

Kletterwände – Datenschleifen- und Workflowoptimierung

Agnes Weilandt^{1,2}, Ljuba Tascheva¹, Andreas Rutschmann¹

¹ Bollinger Grohmann Ingenieure

² Frankfurt University of Applied Sciences

Zusammenfassung: Für die Planung von unregelmäßigen Geometrien und komplexen Strukturen sind Parametrisierung und Optimierung zu einem unverzichtbaren Ansatz geworden. Bei dem vorgestellten Kletterwandprojekt wurde ein Workflow entwickelt, um nicht standardisierten Berechnungsprozessen für die unterschiedliche Geometrien vom Entwurf bis zur Fertigung zu automatisieren. Die Autoren stellen dar, inwiefern solche Aufgaben eine Chance darstellen, bestehenden Methoden zu überprüfen und Werkzeuge neu zu kombinieren, um sie auf alltägliche Prozesse anzuwenden.

1 Einführung

Der Umgang mit unregelmäßigen Geometrien und komplexen Strukturen ist eine häufige Herausforderung im Planungsprozess in der Architektur-, Ingenieur-, und Bauindustrie (AEC). Der Einsatz digitaler Werkzeuge und Methoden wie Parametrisierung und Optimierung wird dabei zu einem unverzichtbaren Ansatz. Dies ermöglicht nicht nur, Geometrien besser zu beherrschen und flexibel auf Änderungen zu reagieren, sondern beschleunigt auch den Prozess für sich wiederholende Aufgaben und Schlüsselfragen. Der Arbeitsaufwand für die Berechnungen steigt parallel zur Menge der Daten und zur inhaltlichen Komplexität, sodass herkömmliche Tabellenkalkulationsprogramme bei der Verwaltung der Daten an ihre Grenzen stoßen. Im Rahmen des Projektes "Kletterwände" wird ein zusammenhängender Workflow entwickelt (Abb. 1), bei dem innerhalb eines CAD-Gesamtmodells sowohl die Tragwerksgeometrie als auch konstruktive Detailinformationen aus einer automatisierten statischen Analyse für den Fertigungsprozess implementiert werden. Ziel ist es, durch die modellbasierte und prozessorientierte Arbeitsweise die Anzahl der Rückkopplungsschleifen zwischen den Projektbeteiligten zu minimieren. Zum einen, um den Projektablauf effektiver zu gestalten, zum anderen, um Fehler in der Datenmanagement zu vermeiden. Im Ausblick diskutieren die Autoren die Herangehensweise, die Erweiterungsmöglichkeiten und die sich daraus ergebenden Vorteile für die Weiterentwicklung der Planungsprozessen.

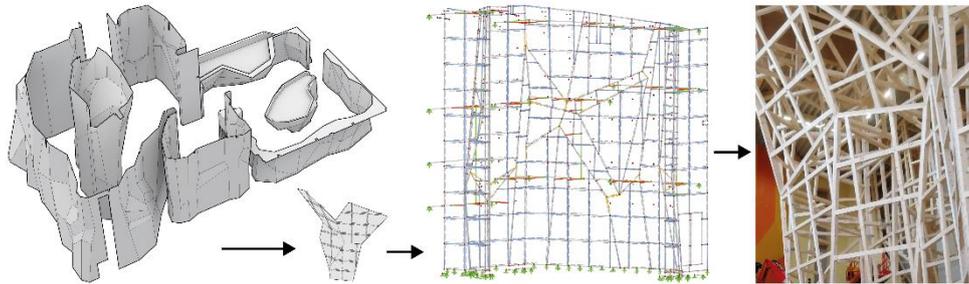


Abbildung 1: Workflow: Basisgeometriemodell und Elementierung - Datentransfer - Gebaute Struktur

