

Parametrische Simulation von Linienbaustellen für KI-gestützte Ressourcenplanung

Anna-Maria Mehringer^{1,2} , Jonas Wiederer¹ , Maik Görgner^{1,2}  and Simon Höng¹ 

¹Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Seybothstraße 2, 93053 Regensburg, Germany

²Firmengruppe Max Bögl, Max-Bögl-Straße 1, 92369 Sengenthal, Germany

E-mail(s): anna-maria.mehring@oth-regensburg.de, jonas.wiederer@oth-regensburg.de,
maik.goergner@oth-regensburg.de, simon.hoeng@oth-regensburg.de

Abstract: Diese Arbeit präsentiert ein Konzept zur automatisierten Generierung und Bewertung von Entwurfsvarianten für Linienbaustellen. Basierend auf definierten Rahmenbedingungen und Zielvorgaben werden mittels eines Algorithmus konsistente Simulationsparameter abgeleitet und in ein parametrisches Simulationsmodell überführt. Die Simulation bildet den Bauablauf einer Erdbau-Linienbaustelle ab und ermittelt zentrale Kennwerte wie Bauzeit, Standzeiten, transportierte Materialvolumina und Fahrstrecken. Durch systematische Variation der Einflussgrößen, insbesondere der Fahrzeugflotte, entstehen umfangreiche Datensätze, die sowohl für das Training einer Künstlichen Intelligenz (KI) als auch für die iterative Optimierung verschiedener Bauvarianten eingesetzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Simulation eine wirksame Optimierung der Transportlogistik ermöglicht. Dabei wird deutlich, dass verschiedene Parameterkonfigurationen zu ähnlichen Ergebnissen führen können und die Gewichtung der Optimierungsziele entscheidend ist. Die Validierung mittels evolutionärem Algorithmus bestätigt die Funktionsfähigkeit des Systems und zeigt, dass eine ausschließlich bauzeitbasierte Bewertung eindimensional ist.

Die simulierten Varianten sollen hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien bewertet werden. Die konkrete Umsetzung erfolgt in *Tecnomatix Plant Simulation* und bildet die Grundlage für ein automatisiertes Generative-Design-System zur Optimierung von Linienbaustellen.

Keywords: Generative Design, Construction Simulation, AI Optimization, Linear Construction



DOI: 10.18154/RWTH-CONV-254890. Published in the conference proceedings of the 36. Forum Bauinformatik 2025, Aachen, Germany.
© 2025 The copyright for this article lies with the authors. This publication, except for quotations and otherwise indicated parts, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

1 Motivation

Bis 2030 sollen 80 Prozent des Bruttostromverbrauchs in Deutschland durch erneuerbare Energien abgedeckt werden [1]. Dies erfordert einen umfassenden Ausbau der Energieinfrastruktur, insbesondere des Übertragungsnetzes, um die im Norden erzeugte Windenergie in die südlichen Verbrauchszentren zu transportieren. Hierfür kommen Hochspannungsstromtrassen zum Einsatz. Das Bundesbedarfsplangesetz fördert seit 2013 den Bau von 35 Vorhaben mit rund 14.000 Kilometer Leitungslänge.

Bis 2023 waren jedoch nur etwa 4.000 Kilometer genehmigt oder fertiggestellt [2]. Diese Diskrepanz verdeutlicht den Bedarf nach effizienter Planung und einem effektiven Projektmanagement.

Aufgrund der Neuartigkeit und Dimension dieser Bauvorhaben fehlen belastbare Erfahrungswerte und standardisierte Verfahren zur Effizienzsteigerung. Vorhandenes Wissen bleibt oft an einzelne Personen gebunden und geht bei Projektende oder Personalwechsel verloren. Die mangelnde Dokumentation erschwert die systematische Übertragung bewährter Praktiken auf neue Vorhaben. Ein ganzheitlicher, KI-gestützter Planungsansatz bietet hier Potenzial: Ein automatisierter Workflow kann aus definierten Rahmenbedingungen mittels Generative Design verschiedene Entwurfsvarianten generieren und parametrisch simulieren. Diese werden hinsichtlich Bauzeit, Kosten, Ressourceneinsatz, Logistik und Nachhaltigkeit bewertet und optimiert. Dies erleichtert die Entscheidungsfindung erheblich, da Planende aus verschiedenen Varianten mit entsprechenden Leistungskennzahlen wählen können, anstatt diese selbst aufwendig berechnen zu müssen.

