider nicht auf normalen Weg in das System Dynamics-Diagramm integrieren, sondern wird extern aktualisiert.

2.2.3 Verifikation und Validierung

Das entwickelte Simulationsmodell ist mit mehreren Methoden aus dem Bereich der Verifikation und Validierung so gut wie möglich auf Korrektheit und Plausibilität der Er-

gebnisse geprüft worden. Allen Elementen des System Dynamics-Modells sind Einheiten zugewiesen und die Korrektheit der Verknüpfungen mittels der in AnyLogic eingebauten Funktion einem Dimensionstest unterzogen worden¹. Zusätzlich haben Grenzwerttests validiert, dass Stocks (die nicht einen Gesamtwert repräsentieren) niemals negative Werte annehmen. So kann der Lagerbestand an recycelter Deckschicht niemals negativ sein. Weiterhin wurde kontrolliert, dass die Summe der Eingabemengen der Flows gleich die Summe der Ausgabewerte bzw. Lagerbestände ist, es gehen also keine Mengen verloren und es kommt nichts unerwartetes dazu. Es wurde auch darauf geachtet, das Modell so zu implementieren, dass es wiederholbare Ergebnisse liefert².

Der Zustand eines individuellen Straßenabschnitts sowie vom gesamten Durchschnitt werden in der Simulation grafisch dargestellt. Mittels Monitoring wurde geprüft, dass die Zustandswerte sich nicht unvorhergesehen verhalten, sondern dem erwarteten Verlauf folgen, d. h. der einzelne Zustand wird in Abhängigkeit der Verkehrslast stetig schlechter und nur durch den Abschluss einer Baumaßnahme verbessert, während der Gesamtdurchschnitt sich schnell um einen bestimmten Wert herum einpendelt und wenig davon abweicht. Unter Abwesenheit von Instandhaltungsmaßnahmen fällt der Zustand der Straßenabschnitte innerhalb der erwarteten Lebensdauer auf 50 % bzw. nach doppelter Zeit auf 0 % (siehe Abschnitt 2.1). Dabei führt eine Halbierung bzw. Verdoppelung der erwarteten Lebensdauer einer Straße (also entsprechende Anpassung der Zerfallrate) ebenfalls dazu, dass das Eintreten des Zerstörungszustands doppelt bzw. halb so lange dauert (mit nur leichten Abweichungen, verursacht durch die verwendete Zufallsverteilung). Der durchschnittliche Zustand aller Straßen verschiebt sich entsprechend. Die Zustandssimulation spiegelt also das in der Realität erwartete Verhalten wieder.

Ebenfalls haben Festwerttests gezeigt, dass die Berechnung der Kosten- und Materialmengen stimmig ist. Bei Einprogrammierung von 0€ Kosten für jedes Material z. B. entstehen keine Materialkosten mehr und diese werden dementsprechend auch nicht mehr von den sonstigen Kosten abgezogen. Auch bei Annahme von 0 cm Dicke für jede Straßenschicht entstehen keine Materialkosten mehr, da keinerlei Material mehr verbraucht (und recycled) wird. Schließlich führt eine Verdoppelung bzw. Halbierung der Schichtdicken oder Materialeinzelkosten auch zu einer Verdoppelung bzw. Halbierung der gesamten Materialkosten über den gleichen Zeitraum.

Da es sich bei dieser Simulation, wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, um eine recht neue Modellart handelt und es sowohl kaum vergleichbare Simulationen als auch wenige Datengrundlagen gibt, mit denen die Ergebnisse dieses Modells verglichen werden könnten, können wir leider keine vergleichenden Validierungsmethoden wie z. B. Test der internen Validität verwenden, um unsere Ergebnisse mit realen Zustandswerten über einen langen Zeitraum zu vergleichen.