2 Aktuelle Planungsrealität

Computergestütztes Arbeiten wird seit über 30 Jahren im Entwurf und der Planung von Gebäuden eingesetzt. Es hat eine Spielwiese für gewagte Formen und komplexe Strukturen geschaffen, die dank des Computers nicht nur greifbar, sondern auch realisierbar geworden sind. Inzwischen ist diese Entwicklung durch eine Vielzahl von Werkzeugen auf dem Markt zugänglicher geworden. Allerdings stellt die heterogene Softwarelandschaft immer noch eine Herausforderung dar. Die unterschiedlichen Programme sind weitgehend unabhängig voneinander und nur bedingt kompatibel. Dadurch kann es zu Einschränkungen in Effizienz und Genauigkeit kommen, wodurch die Vorteile der digitalen Planung wieder reduziert werden. Es entsteht eine softwarebedingte Inselbildung, die dazu führen kann, dass die Anwender vom Gesamtplanungsprozess entkoppelt werden. Lösungen, die eine Integration der Analysen in die CAD-Software anstreben, erreichen nicht immer den notwendigen Spezialisierungsgrad oder erfordern häufig einen erheblichen Mehraufwand bei der Dokumentation oder der normgerechten Nachweisführung. Es erscheint somit sinnvoller, die Analysen mit den für die jeweilige Aufgabenstellung am besten geeigneten auf dem Markt verfügbaren Programmen durchzuführen.

Die Kommunikationsbarriere kann durch die bidirektionale Verknüpfung von 3D-Geometriemodellen mit den Analysemodellen für statische Berechnungen oder andere notwendige Simulationen überbrückt werden. Eine einfache Strategie um den Zugriff auf die Funktionen eines FE-Pakets zu ermöglichen, ist die Implementierung einer Anwendungsprogrammierschnittstelle (API). Mit dieser können Benutzer Skripte schreiben, die die vom entsprechenden Programm bereitgestellten Funktionen nutzen. Ein Vorläufer, der in [1] vorgestellten Schnittstelle wird im hier vorgestellten Projekt verwendet.

Solche maßgeschneiderten "Abkürzungen/Hacks" ermöglichen das Schließen von Lücken, die sich aus der eingeschränkten Kompatibilität der einzelnen Programme ergeben. Auf diese Weise können einzelne Planungsschritte in einer digitalen durchgehenden Prozesskette verknüpft werden.

Die Parametrisierung der Modelle bietet zudem den Vorteil, manuelle und repetitive Analyseaufgaben zu automatisieren, was eine höhere Planungsqualität ermöglicht.

3 Prozessbeschreibung Kletterwand

Das in diesem Beitrag vorgestellte Kletterwandprojekt konfrontiert die Autoren mit der Herausforderung einer unregelmäßigen Geometrie und nicht standardisierten Berechnungsprozessen.

Bei ähnlichen vorherigen Projekten der Auftraggeber ergab sich der Workflow aufgrund der unterschiedlichen Prozessbeteiligten als iterativer Workflow zwischen mehreren Beteiligten. (Abb. 2)

Zunächst wird auf Grundlage des Betreibers eine Geometrie der Kletterwände vorgegeben. Die Grundgeometrie wird aus gefalteten polygonalen und ebenen Großflächen, die im Folgenden als Makroflächen bezeichnet werden, aufgebaut. Typisch sind Abmessungen im Bereich zwischen 1 bis max. 4 m. Die Makroflächen aus OSB -Platten werden auf einer Holzunterkonstruktion verbundsteif verschraubt, so dass die Unterkonstruktion zusammen mit den Platten als Falwerk die Lasten aus Eigengewicht und dem Kletterbetrieb an das Haupttragwerk der Kletterhalle abträgt. Die Unterkonstruktion besteht aus Vollholzbalken , die entlang der Ränder der Makroflächen angeordnet werden. Weiterhin werden die Makroflächen unterteilt, um marktübliche OSB-Platten der Größe 1,2 x 1,2 m für die Fertigung der Struktur verwenden zu können. Diese Elemente werden im Folgenden als Platten bezeichnet. Eine zusätzliche Konstruktion aus Gurten, die entlang der Randkanten dieser Elemente verläuft, versteift die Makroflächen zusätzlich.