2 Stand der Technik

Die Anwendung von Simulationstechniken zur Optimierung von Erdbauprozessen wurde bereits 2010 im Forschungsprojekt ForBAU - Virtuelle Baustelle untersucht. Wimmer et al. erforschten mittels diskreter ereignisorientierter Simulationen (DES) die Verbesserung von Maschineneinsatz und Logistikplanung von Erdbaustellen [3]. Hierbei wurden Trasse, Baustellenlayout, Projektplan und Maschinendaten als Eingangsdaten genutzt. Das Tool dient als Entscheidungshilfe für die optimale Einteilung wesentlicher Ressourcen. Bereits damals wurde eine Notwendigkeit in der Einbeziehung einer Nachhaltigkeitsberechnung gesehen. Mit diesem Ansatz beschäftigte sich Hovanec et al. und entwickelte einen Simulationsansatz für Life-Cycle-Assessment-Analysen (LCA) von Fahrzeugen [4].

DES bieten einen vielversprechenden Ansatz zur Generierung synthetischer Daten, wodurch eine saubere Datengrundlage für das KI-Training geschaffen werden kann [5]. Auch im Bauwesen zeigten Höng et al. die Erzeugung synthetischer Daten aus parametrischen BIM-Modellen und trainierten damit erfolgreich ein KI-System zur Objektklassifizierung [6]. Behl et al. demonstrierten, dass durch optimierte Simulationsparameter qualitativ hochwertige synthetische Datensätze entstehen, die den Trainingsaufwand reduzieren und die Modellgenauigkeit verbessern [7].

Während Wimmer et al. das Baustellenlayout mittels mathematischer Optimierungsverfahren zur Minimierung der Transportwege als definierten Eingangswert der Simulation festlegte, bietet die Kombination von selbstlernenden KI-Algorithmen und Simulationen die Möglichkeit, die Baustelleneinrichtung dynamisch zu optimieren. Diese innovative Herangehensweise wurde von Choi et al. sowie Klar et al. erfolgreich für Fertigungsbetriebe demonstriert [8] [9].

Wiederer et al. konzipierten einen Optimierungsworkflow für die Brückenbauwerksplanung, der vollparametrische Brückenmodelle über automatisierte Schnittstellen mit Bewertungsprozessen verknüpft [10]. Durch kontinuierliche Rückgabe von Kenngrößen entsteht eine Optimierungsschleife, die manuell oder durch KI-Algorithmen gesteuert werden kann.

Die vorliegende Arbeit grenzt sich durch die Entwicklung eines systemübergreifenden Optimierungsworkflows ab, der Bauwerksanalyse mit weiterführenden Analysen zur Quantifizierung multipler Faktoren verknüpft. Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten, die sich primär auf einzelne Optimierungsaspekte

fokussieren, wird hier die Simulation als zentraler Ausgangspunkt für alle relevanten Planungsparameter eingesetzt. Die Besonderheit liegt in der Integration einer KI, die auf diesem systemübergreifenden Workflow trainiert werden soll und dadurch eine kontinuierliche Optimierungsschleife ermöglicht. Diese neuartige Methodik fokussiert sich auf die Optimierung von Energietrassenbaustellen, wobei die theoretische Grundlage für die Anwendbarkeit von Simulationen zur Ressourcenoptimierung die Untersuchung von Daubenmerkl zu Erdaushubprozessen liefert [11].