¹<https://anylogic.help/anylogic/system-dynamics/units.html>

²<https://anylogic.help/anylogic/stochastic/reproducible.html>

3 Ergebnisse

Nach Erstellung und Validierung des Simulationsmodells kann es zur Durchführung der ersten Experimente genutzt werden. Die typische Entwicklung der Straßenzustände ist in Abbildung 4 gezeigt. Sichtbar ist ein Ausschnitt der letzten 100 Jahre, der einen guten Überblick über die zu erwartenden durchschnittlichen Zustandswerte zu jedem Zeitpunkt gibt. Der durchschnittliche Zustand aller Straßenabschnitte pendelt sich dort um ca. 60 bis 70 % ein. Die Schwankungen sind sowohl durch die regelmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen als auch durch die für den Zerfall genutzte Dreiecksverteilung (siehe Abschnitt 2.1) zu erklären. Hauptstraßen liegen tendenziell über dem Durchschnitt, zwischen 65 und 75 %. Zufahrtsstraßen folgen diesem Trend. Allerdings fallen Wohnstraßen deutlich aus dem Durchschnitt heraus und liegen zwischen 50 und 60 %. Sie besitzen i. A. immer einen schlechteren durchschnittlichen Zustand als Haupt- und Zufahrtsstraßen.

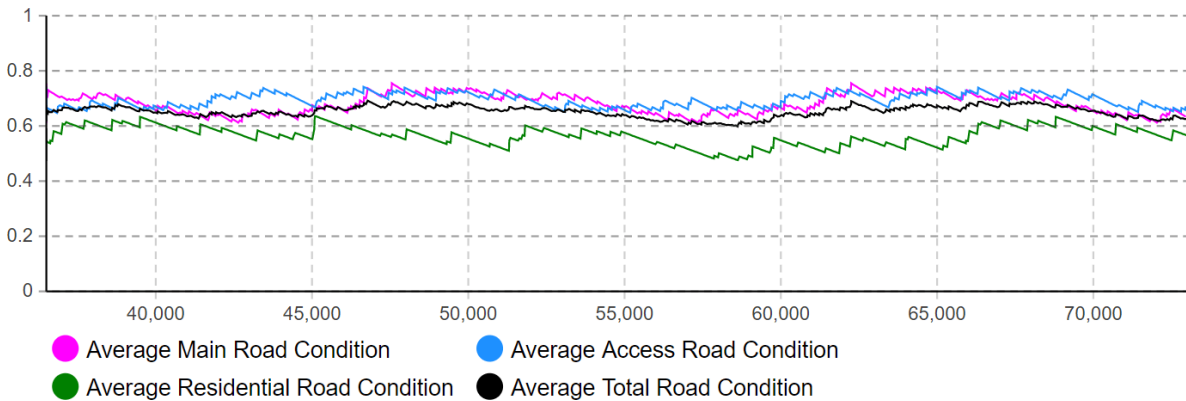


Abbildung 4: Durchschnittlicher Zustand der Straßentypen über einen Zeitraum von 100 Jahren bei normaler Konfiguration.

Weiterhin zeigt Abbildung 5 die globalen Durchschnittswerte über den kompletten Simulationsdurchlauf. Bei normaler Konfiguration haben alle Straßenabschnitte im System einen durchschnittlichen Zustandswert von 66 %. Auch hier liegen Haupt- und Zufahrtsstraßen mit 69 bzw. 70 % über dem globalen Durchschnitt, während Wohnstraßen mit 58 % durchschnittlichem Zustandswert deutlich abfallen. Dies zeigt Parallelen zur realen Welt, in der Wohnstraßen auch häufig einen schlechteren Zustand besitzen als Hauptstraßen und oft von z. B. Schlaglöchern geplagt sind. Die Haupt- und Zufahrtsstraßen hingegen haben häufig einen recht guten Zustand und liegen in der Simulation bei ca. der Hälfte ihrer erwarteten Lebensdauer.

Die Detailansicht der einzelnen Straßenabschnitte zeigt, welchen Einfluss die verschiedenen Straßenbeläge sowie Verkehrsstärken auf den Zustand dieses Abschnitts haben. Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass eine Maßnahme sowohl bei Hauptstraßen als auch bei Zufahrtsstraßen durchschnittlich bei einem Straßenzustand zwischen 43 % bis 61 %