Im bisherigen Workflow werden die Makroflächen händisch unterteilt und daraus Achsmodelle für die Berechnung der Unterkonstruktion abgeleitet. Auf Grundlage der Ergebnisse der Berechnungsmodelle werden in der Werkstattplanung die Anschlussdetails weiterentwickelt und die erforderlichen Abmessungen der Gurte in das 3D-Modell eingepflegt. Die Besonderheiten der Belastungen, die sich aus dem Kletterbetrieb ergeben, siehe Beschreibung des neuen Workflows unten, erlauben keine umfängliche Untersuchung aller möglichen Lastfälle, so dass eine Optimierung der Geometrie, der Bauteildimensionen und der Verschraubung der Platten mit der Unterkonstruktion nicht vollumfänglich und nur mit erheblichen Sicherheiten möglich ist. Weiterhin bedingt der iterative Prozess ein Fehlerpotential bei der Datenübergabe.

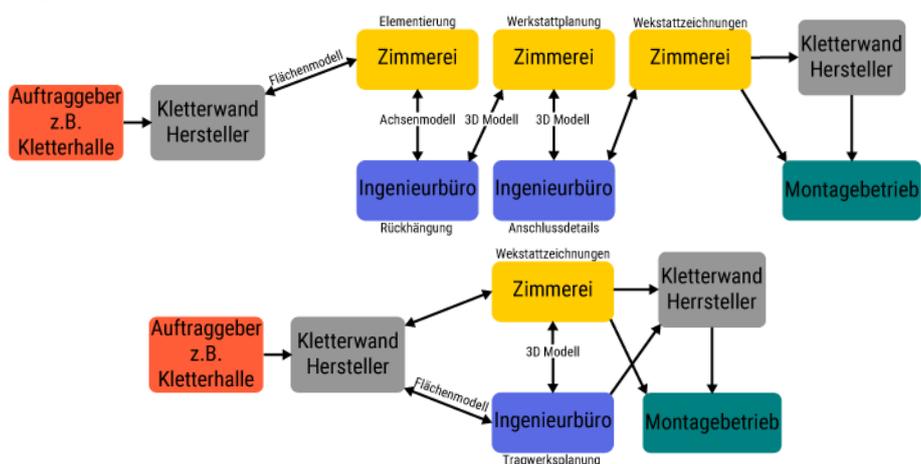


Abbildung 2: Konventioneller Workflow VS verknüpfter Workflow

Eine Weiterentwicklung des Workflows von der Designentwicklung bis zur Werkstattplanung soll dies optimieren. Hieraus ergibt sich ein adaptiver koordinierter modellbasierter parametrischer Gesamtprozess, der die geometrischen 3D-Modelle mit den Berechnungsmodellen verknüpft. Die Autoren nützen hierzu die visuelle Skriptumgebung von Grasshopper3D kombiniert mit individuellen für das Projekt programmierten C#-Komponenten.

Analog zum ursprünglichen Workflow werden zunächst die Makroflächen für die gegebenen Fertigungsmaße elementiert. Dafür werden zunächst die Flächenebenen jeder Makrofläche entsprechend dem Weltkoordinatensystem neu ausgerichtet, so dass die lokalen X- und Y-Achsen parallel zu den X- und Z-Weltachsen verlaufen und die lokale Z-Achse die Flächennormalen entspricht.

Innerhalb dieses lokalen Koordinatensystems werden die Makroflächen in der vertikalen und horizontalen Richtung entsprechend der maximalen Fertigungsgröße der Platten unterteilt. Die kürzeste Seite des minimal umgebenden Rechtecks einer Makrofläche bestimmt die Ausrichtung der durchlaufenden Primärträger für die Unterkonstruktion. Die Träger in der sekundären Richtung werden gestoßen an den Primärträgern gestoßen (Abb. 3). Bei der Unterteilung der Makroflächen wurden parallel die Abmessungen der Platten analysiert und optimiert, so dass sich zum Beispiel am Rand der Makroflächen keine zu schmalen Platten oder ungünstige Knotenpunkte der Gurte ergeben. Diese Optimierung wird regelbasiert vorab über Parameter eingegeben, so dass keine händische Bearbeitung der 340 Makroflächen in diesem Projekt erforderlich ist.