3 Methodik

Die Realisierung großmaßstäblicher Trassenprojekte stellt hohe Anforderungen an Planungsgenauigkeit, Ressourceneffizienz und Terminalsicherheit. Die vorliegende Arbeit präsentiert ein softwaregestütztes Konzept, das mithilfe Künstlicher Intelligenz automatisch Entwurfsvarianten für den Ressourceneinsatz und den Bauablauf entlang linearer Trassen erstellen soll. Ziel ist die automatisierte Überführung unterschiedlicher Randbedingungen in ressourcentechnisch bewertbare Ausführungsvarianten unter Berücksichtigung von Leistungskennzahlen.

Die Quantifizierung umfasst Transportrouten, Lagerplätze sowie Leistungskennzahlen zu Kosten, Flottenmanagement und grauer Energie. Als Grundlage fungiert eine parametrische Simulation in *Tecnomatix Plant Simulation (TPS)*, deren strukturierter Kennwertexport die nachgelagerte Bewertung von Bauablaufvarianten ermöglicht. Integrierte KI-Optimierungsalgorithmen ergänzen den Workflow und ermöglichen eine automatisierte Parameteroptimierung zur Erfüllung vordefinierter Zielvorgaben.

3.1 Konzept

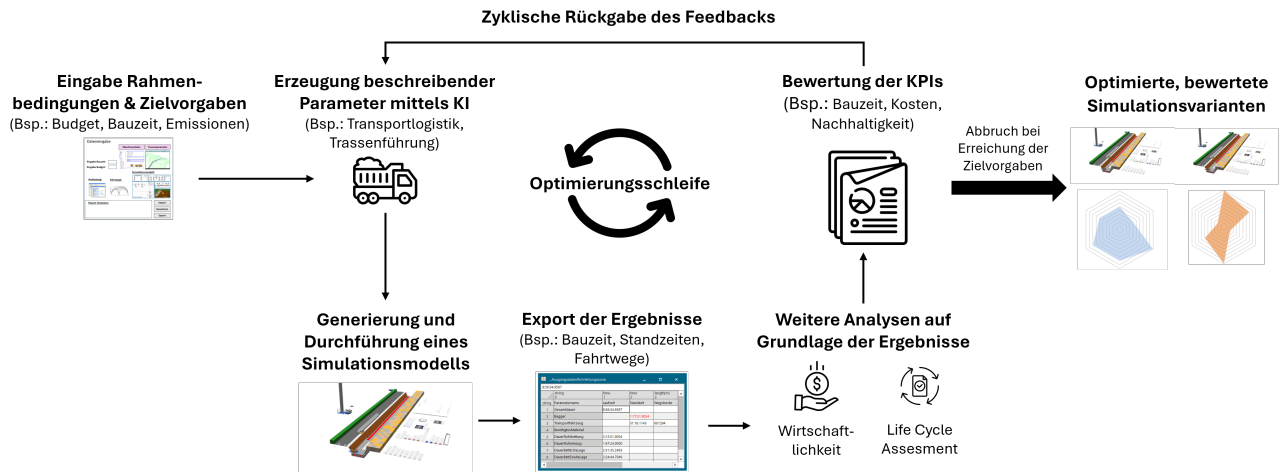


Abbildung 1: Zirkulärer Optimierungsworkflow für simulationsbasierte Linienbaustellen

Ausgehend von den Rahmenbedingungen einer Linienbaustelle werden verschiedene Bauvarianten automatisch generiert und hinsichtlich ihrer Bauzeit, Kosten, Ressourceneinsatz, Logistik und Nachhaltigkeit bewertet sowie optimiert. Als Grundlage für den Workflow dient eine parametrische Simulation, die den Bauablauf einer Linienbaustelle abbildet. Zu Beginn werden alle relevanten Rahmenbedingungen und Zielgrößen durch den Nutzer definiert. Anschließend wertet ein Algorithmus diese Vorgaben aus und leitet konkrete Simulationsparameter ab, wie die Auswahl bestimmter Baumaschinen, deren Anzahl oder die Entfernung zu Zwischenlagern. Auf Basis dieser Daten entsteht ein projektspezifisches