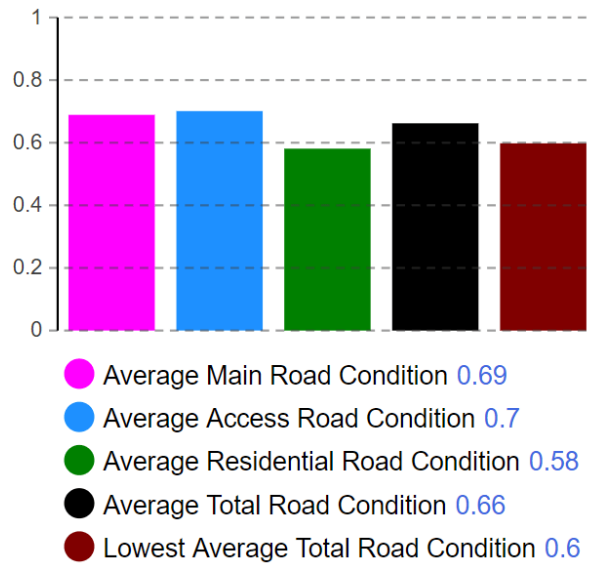


Abbildung 5: Globale Durchschnittswerte für den Straßenzustand aller Straßen in der Simulation, über einen Zeitraum von 100 Jahren bei normaler Konfiguration.

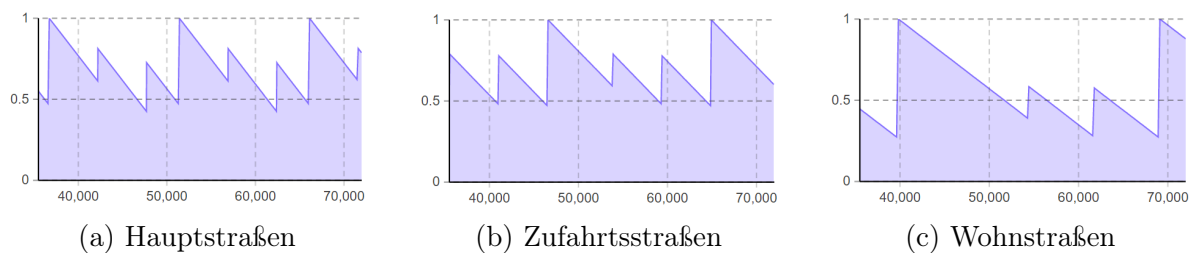


Abbildung 6: Typische Zustandsentwicklung verschiedener Straßentypen über einen Zeitraum von 100 Jahren bei normaler Konfiguration.

durchgeführt wird, bei Wohnstraßen dagegen erst bei einem Straßenzustand von 27% bis 38%. Auch daran ist ersichtlich, dass Wohnstraßen einen allgemein schlechteren Zustandswert besitzen.

Weiterhin wird zu jedem Zeitpunkt gespeichert, wie viele Baumaßnahmen gleichzeitig in der Simulation aktiv sind. Abbildung 7 zeigt, dass in den meisten Fällen nur eine Baumaßnahme gleichzeitig aktiv ist, gelegentlich auch zwei. In seltenen Fällen können drei oder sogar vier Abschnitte gleichzeitig instandgehalten werden, wobei vier extrem selten vorkommt. Im Allgemeinen sind die Zeitpunkte aller Baumaßnahmen recht gleichmäßig über den betrachteten Zeitraum verteilt.

In verschiedenen Experimenten wurde für jeden Straßentyp untersucht, wie sich dessen Zustand bei unterschiedlichen Verkehrsstärken verhält. Dazu wurde zu Anfang der Simulation mit den unten in Abbildung 1 sichtbaren Buttons gewählt, dass alle Straßen-