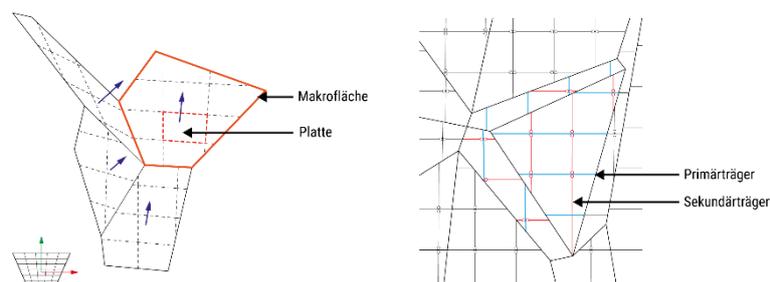


Abbildung 3: Elementierung und daraus resultierendes statisches System mit Gelenken in einer Makrofläche

Aus der generierten Achsgeometrie und der definierten Primär- und Sekundärachse der Unterkonstruktion kann über individuelles Application-Programming-Interface (API)-Skripte automatisiert das Finite-Elementmodell zur statischen Analyse in der Software Dlubal RFEM für die einzelnen Kletterwände erstellt werden. Die Platten werden als Flächenelemente mit Liniengelenken entlang ihrer Ränder modelliert. Die Unterkonstruktion als Stabelemente: Hier sind die Träger entlang der Primärachsen als durchlaufend bis zum Rand der Makroflächen modelliert. Die Träger in Richtung der Sekundärachsen werden an den Schnittpunkten zu den Primärträgern gestoßen und jeweils gelenkig angebunden.

Die Erstellung der Berechnungsmodelle erfordert neben der automatisierten Generierung der Geometrie durch die möglichen Lastvarianten und damit hohe Anzahl der zu untersuchenden Lastfälle eine besondere Beachtung. Bei den Kletterwänden handelt es sich unter anderem um Vorstiegs- bzw. Top Rope Wände. Diese Kletterwandarten werden immer mit

Seilsicherung beklettert. Mehrere Kletterer können sich gleichzeitig in einer Wand befinden. Es wird zwischen den Belastungen an den Klettergriffen und den deutlich höheren Belastungen an den Sicherungspunkten unterschieden.

Die Belastung an den einzelnen Griffen, die über die gesamten Makroflächen verteilt sind und deren Lage im Lebenszyklus der Kletterwand auch verändert wird, werden vereinfacht über Flächenlasten berücksichtigt. Die Steifigkeit der Platten ist ausreichend, um diese Belastungen auf die Hauptkonstruktion zu übertragen.

Die Sicherungspunkte werden im Lebenszyklus der Kletterhalle nicht verändert und die daraus resultierenden Belastungen werden als Einzellasten in der Berechnung erfasst. Hierbei wird angenommen, dass sich mehrere Kletterer in der Kletterwand befinden. Beim Sturz eines Kletterers ergibt sich die sogenannte Sturzlast; für die sich im Bereich des stürzenden Kletterers befindlichen anderen Kletterer wird angenommen, dass sie sich in einer Ruheposition befinden und somit die Seilsicherung mit ihrem Eigengewicht ohne zusätzlichen dynamischen Anteil belasten. Hieraus ergibt sich für jeden Sicherungspunkt ein Lastkollektiv aus einer Sturzlast + 2 an den danebenliegenden Sicherungspunkten angeordneten Ruhelasten. Dieses Lastkollektiv ist für alle Sicherungspunkte in der Kletterhalle jeweils als ein Einzellastfall zu betrachten. Zusätzlich werden in diesen Lastfällen, die in den seitlich neben dem Sturzbereich angeordneten Sicherungspunkte am Kopf der Kletterwand mit einer Ruhelast beaufschlagt, um weitere Kletterer, die sich in der Wand befinden zu erfassen (Abb.4).