Simulationsmodell, das zentrale Kennzahlen wie die Gesamtbauzeit, die Standzeiten der Maschinen und die gefahrenen Strecken ermittelt. Die ermittelten Kennzahlen können in weiterführende Planungstools integriert werden, sodass der zeitliche Aspekt um zusätzliche ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte ergänzt wird. Daraufhin erfolgt eine Bewertung basierend auf den Zielvorgaben des Users. Die Ergebnisse fließen in eine Optimierungsschleife zurück, in der der Algorithmus die Parameter schrittweise anpasst, bis die definierten Zielfunktionen erreicht sind. Auf diese Weise entsteht ein iteratives Verfahren, das technische, wirtschaftliche und ökologische Zielgrößen in Einklang bringt.

3.2 Parametrisches Simulationsmodell für ressourcenbezogene Trassenprozesse

Das parametrische Simulationsmodell in *TPS* bildet die typischen Prozesse der Erdbau Logistik entlang von Energietrassenbaustellen ab. Dazu zählen Aushub, Transport, Lagerung und Einbau des Erdmaterials und der Leitungen unter Berücksichtigung von Maschineneinsatz, Geometrie und Schichtenaufbau. Als fixierte Steuergrößen dienen vom Bauherren vorgegebene Projektparameter wie das Grabenprofil, die Bodenbeschaffenheit, die Abschnittslängen und Lagerflächen. Die Eingabe soll über eine intuitive grafische Benutzeroberfläche erfolgen. Durch die gezielte Variation von Ressourcen- und Logistikparametern (z. B. Maschinenanzahl, Transportdistanzen, Ladekapazitäten) soll der zeitlich optimale Bauablauf bestimmt werden.

3.3 Automatisierte Pipeline zur Berechnung von weiteren Kenngrößen

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse sollen mittels einer automatisierten Pipeline kostenrelevante Kennwerte, Ressourcenzuordnungen, ökologische Indikatoren sowie Terminplanungen systematisch ermittelt werden. Für die Übergabe der Simulationsergebnisse können entweder native *TPS*-Schnittstellen, beispielsweise Datenbanken, oder der Export im JSON-Format genutzt werden. Dadurch liegt für jede Variante eine fundierte Bewertung vor, die zugleich als Trainingsgrundlage für die Entwicklung erdbauspezifischer Ressourcensimulationsmodelle dienen kann.

3.4 Erzeugung der Simulationsparameter mittels KI

Die entwickelte Simulation sowie die darauf aufbauenden Analysen arbeiten deterministisch und vorwärtsgerichtet. Das bedeutet, dass auf Basis definierter Eingabeparameter (z. B. Trassen- und Bodenkennwerte, Logistikparameter) die entsprechenden Ergebnisgrößen (z. B. Bauzeit, Kosten, Nachhaltigkeit) berechnet werden. Im praktischen Baukontext stehen jedoch nicht primär die Eingabeparameter, sondern die angestrebten Zielgrößen im Vordergrund. Hieraus ergibt sich eine inverse Problemstellung, welche Entwurfparameter zu einer vorgegebenen Zielsetzung führen (beispielsweise die minimale Bauzeit bei einem festgelegten Budget). Zur Lösung dieser Problemstellung werden die Simulationsmodelle in Kombination mit den weiterführenden Analysen zunächst zur Generierung umfangreicher synthetischer Datensätze eingesetzt, welche Eingabeparameter mit den zugehörigen Ergebnisgrößen verknüpfen. Auf dieser Grundlage soll mittels überwachten Lernens ein KI-System trainiert werden, das auf Basis projektspezifischer Daten (z. B. Trassenverlauf, baustellenspezifische Rahmenbedingungen) und definierter Zielvorgaben (z. B. Budget, Bauzeit) optimale Ressourcen- und Logistikparameter ableitet. Ziel ist es, unter Einhaltung der vorgegebenen Randbedingungen einen möglichst effizienten und störungsarmen Bauablauf zu gewährleisten.