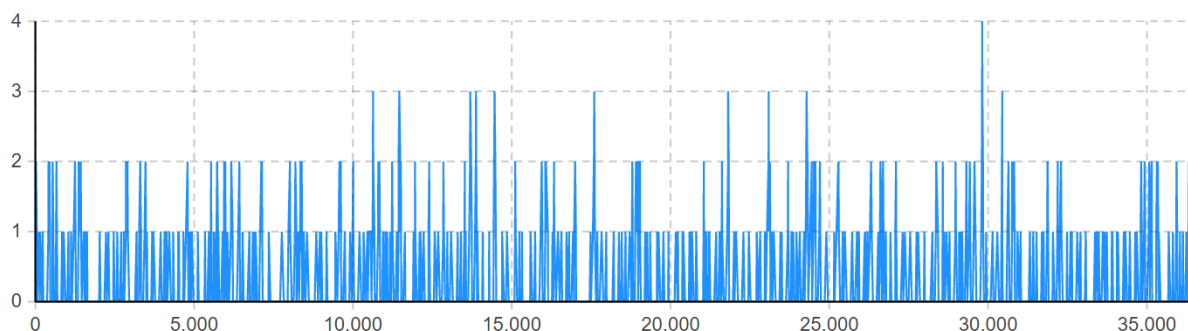


Abbildung 7: Gleichzeitig aktive Instandhaltungsmaßnahmen über einen Zeitraum von 100 Jahren bei normaler Simulationskonfiguration.

abschnitte zu einem bestimmten Typ konvertiert werden, die Verkehrsstärke aber gleich wie vorher bleibt. Mit dem Straßentyp ändert sich auch der Belag bzw. dessen Lebensdauer, die Stärke der Abnutzung sowie die Intervalle der Instandhaltungsmaßnahmen. Die Straßenkonfiguration passt nun ggf. nicht mehr zu der Verkehrsstärke, der sie standhalten soll. Das Ergebnis dieses Experiments ist in Abbildung 8 zu sehen. Wie erwartet haben Hauptstraßen mit einer geringen Verkehrsstärke viel weniger Abnutzung als mit einer hohen Verkehrsstärke. Wohnstraßen hingegen haben mit einer hohen, aber auch schon mit einer mittleren Verkehrsstärke eine mindestens doppelt so hohe Abnutzung. Der Zustand einer durchschnittlichen Straße liegt bei einer hohen Verkehrsstärke bereits nach 13 Jahren unter 50 %, und der Zustandswert einer einzelnen Straße sinkt bei einer so hohen Verkehrslast durchaus auf 0 % ab, bis die nächste Instandhaltungsmaßnahme ihn wieder etwas verbessert. Im Allgemeinen sorgt eine niedrige Verkehrslast dafür, dass der Zustand auf Dauer besser ist.

Die bei den Baumaßnahmen insgesamt verbrauchten Massen und Kosten sind Tabelle 6 zu entnehmen. Schnell ist ersichtlich, dass die Nutzung von Wohnstraßen die größten Kosteneinsparungen im Vergleich zur normalen Konfiguration bringen würde, da diese Straßen hohe Intervalle bei den Instandhaltungsmaßnahmen haben und das wenigste Material benötigen, da sie aus dünneren Schichten gebaut sind. Wie aber bereits in Abbildung 8 gesehen, können diese Straßen einer hohen Verkehrslast nicht standhalten. Es ist dementsprechend nicht empfehlenswert, zwecks Kosteneinsparungen Straßen eines niedrigeren Typs zu verbauen, da diese Straßen schnell die Schwelle zur Unbenutzbarkeit überschreiten würden. Ebenfalls war in Abbildung 8 ersichtlich, dass die durchgängige Verbauung von Hauptstraßen die insgesamt besten Zustandswerte erbringen würde. Allerdings käme dies auch mit mehr als drei mal höheren Kosten im Vergleich zu Wohnstraßen, und immerhin 1,3 mal mehr als zur normalen Konfiguration.

Weiterhin ist auch ersichtlich, dass die Menge an recyceltem Tragschichtmaterial gleich der Menge an Deckschichtmaterial ist. Dies liegt an der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Zumischung von altem Deckschichtmaterial zu neuen Tragschichten. Durch die Nutzung