Zur Reduktion der Lastfallkombinationen können die Lastkollektive für weit auseinander liegende Sicherungspunkte in einer Lastfallkombination betrachtet werden. Im gegebenen Projekt ergeben sich somit für 974 Sicherungspunkte = Lastkollektive und 815 zu untersuchende Lastfallkombinationen. Eine intuitive Abschätzung der maßgebenden Lastpunkte und damit eine Reduktion der Lastfallkombinationen ist aufgrund der komplexen teilweise überhängenden Geometrie der Kletterwände nur bedingt möglich.

Die Generierung der Lastfälle und Lastfallkombinationen erfolgt ebenso wie die die Erstellung des Analysemodells automatisiert aus dem 3D-Geometriemodell, um eine zeitaufwendige und fehleranfällige händische Eingabe zu vermeiden.

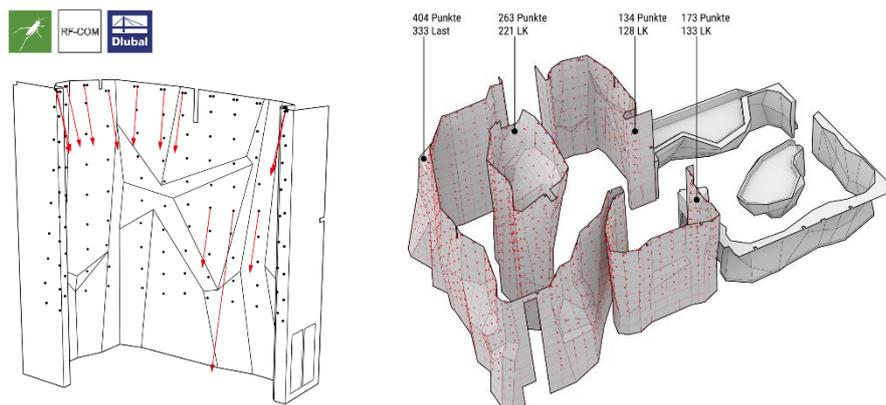


Abbildung 4: Lastendefinition

Die Verknüpfung des Analysemodells mit dem 3D-Geometriemodell über API ist bidirektional ausgebildet. Eine bei solchen Projekten sonst vielleicht übliche Auswertung der Lastfallkombinationen über Tabellenkalkulationsprogramme ist aufgrund der Datenmenge nicht möglich. Weiterhin kann durch die bidirektionale Verknüpfung Sackgassen in der Prozesskette und der damit verbundene Informationsverlust vermieden werden. Die Ergebnisse der Berechnungen aller Lastfallkombinationen werden der ursprünglichen Geometrie direkt zugeordnet (Abb. 5).

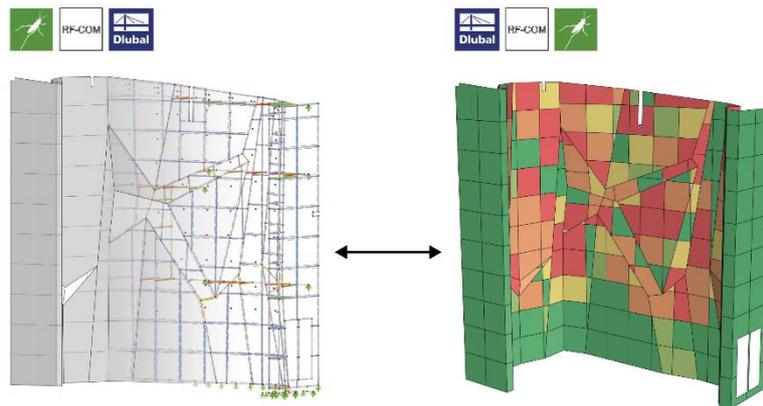


Abbildung 5: API Schnittstelle Geometrie \leftrightarrow Berechnungsmodell / Ergebnisse