3.5 Rückgabe der Bewertung

Die ermittelten Ergebnisgrößen werden nun anhand der vom Nutzer vorab definierten Zielvorgaben evaluiert. Bei unvollständiger Zielerfüllung erfolgt ein Feedback an das KI-System, welches daraufhin neue Entwurfparameter generiert. Auf Basis dieser Parameter wird der Simulations- und Bewertungsprozess erneut gestartet. Treten Zielkonflikte zwischen verschiedenen Optimierungszielen auf, werden diese dem Nutzer in geeigneter visueller Form aufbereitet, um eine fundierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Auf diese Weise entsteht eine iterative Optimierungsschleife, die so lange durchlaufen wird, bis entweder eine definierte Anzahl an Varianten vorliegt, welche sämtliche Zielvorgaben erfüllen, oder eine festgelegte Anzahl an Varianten ohne signifikante Verbesserung erzeugt wurde.

4 Anwendungsbeispiel: Simulation einer konkreten Erdbaustelle

Die Simulation bildet das fundamentale Element des vorgestellten KI-gestützten Workflows und muss deshalb die Bauprozesse möglichst korrekt darstellen. Das entwickelte Modell rekonstruiert die offene Bauweise von Energietrassen, bei der Hochspannungskabel in offenen Gräben verlegt werden. Die nachgelagerten KI-Optimierungsalgorithmen und die integrierte Bewertungslogik stellen derzeit noch konzeptionelle Ansätze dar, deren Implementierung auf der entwickelten Simulation aufbaut.

4.1 Aufbau der Simulationen

Das konzeptionelle Framework der Simulation ist in Abbildung 2 visualisiert. Zur Modellentwicklung wurde ein Bottom-Up-Ansatz gewählt, um detaillierte Kennwerte einzelner Prozessschritte zu ermitteln und diese modular in ein Gesamtmodell zu integrieren. Als technische Basis fungiert ein definierter Regelquerschnitt des Grabens, welcher die Grundlage für sämtliche nachgelagerte Simulationsmodelle bildet. Der Bauablauf der offenen Bauweise wird in fünf sequenzielle Teilprozesse untergliedert: Oberbodenabtrag, Grabenaushub, Bettungseinbau, Rückverfüllung und Oberbodenandeckung.