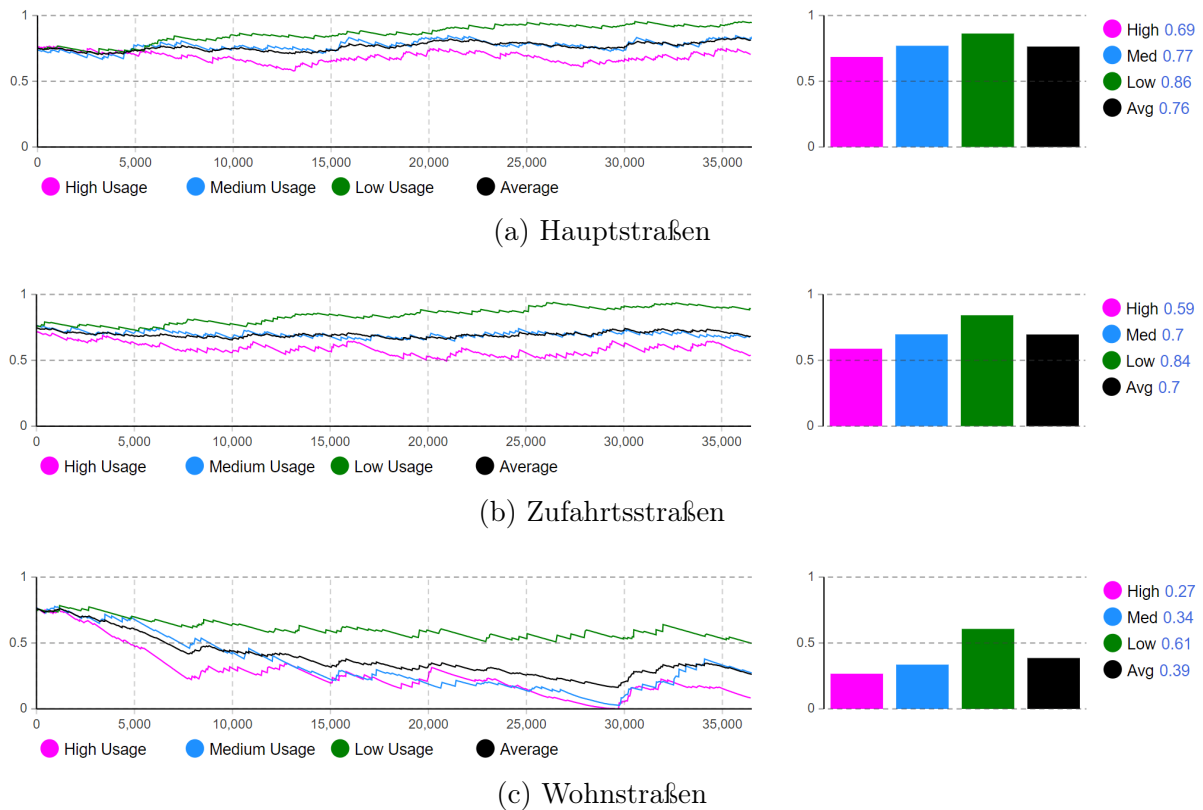


Abbildung 8: Zustandsentwicklung über einen Zeitraum von 100 Jahren bei verschiedenen Verkehrsstärken pro Straßentyp.

von lokalem RAP, soweit verfügbar, statt dem Zukauf neuen Materials, kann durchschnittlich 10 % an Materialkosten gespart werden, bei ausschließlicher Betrachtung von Wohnstraßen sogar 13 %. Dennoch machen die Materialkosten stets einen nur kleinen Teil der gesamten Baukosten aus, welcher auch z. B. Zubehör, Maschinen, und Lohn beinhaltet.

Tabelle 6: In der Simulation verbrauchte Massen (in tausend m^3) und Kosten (in tausend €) nach einer Laufzeit von 100 Jahren. "Gespart" bezieht sich auf die Kosten, die durch Nutzung von Recycling statt Zukauf von neuem Material gespart werden.

| Masse \ Exp. | Normal | Alles Hauptstraßen | Alles Zufahrtsstraßen | Alles Wohnstraßen |
|--------------------|-----------|-----------------------|--------------------------|----------------------|
| Deckschicht | 109 | 129 | 102 | 68 |
| Tragschicht | 885 | 1.159 | 737 | 459 |
| Davon Recycled | 109 | 129 | 102 | 68 |
| Davon Zugekauft | 776 | 1.030 | 635 | 391 |
| Kosten | 9.174.605 | 12.100.000 | 8.103.160 | 3.532.389 |
| Davon Material | 86.568 | 114.452 | 72.447 | 41.459 |
| Davon Sonstige | 9.088.037 | 11.990.000 | 8.030.713 | 3.490.930 |
| Gespart | 9.478 | 11.516 | 8.797 | 5.407 |