Hieraus werden weitere Schritte abgeleitet:

- Die mit der Geometrie verknüpften Analyseergebnisse dienen als Basis für weitere Berechnungen, die außerhalb des Analysemodells durchgeführt werden, wie zum Beispiel der erforderliche Schraubenabstand für die Befestigung der Einzelplatten an die Unterkonstruktion.
- Für die Dokumentation und prüffähige Aufbereitung werden die Ergebnisse im 3D-Modell farblich visualisiert und mit in prüffähigen Tabellen aufbereitet. Ein vorab definierter Zahlencode ermöglicht die vereinfachte Zuordnung der Daten. Dies ermöglicht eine visuelle Kontrolle der Berechnungen und sich ergebenden großen Datenmengen.
- Für die Herstellung werden aus dem 3D-Modell Abwicklungen für 2D-Pläne automatisch generiert, die als Übersicht für die Montage (Abb. 6) dienen.

Mit diesem Workflow kann eine durchgehende Prozesskette für die Aufgabenstellung erstellt werden. Lediglich die Rückhängungen der Kletterwände an das Haupttragwerk der Kletterhalle wurden händisch im Analysemodell ergänzt und aufgrund der Analyseergebnisse in diesem optimiert. Beim Rückspielen der Analysemodelle in die 3D-Geometriemodelle können diese dann direkt übernommen werden.

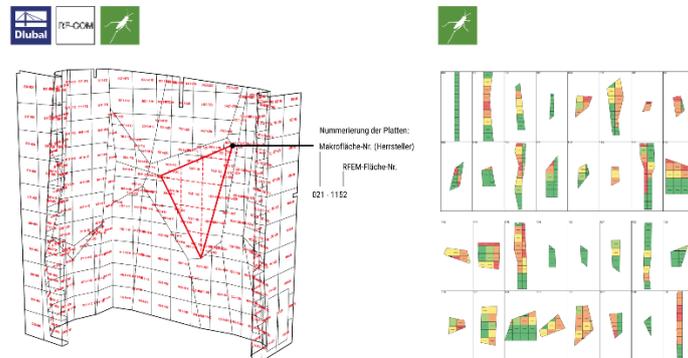


Abbildung 6: Austausch Ergebnisse für Dokumentation und automatisierte Planerstellung

4 Diskussion des Vorgehens - Ausblick

Der beschriebene Automatisierungsprozess ist ein Sonderfall, der aufgrund der komplexen Berechnungen dieses speziellen Kletterwandtyps entstanden ist. Dennoch kann durch den vollständig parametrisierten Aufbau der Workflow flexibel an unterschiedliche Kletterwandgeometrien und -typen angepasst werden. Auf diese Weise können die Berechnungen und die Überprüfung der Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Bauvorschriften in wesentlich kürzerer Zeit durchgeführt werden. Der Übertragungsaufwand der Datenmengen kann auf ein Minimum reduziert werden. Des Weiteren ermöglicht die bidirektionale Schnittstelle eine direkte und anschauliche Weitergabe und Aufbereitung der Daten an den Hersteller. Lokale Anpassungen, die wie die Anbindung der Kletterwände an das Haupttragwerk der Halle, die nicht parametrisiert werden sollen, werden von den Experten in den Prozess eingespielt.

Die bestmöglichen Programme und Tools können somit für die einzelnen Bearbeitungsschritte herangezogen und über die Datenkommunikationsstelle miteinander verknüpft werden. So werden zum Beispiel beim vorgestellten Projekt einfache sonst manuell geführte Auswertungen zu Schraubenabständen mit den Ergebnissen der finiten Elementberechnungen synchronisiert und können bei Änderungen automatisch nachgeführt werden.