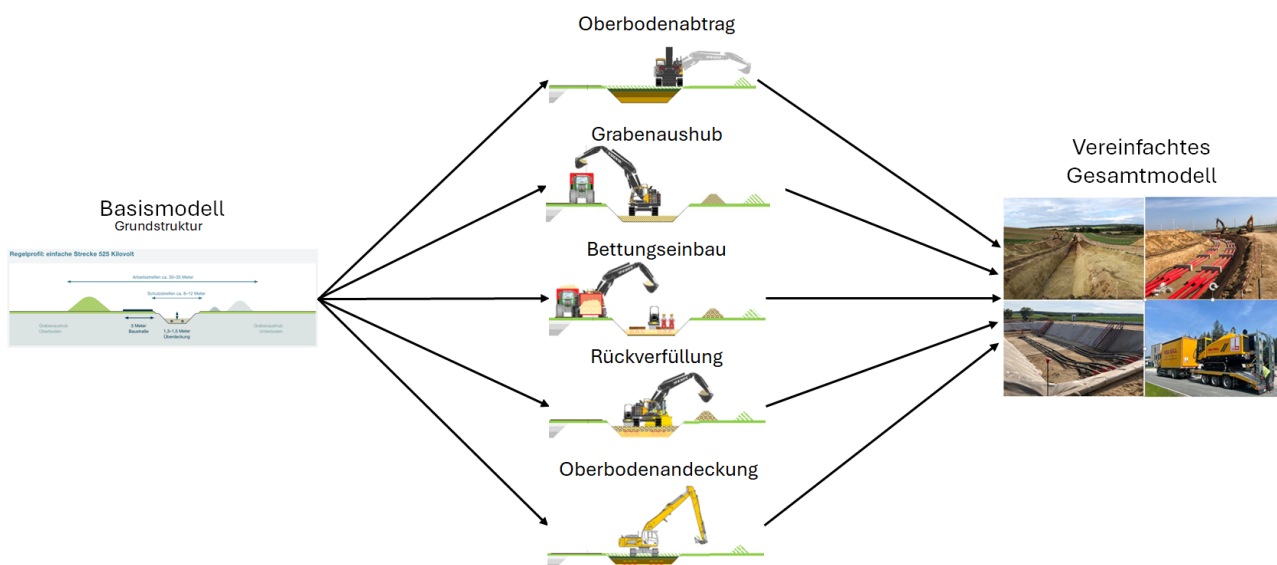


Abbildung 2: Konzeptioneller Aufbau des modularen Simulationssystems nach dem Bottom-Up-Ansatz

Jeder Teilprozess wird mittels separatem Simulationsmodell analysiert. Die zeitliche Grundlage der Ermittlung bilden empirische Aufwandswerte aus realen Kalkulationsgrundlagen, während die Parametrisierung durch projektspezifische Parameter zu Baustellenbedingungen und Ressourceneinsatz erfolgt. Für definierte Abschnittslängen werden Bau- und Standzeiten, bewegte Erdvolumina sowie Transportstrecken ermittelt. Die Integration der Einzelprozesse erfolgt im übergeordneten Modell durch sequenzielle Verknüpfung. Der analytische Fokus liegt auf der zeitlichen Taktung der Arbeitsschritte sowie der Identifikation potenzieller Prozesskollisionen. Das Gesamtsystem ermöglicht die Bestimmung des optimalen Maschineneinsatzes hinsichtlich Anzahl, zeitlichem Einsatz und räumlicher Verteilung zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Baufortschritts. Als Eingangsdaten dienen die aus den Teilprozessen ermittelten Kenngrößen. Diese Methodik ermöglicht die Ableitung realistischer, parameterabhängiger Aufwandswerte zur präzisen Bestimmung der Gesamtbauzeit.

Zur Vermeidung von Schnittstellenproblemen sind alle Simulationsbausteine in einer gemeinsamen Datei organisiert und fungieren konzeptionell als eigenständige Module. Diese modulare Struktur ermöglicht die gezielte Analyse einzelner Arbeitsschritte sowie eine flexible Anpassung des Modells bei veränderten Randbedingungen.

4.2 Durchführung von Versuchsreihen

Zur Anwendung und Validierung des entwickelten Simulationsmodells wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss der Parameter auf die Simulationsergebnisse mit realen Daten zu vergleichen. Die Versuchsreihen wurden mit dem softwareinternen Experimentmanager durchgeführt, welcher die Analyse mehrerer zufallsbasierter Simulationsläufe bei festgelegten Parametereinstellungen ermöglicht. Die Ergebnisse werden durch Mittelwertbildung aus einer bestimmten Anzahl von Simulationsläufen ausgewertet.

Für die Prozesse, die unabhängig von Materialtransporten sind (Oberbodenabtrag und -andeckung, Rückverfüllung), entsteht durch den zufallsverteilten Einfluss von Störungen eine Zeitspanne, die sich mit der Angabe der Tagesleistung deckt. Bei den übrigen Prozessen wurde die Anzahl, die Ladekapazität und die Taktung der Transportfahrzeuge untersucht. Die Erhöhung von einem auf mehrere Fahrzeuge bewirkt eine signifikante Leistungssteigerung. Bei weiterer Erhöhung der Fahrzeuganzahl zeigt sich lediglich eine marginale Effizienzsteigerung bei gleichzeitig ansteigenden Standzeiten der Transportfahrzeuge. Ab einer Fahrzeuganzahl von zwei Einheiten führt eine Erhöhung der Ladekapazität zu vernachlässigbaren Leistungsverbesserungen. Diese Beobachtung bestätigt die Erkenntnisse von Wimmer [3]. Bezüglich der Fahrzeugtaktung erwies sich der minimal eingesetzte Wert als optimal, da sich die Fahrzeuge bei der gegebenen Transportentfernung ab einem kritischen Punkt einholen, wodurch die Taktung ihre steuernde Wirkung verliert.