4 Diskussion

Das präsentierte Simulationsmodell basiert auf sehr vielen Modellannahmen, da viele benötigte Daten schwer bis überhaupt nicht verfügbar sind. Die ursprüngliche Idee war, den CO_2 -Ausstoß sowie die Lärmbelastung in Abhängigkeit von der verbauten Deckschicht zu analysieren. Schnell hat sich aber herausgestellt, dass die Datenlage dazu bestenfalls schwammig ist, falls überhaupt verwertbare Daten existieren. Zudem hatten wir nicht die Möglichkeit, mit diversem teuren Equipment verschiedene Baustellen und Straßen zu besuchen, um eigene Messwerte zu sammeln, weshalb wir auf die existierende Datenlage angewiesen sind. Dementsprechend können wir, insbesondere in Abschnitt 2.2.3, nicht mit vollständiger Sicherheit validieren, dass die simulierten Werte dem in der Realität beobachteten Verhalten folgen.

Der Zerfall von Straßen ist ein höchst Komplexes Thema, welches in diesem Modell stark simplifiziert wurde - allein schon, dass der Zustand einer Straße als einzelne Zahl quantifiziert wird. Theoretisch hat jede Schicht eine eigene Lebensdauer und einen eigenen Zustand, während das Modell vom Gesamtzustand jedes Straßenabschnitts ausgeht. Ebenfalls hängt der Zerfall nicht nur von der Verkehrsstärke ab, sondern auch von z. B. Art, Geschwindigkeit und Gewicht der Fahrzeuge (PKW, LKW, Busse), der Witterung, oder auch anderen Straßenarbeiten wie Aufgrabungen [3]. Solche Attribute werden im gegebenen Modell nicht weiter betrachtet, sondern die durchschnittliche Haltbarkeit der Deckschicht in Kombination mit der simplifizierten Verkehrslast pauschal als Lebens-

dauer des Straßenabschnitts angesetzt.

Während der Neubau einer Straße ihren Zustand im Modell auf 100% zurücksetzt, mussten für die Zustandsverbesserung bei Wartung und Sanierung passende Werte geschätzt werden, da konkrete Werte von sehr vielen Faktoren abhängen und nicht pauschal bestimmt werden können [3]. Gelegentliche Straßenarbeiten wie das Füllen von Schlaglöchern mit z. B. Kalth Asphalt werden ebenfalls nicht betrachtet, sondern es wird von den in [6] genannten Wartungstypen und -intervallen ausgegangen. Diese entstammen der Stadt Münster. Möglicherweise haben die Straßen in Berlin einen anderen Aufbau oder eine andere Beschaffenheit, sodass dort andere Intervalle und Maßnahmen optimaler wären. Auch die verwendeten Gesamtkosten für den Straßenbau sind pauschale Zahlen der Stadt Münster, da Berlin unseres Wissens nach solche Daten nicht veröffentlicht hat. Dafür hat Berlin die von uns verwendeten Daten zu Verkehrsmengen, welche wiederum Münster nicht öffentlich bereitzustellen scheint. Materialkosten hängen ebenfalls stark von den verwendeten Materialien und Methodiken ab. Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, verwendet das Modell auch hier pauschale Werte.

