

Holzsteg Rapperswil – Hurden Machbarkeitsstudie



Verteiler (digital):

Stadt Rapperswil – Jona
Bau, Liegenschaften, Infrastruktur

Bänziger Partner AG, Chur
Dr. Thomas Jäger

Bänziger Partner AG, St. Gallen
Dr. Stefan Köppel

Walter Bieler AG

Ing. Büro Walter Bieler AG



Enrico Fromm

Ing. Büro Walter Bieler AG



Walter Bieler

Ing. Büro Bänziger Partner AG



Dr. Thomas Jäger

Management Summary

Der im Jahr 2001 errichtete Eichenholzsteg Rapperswil - Hurden, eine bedeutende Fussgängerverbindung im Naturschutzgebiet Frauenwinkel, sieht sich mit einem erheblichen Pilzbefall konfrontiert, der nicht nur die Tragfähigkeit beeinträchtigt, sondern auch zu immer weiter steigenden Unterhaltskosten führt.

Die eingehende Zustandsanalyse zeigt, dass sich der Pilzbefall trotz vorbeugender und bekämpfender Holzschutzmassnahmen weiter ausbreitet. Vor Ort durchgeführte Klimamessungen verdeutlichen eine erhöhte Luftfeuchtigkeit von November bis Januar, was ideale Bedingungen für das Pilzwachstum schafft. Alles deutet darauf hin, dass bis zum Ende des Jahrzehnts der gesamte Steg vom Pilzbefall betroffen sein wird. Auch grosse Teile der bereits ausgeführten Sanierungsmassnahmen mit Unterstützungspfählen aus Lärchenholz werden bis dann sehr wahrscheinlich wieder erneuert werden müssen.

Die jährlichen Unterhaltskosten steigen kontinuierlich und werden bis zum Ende des Jahrzehnts voraussichtlich etwa Fr. 300'000 erreichen, eine signifikante Abweichung von den üblichen Kosten für eine Fussgängerbrücke. Angesichts dieser Herausforderungen empfiehlt die Studie eine umfassende Sanierung innerhalb der nächsten 5 – 7 Jahre. Diese sollte einen kompletten Rückbau und Neubau einschließen, um Kontaminationsrisiken zu minimieren und eine langfristig tragfähige Lösung zu gewährleisten.

Das Variantenstudium für den Pfahlersatz konzentriert sich darauf, die gestalterische Integrität des Stegs zu bewahren. Es wird empfohlen, den bestehenden Raster beizubehalten und die neuen Pfähle darauf zu positionieren oder den Raster parallel zu verschieben, um Konflikte mit dem alten Pfahlraster zu vermeiden. Dabei werden Stahlpfähle, Betonpfähle, Holzpfähle mit Manschetten und Stahlpfähle mit Manschetten als Teilvarianten betrachtet.

Die Materialisierung des Oberbaus wurde sorgfältig analysiert, wobei empfohlen wird, einheimische Holzalternativen aufgrund von Dauerhaftigkeits- und Verfügbarkeitsproblemen auszuschließen. Tropenholzer und Accoya erscheinen als vielversprechende Alternativen mit hoher Resistenz und guter Verfügbarkeit. Auf Stahl oder Beton als Oberbaumaterial wird verzichtet, da sich der Steg mittels einer Holzkonstruktion auch weiterhin optimal in das Landschaftsbild des Naturschutzgebietes Frauenwinkel einpassen soll. Die bestehenden Stahlbauteile sollten jedoch wiederverwendet und allenfalls neu dupliert werden. Durch die Wiederverwendung können rund Fr. 200'000 eingespart werden.

Die Sanierungsempfehlung bevorzugt den Ersatz der Holzpfähle durch Eichenpfähle mit Stahlpfählen und -manschetten, sowie einen Oberbau aus Accoya oder Tropenholz. Die Kosten der verschiedenen Varianten variieren zwischen Fr. 4 Mio. und Fr. 7 Mio. Eine Sanierung im Betrieb erhöht die Kosten um 12 – 20 % und birgt ein stetiges Kontaminationsrisiko. Daher werden eine Stegsperrung und ein vollständiger Rückbau als präferierte Option vorgeschlagen. Hier gilt es jedoch, einen Grundsatzentscheid für oder gegen eine Sanierung während dem Betrieb zu fällen.

Das weitere Vorgehen sieht Expositionsversuche mit Accoya und Tropenholz vor, sowie anschliessend Vorversuche mit Pfahlmanschetten und Schichtdickenmessungen der Duplexierung der bestehenden Stahljoche. Zudem sollte die Tragfähigkeit der Pfähle mittels jährlichen Bohrwiderstandsmessungen und Sanierungsmassnahmen sichergestellt werden, sodass die Sicherheit der Fussgänger bis zum geplanten Stegersatz gewährleistet werden.