Zur weiteren Validierung der Simulationsergebnisse wurde eine Teilsimulation der Rohrleitungszone mittels evolutionärem Algorithmus optimiert. Der betrachtete Trassenabschnitt betrug 48 Meter bei einer mittleren Entfernung von 25 Kilometer zum Materiallager. Die Transportgeschwindigkeiten werden mit Schrittgeschwindigkeit auf der Baustraße und durchschnittlich 60 km/h auf öffentlichen Straßen angesetzt.

Die multikriteriellen Optimierungsparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Optimiert wurden in absteigender Priorität: Gesamtbauzeit, Standzeit des Baggers und Standzeiten der Transportfahrzeuge.

Tabelle 1: Parameterbereiche und Schrittweiten für die genetische Optimierung

Optimierungsparameter	Untere Stufe	Obere Stufe	Schrittweite
Anzahl der Fahrzeuge	1	3	1
Ladekapazität	7	12	nicht linear (7,9,12)
Taktung	30 min	2 h	30 min

Der evolutionäre Algorithmus bestimmte als optimale Konfiguration drei Transportfahrzeuge mit 9 m³ Ladekapazität bei 30-minütiger Taktung. Diese Lösung steht scheinbar im Widerspruch zu den vorangegangenen Erkenntnissen über marginale Effizienzsteigerungen bei mehr als zwei Fahrzeugen und höherer Ladekapazität. Das Ergebnis resultiert jedoch aus der 4:1-Gewichtung der Bagger-Standzeit gegenüber den Transporter-Standzeiten. Ein Kontrolllauf mit gleichgewichteten Standzeiten bestätigte den starken Einfluss der Gewichtung. Die optimale Konfiguration reduzierte sich auf zwei Fahrzeuge mit 12 m³ Ladekapazität bei unveränderter Gesamtbauzeit, jedoch bei halbiertem Standzeit der Transportfahrzeuge und bestätigte damit die zuvor ermittelten Zusammenhänge.

5 Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die entwickelte Simulation eine effektive Optimierung der Transportlogistik ermöglicht. Es zeigt sich, dass unterschiedliche Parameterkonfigurationen zu vergleichbaren Ergebnisgrößen führen können, wobei die Gewichtung der einzelnen Optimierungsziele einen maßgeblichen Einfluss auf das Resultat hat. Das Beispiel macht zudem deutlich, dass eine ausschließlich auf die Bauzeit ausgerichtete Bewertung zu einer eindimensionalen Betrachtung führen kann, da bei identischer Bauzeit dennoch signifikante Unterschiede in den zugrunde liegenden Prozessen bestehen können. Daher ist eine Erweiterung der Bewertungsgrundlage um Kosten- sowie ökologische Kenngrößen erforderlich, um eine ganzheitliche und belastbare Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

Die entwickelte parametrische Simulation bildet die Grundlage für ein automatisiertes Generative-Design-System zur Optimierung von Energietrassen. Das modulare Simulationsmodell ist in der Lage, den gesamten Bauablauf der offenen Bauweise abzubilden und liefert zentrale Kennzahlen wie Bauzeit und Ressourceneinsatz, welche als Eingabegrößen für nachgelagerte Bewertungs- und Optimierungsalgorithmen dienen. Durch den parametrischen Grabenquerschnitt können zwar unterschiedliche Grabenprofile berücksichtigt werden, jedoch ist für eine realitätsnahe Abbildung die Integration weiterer Faktoren erforderlich, wie beispielsweise der standortspezifischen Bodenverhältnisse sowie trassenspezifischer Kennwerte. Auch im Gesamtmodell der Simulation muss die Logik der Baggerabfolge und der Parallelisierung von Tätigkeiten noch so modelliert werden, dass ein konsistenter und praxisgerechter Bauablauf entsteht.