Bei der Implementation des Modells in AnyLogic mussten ebenfalls ein paar Hürden überwunden werden. Geplant war, eine GIS-Karte im Hintergrund zu haben, sodass der Nutzer mit ihr interagieren und z. B. Zoomen kann. Basierend auf den existierenden Kartendaten sollten dann die Straßenzüge automatisch generiert werden. Allerdings scheinen GIS-Karten in AnyLogic primär für bewegliche Agenten gedacht zu sein, die bestimmte Routen abfahren und dabei stets sichtbar sind - d. h. sie haben die gleiche Größe, egal, wie sehr die Karte im Hintergrund vergrößert wird. Für die Darstellung von Straßen ist dies denkbar schlecht, da diese ein dichtes Netz bilden, das zwingend mit der Karte skalieren muss. Weiterhin hat AnyLogic zwar ein integriertes Tool, um GIS-Shapefiles automatisch in Straßennetze umzuwandeln. Dieses scheint aber selbst bei simplifizierten Shapefiles der untersuchten Region Straßennetze mit einem so großen Detailgrad zu generieren, dass AnyLogic unbenutzbar wird. Weiterhin haben die integrierten Road-Objekte nur sehr eingeschränkte Visualisierungsmöglichkeiten, sodass wir die Straßen stattdessen mit Rechtecken und Polylines approximiert haben, deren Darstellung (Farben und Ränder sowie Klick-Handling) frei konfigurierbar ist und dem gewünschten Zweck genügt. Diese mussten allerdings alle von Hand platziert werden, da AnyLogic keine öffentlichen APIs zum Auslesen von GIS-Kartendaten hat. Aufgrund dieser Limitierungen wird teilweise sogar von der Nutzung von AnyLogic für realistische großflächige Verkehrssimulationen abgeraten.³

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, ist jeder Straßenabschnitt als unsichtbarer Agent implementiert. Dies hat den Grund, da Agenten die einzige Möglichkeit in AnyLogic sind, enkapsulierte Variablen und Zustandsdiagramme zu haben, wobei jeder Agent eigene Parameterwerte erhält. Ursprünglich sollte die Visualisierung des Straßenabschnitts Teil der Präsentationsebene des Agenten sein, sodass das Rechteck Teil des Agenten ist und

³<https://stackoverflow.com/q/71337408>

dieser es direkt kontrollieren kann. Jedoch gibt es dann im Main-Agenten keine Möglichkeit mehr, die Form der Präsentation eines jeden Straßen-Agenten an die zugehörige Straße anzupassen. Standardmäßig hat jeder Agent die gleiche Präsentation, und eine automatische Anpassung der Form ist wegen der o. g. Limitationen nicht möglich. Stattdessen liegen nun alle Formen im Main-Agenten und sind als Eingabeparameter manuell jedem einzelnen Agenten zugewiesen.

5 Fazit

Diese Arbeit evaluiert unter Zuhilfenahme eines in AnyLogic implementierten Simulationsmodells, inwieweit die Verkehrstärke sowie der verbaute Straßentyp Einfluss auf den Zustand der Straßen Berlins haben, welche Massen für deren Instandhaltungsmaßnahmen verbraucht werden und welche Kosten dabei entstehen. Die Simulation zeigt visuell den Zustand des nachmodellierten Straßennetzes und erlaubt dem Nutzer, einzelne Experimente durchzuführen. Durch Einteilung der Straßen in homogene Abschnitte und passender Zuteilung von Straßentypen und Verkehrsstärken kann die Zustandsverschlechterung einer Straße über Zeit simuliert werden. Infolgedessen werden verschiedene Straßeninstandhaltungsmaßnahmen durchgeführt und die dabei benötigten Materialien sowie verbundenen Kosten dynamisch berechnet. Die Untersuchungen ergaben, dass sich die Straßenabschnitte in Durchschnitt bei einem Zustand von 60 % bis 70 % befinden, wobei Wohnstraßen explizit nur einen durchschnittlichen Zustandwert von 50 % bis 60 % aufweisen und den Gesamtdurchschnitt damit negativ beeinflussen. Instandhaltungsmaßnahmen werden an Haupt- und Zufahrtsstraßen vom Zustand her früher durchgeführt als äquivalente Baumaßnahmen bei Wohnstraßen. Darüber hinaus erfasst die Simulation die Anzahl der gleichzeitigen Instandhaltungsmaßnahmen, wobei es sich in den meisten Fällen nur um eine oder gelegentlich um zwei Maßnahmen gleichzeitig handelt. In seltenen Fällen werden drei oder vier Abschnitte gleichzeitig gewartet. Weitere Experimente untersuchten das Verhalten jedes Straßentyps bei unterschiedlicher Verkehrsintensität. Die Kostenanalyse der Straßentypen zeigt, dass der ausschließliche Bau von Wohnstraßen aufgrund der geringeren Baudicke und den längeren Instandhaltungsmaßnahmintervallen die größten Kosteneinsparungen im Vergleich zur Normalkonfiguration mit sich bringen würde. Dennoch können diese Straßen hohen Verkehrsbelastungen nicht standhalten, da Wohnstraßen selbst bei einer nur mäßigen Verkehrsintensität eine deutlich höhere Abnutzung aufweisen. Somit ist es nicht ratsam, einzig und allein aus Kostengründen nur Wohnstraßen zu bauen. Umgekehrt würde eine durchgängige Nutzung von Hauptstraßen die insgesamt besten Zustandwerte liefern, allerdings verbunden mit deutlich höheren Kosten. Darüber hinaus entsprechen die Materialkosten nur einem kleinen Teil der gesamten Baukosten, zu denen auch Zubehör, Maschinen und Arbeitskräfte gehören.