Durch die Integration des gesamten Workflows in ein Skript erfordert die Pflege des Workflows jedoch einen übergeordneten programmieraffinen Experten. Dieser muss zum einen bei Änderungen im Skript die Richtigkeit der Ergebnisse gewährleisten, und zum anderen zum Beispiel auf Softwareupdates durch Anpassungen reagieren. Da die einzelnen Bausteine des Workflows nicht standardisiert sind und nicht separat angesprochen werden können, werden Personen, die üblicherweise nicht in solche Programmierprozesse eingebunden sind, ausgeschlossen.

Grundsätzlich liegt das Potential solcher Workflows jedoch insbesondere in ihrer Übertragung auf allgemeine Prozesse und in der Einbindung aller Beteiligten.

Goldup et al beschreiben 2017 einen Workflow für ein Großprojekt und weisen darauf hin, dass sie für das Projekt einen Rahmen benötigten, der flexibel war, da zu Beginn des Projekts

nicht klar war, auf welche Weise "die Entwurfsdaten verwendet, manipuliert, geteilt und dokumentiert werden würden" [2]. Hieraus schließt Stefanescu in [3], dass Entwurfsprojekte komplex sind und dass man bei der Lösung und dem Umgang mit dieser Komplexität Flexibilität braucht, um die kommunikativen Prozesse, die zur Lösung der Aufgabe führen, in Gang setzen zu können.

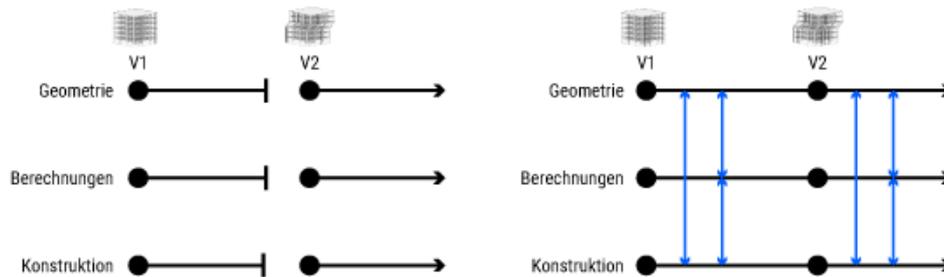


Abbildung 7: Verknüpfung über Kommunikationsplattformen der sonst ohne maßgeschneiderte Skripte abgekoppelten Workflows

Es zeigt sich also, dass in zukünftigen Aufgabenstellungen diese Flexibilität stärker in den Workflows Fokus rücken sollte und sich nicht nur auf das Datenhandling beschränkt sein darf, sondern auch die Kommunikation und Beteiligung aller Experten einschließen muss. Dies kann mit Hilfe von allgemein gültigen Kommunikationsplattformen erreicht werden. Die Schnittstellen zu den einzelnen Analyse- oder CAD-Programmen können Workflowunabhängig eingesetzt und aktualisiert werden (Abb. 7). Spezifische Bausteine können nach Projektbedarf zusätzlich entwickelt und eingebunden werden. Die Anwendung kann durch die Experten auch ohne detaillierte Programmierkenntnisse erfolgen und gliedert diese gleichzeitig in die Gesamtkommunikation und die Prozessentwicklung besser ein. Die größte Herausforderung wird hier die Verankerung des Prozessdenkens in die Projektteams sein, so dass diese Herangehensweise unabhängig von der Aufgabenstellung auch in alltäglichen Projektaufgaben selbstverständlich wird.

Literatur

- [1] APELLÁNIZ, D. VIERLINGER, R., Enhancing structural design with a parametric FEM toolbox. *Steel Construction*, 15(3) (2022), pp.188-195
- [2] GOLDUP, K., KOSTURA, Z., TAVOLARO, T., WOLFE, S. Advanced Engineering with Building Information Modelling: Establishing Flexible Frameworks for the Design and Documentation of Complex Buildings. *Architectural Design*, 87 (2017); S.120-127
- [3] STEFANESCU, D. Alternate Means of Digital Design Communication (PhD Thesis). UCL London, 2020