Der gegenwärtige Entwicklungsstand umfasst die Implementierung der Basissimulation in *TPS*. Die nächsten Entwicklungsschritte konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung der Simulation sowie die Implementierung der automatisierten Pipeline zur systematischen Überführung der Simulationsergebnisse in kostentechnische, ressourcenbezogene und nachhaltigkeitsorientierte Metriken. Darüber hinaus sind die automatisierte Parameterableitung mittels KI-Algorithmen sowie die Implementierung einer iterativen Optimierungsschleife vorgesehen.

Acknowledgements

Diese Veröffentlichung wurde im Zuge der Masterarbeit durch die Firmengruppe Max Bögl gefördert.

Literatur

- [1] *Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023)*, 2023. besucht am 2. Juli 2025. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- [2] »Netzausbau 2024: Aktuelle Zahlen und Entwicklungen«, besucht am 2. Juli 2025. Adresse: <https://www.enercity.de/magazin/unsere-welt/warum-das-stromnetz-ausgebaut-werden-muss>
- [3] J. Wimmer, T. Horenburg, W. A. Günthner, Y. Ji, A. Borrmann und E. Rank, »Evaluierung einer 3D-Modell-basierten Ablaufsimulation von Erdbauprozessen in der Praxis«, in *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, G. Zülch und P. Stock, Hrsg., KIT Scientific Publishing, 2010, S. 142–148.
- [4] M. Hovanec, P. Korba, V. Tymofiiiv, I. Sekelová und L. Főző, »Simulating Decarbonization of the Road Transport Sector by Siemens Plant Simulation«, in *SISY 2023 – 21st International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, Pula, Croatia: IEEE, 2023, S. 377–382. DOI: 10.1109/SISY60376.2023.10417907
- [5] K. C. Chan, M. Rabaev und H. Pratama, »Generation of synthetic manufacturing datasets for machine learning using discrete-event simulation«, *Production & Manufacturing Research*, Jg. 10, Nr. 1, S. 337–353, 2022. DOI: 10.1080/21693277.2022.2086642
- [6] S. K. Höng und F. A. Eder, »Methode zur Generierung multimodaler synthetischer Daten aus parametrischen BIM-Modellen zur Nutzung in KI-Systemen«, in *Tagungsband 34. Forum Bauinformatik 2023, Bochum, Deutschland*, 2023. DOI: 10.13154/294-10130
- [7] H. S. Behl, A. G. Baydin, R. Gal, P. H. Torr und V. Vineet, »AutoSimulate: (Quickly) Learning Synthetic Data Generation«, in *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58542-6_16 Adresse: <https://www.researchgate.net/publication/346987788>
- [8] H. Choi u. a., »Optimization of the Factory Layout and Production Flow Using Production-Simulation-Based Reinforcement Learning«, *Machines*, Jg. 12, S. 390, 2024. DOI: 10.3390/machines12060390
- [9] M. Klar u. a., »Transferable Multi-Objective Factory Layout Planning Using Simulation-Based Deep Reinforcement Learning«, *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 74, S. 487–511, 2024. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.04.007
- [10] J. Wiederer, S. K. Höng und F. A. Eder, »Konzept zur KI-gestützten parametrischen Brückenmodellierung für ressourcen- und kostenoptimierte Bauwerksentwürfe«, in *Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland*, 2024. DOI: 10.15480/882.13506
- [11] K. Daubenmerkl, »Simulation einer Linienbaustelle - Virtuelle Ressourcenoptimierung von Erdbauprozessen am Beispiel der Energietrasse „SuedLink“«, Magisterarb., OTH Regensburg, 2024.