Dennoch basieren viele der derzeit verwendeten Daten auf Annahmen und Durchschnittswerten. Für genauere Ergebnisse sollte deshalb zum einen die Simulation detaillierter gestaltet sowie in der Realität gemessene Werte und reale Ergebnisse der betrachteten Stadt verwendet werden, da sich Daten und Zahlen mancher Städte nicht zwangsläufig auch auf andere Städte übertragen lassen. Aufgrund der nicht insignifikanten manuellen Arbeit sollte weiterhin in Betracht gezogen werden, das Model in einem anderen Simulationsprogramm nachzubauen, welches besser für großflächige Verkehrssimulationen geeignet ist. Für zukünftige Arbeiten können verschiedene Erweiterungen für das Simulationsmodell in Betracht gezogen werden, wie zum Beispiel die Simulation der Abnutzung aller Schichten bei der Zustandserfassung, da diese momentan nur auf dem Zustand der Deckschicht basiert. Auch könnte die Betrachtung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen, die über einen bestimmten Straßenabschnitt fahren, zur detaillierteren Analyse beitragen. Die Stadt Berlin stellt einen Teil dieser Daten bereits zur Verfügung, diese wurden in dieser Arbeit aber noch nicht betrachtet.

Literatur

- [1] Asphalt Ladenburg GmbH & Co. KG. Preisliste. <https://asphalt-ladenburg.de/downloads/>, 2023. Zugriff: 14.03.2024.
- [2] Bayerisches Landesamt für Statistik. Abfallarten gemäß dem Europäischen Abfallverzeichnis (AVV - Abfallverzeichnis-Verordnung), Umrechnungsfaktoren. https://www.statistik.bayern.de/service/erhebungen/bauen_wohnen/abfall/abfallarten/index.php, 2023. Zugriff: 14.03.2024.
- [3] A. Buttgerit. *Ansätze für ein Erhaltungsmanagement kommunaler Straßen unter Berücksichtigung des NKF*. Doctoral thesis, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsbibliothek, 2019.
- [4] Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V. Asphaltdecken und ihre Aufgaben. <https://www.asphalt.de/themen/technik/5-asphaltdecken-und-ihre-aufgaben/>, 2020. Zugriff: 15.03.2024.
- [5] R. Gass, V. Husjak, and D. I. V. Burtscher. *Handbuch - Visuelle Straßenzustandsbewertung im ländlichen Raum*. Amt der Voralberger Landesregierung, 2018.
- [6] M. S. S. Lima, A. Buttgerit, C. Queiroz, V. Haritonovs, and F. Gschösser. Optimizing financial allocation for maintenance and rehabilitation of munster's road network using the world bank's ronet model. *Infrastructures*, 7(3), 2022. ISSN 2412-3811. doi: 10.3390/infrastructures7030032. URL <https://www.mdpi.com/2412-3811/7/3/32>.
- [7] V. Rosauer. *Abschätzung der herstellungsbedingten Qualität und Lebensdauer von Asphaltdeckschichten mit Hilfe der Risikoanalyse*. PhD thesis, Technische Universität, Darmstadt, November 2010. URL <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2351/>.
- [8] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt des Landes Berlin. Verkehrsinformationszentrale Berlin. <https://viz.berlin.de/>, 2012. Zugriff: 12.03.2024.
- [9] The AnyLogic Company. AnyLogic Simulation Software. <https://www.anylogic.com/>, 2000. Zugriff: 11.03.2024.