Insgesamt wird eine Sanierung des Oberbaus mit Accoya oder Tropenholz in Kombination mit Stahlpfählen und Manschetten empfohlen, um eine nachhaltige und dauerhafte Lösung zu gewährleisten. Die Kosten dafür betragen rund Fr. 6.2 Mio.. Damit soll nicht nur die Funktion des Stegs als Verbindungselement wiederhergestellt, sondern auch sein ästhetischer und ökologischer Wert bewahrt

werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass bei der durchgeführten Bewertung alle Kriterien gleich stark gewichtet wurden. Eine andere Gewichtung könnte andere Varianten bevorzugen.

Inhalt

1	Auftrag.....	5
2	Grundlagen.....	5
3	Bauwerk.....	6
4	Zustandsbeurteilung.....	8
4.1	Aktueller Zustand.....	8
4.2	Holzschutzmassnahmen.....	8
4.3	Analyse Pilzbefall.....	9
4.3.1	Göttersitz.....	9
4.3.2	Klimamessungen.....	10
4.3.3	Prognose zum Pilzbefall.....	10
4.4	Unterhaltskosten.....	11
4.5	Beurteilung und Massnahmen.....	12
5	Variantenstudium Totalsanierung.....	13
5.1	Grundsätze.....	13
5.1.1	Auflistung Pfahlersatzvarianten.....	13
5.1.2	Auflistung Materialisierung Oberbau.....	13
5.1.3	Auflistung Bauhilfsmassnahmen.....	14
5.2	Pfahlersatz.....	14
5.2.1	Einleitung.....	14
5.2.2	Variante neue Stahlpfähle.....	15
5.2.3	Variante neue Betonhohlpfähle.....	17
5.2.4	Variante Stahlmanschetten und Holzpfähle.....	19
5.2.5	Variante Stahlmanschetten und Stahlpfähle.....	21
5.3	Oberbau.....	23
5.3.1	Grundsätzliches zur Eignung von Holz.....	23
5.3.2	Tragwerksanpassungen.....	24
5.3.3	Variante Einheimische Hölzer.....	26
5.3.4	Variante Tropenholz.....	26
5.3.5	Variante Accoya.....	26
5.4	Bauhilfsmassnahmen.....	27
5.4.1	Einleitung.....	27
5.4.2	Variante Stegsperrung.....	27
5.4.3	Variante Hilfssprengwerk.....	27
5.4.4	Variante Hilfsbrücke aus Pontons.....	28

5.4.5	Variante Hilfsbrücke aus Aluminium.....	28
6	Varianten und Bewertung	30
6.1	Zusammenfassung Vor- und Nachteile der Teilvarianten.....	30
6.1.1	Pfahlersatz	30
6.1.2	Oberbau	31
6.1.3	Bauhilfsmassnahmen	32
6.2	Bewertung nach Kriterien.....	33
6.2.1	Kosten.....	33
6.2.2	Dauerhaftigkeit	34
6.2.3	Nachhaltigkeit	34
6.2.4	Emissionen (Eingriffe in Natur, Baulärm, usw.).....	36
6.2.5	Sanierung während Betrieb	36
6.3	Qualitativer Variantenvergleich.....	37
6.3.1	Pfahlersatz	37
6.3.2	Oberbau	37
6.3.3	Bauhilfsmassnahmen	37
7	Fazit	38
7.1	Empfehlung	39
7.2	Weiteres Vorgehen.....	40
8	Quellenverzeichnis	41
9	Tabellenverzeichnis	42
10	Abbildungsverzeichnis.....	42
11	Anhang	43
11.1	Kosten	43
11.2	Auswertung der nicht tragfähigen Pfähle	44

1 Auftrag

Im März 2022 wurde der Bänziger Partner AG durch die Stadt Rapperswil – Jona der Auftrag erteilt, eine Machbarkeitsstudie für eine Sanierung des bestehenden Holzsteges Rapperswil – Hurden auszu- arbeiten. Darin sollten Prognosen zur Entwicklung des Pilzbefalls und den Unterhaltskosten enthalten sein, sowie ein Variantenstudium, in dem Vor- und Nachteile verschiedener Sanierungsvarianten aufge- zeigt und bewertet werden.

2 Grundlagen

Der im Jahre 2001 erbaute Fussgängersteg aus Eichenholz von Rapperswil nach Hurden leidet zuneh- mend unter einem Pilzbefall, welcher 2012 erstmals festgestellt wurde. Trotz der eigentlich guten Dau- erhaftigkeit des Eichenholzes breitet der sich der Befall immer weiter aus und verringert die Tragfähig- keit der Konstruktion.

Aufgrund seiner Lage mitten im Naturschutzgebiet Frauenwinkel wurde entschieden, dass der Steg nur mit einer unbehandelten Holzkonstruktion ausgeführt werden darf. Eichenholz hat sich über Jahr- tausende beim Holzbrückenbau bewährt. Ein gutes Beispiel dafür ist die Kappelbrücke, das Wahrzei- chen von Luzern, erbaut im Jahre 1333. Bei ihr müssen im Rhythmus von 50 Jahren ca. 5 Eichenpfähle ersetzt werden. Aus diesem Grund wurde auch beim Holzsteg Rapperswil – Hurden Eiche als Bauma- terial eingesetzt.

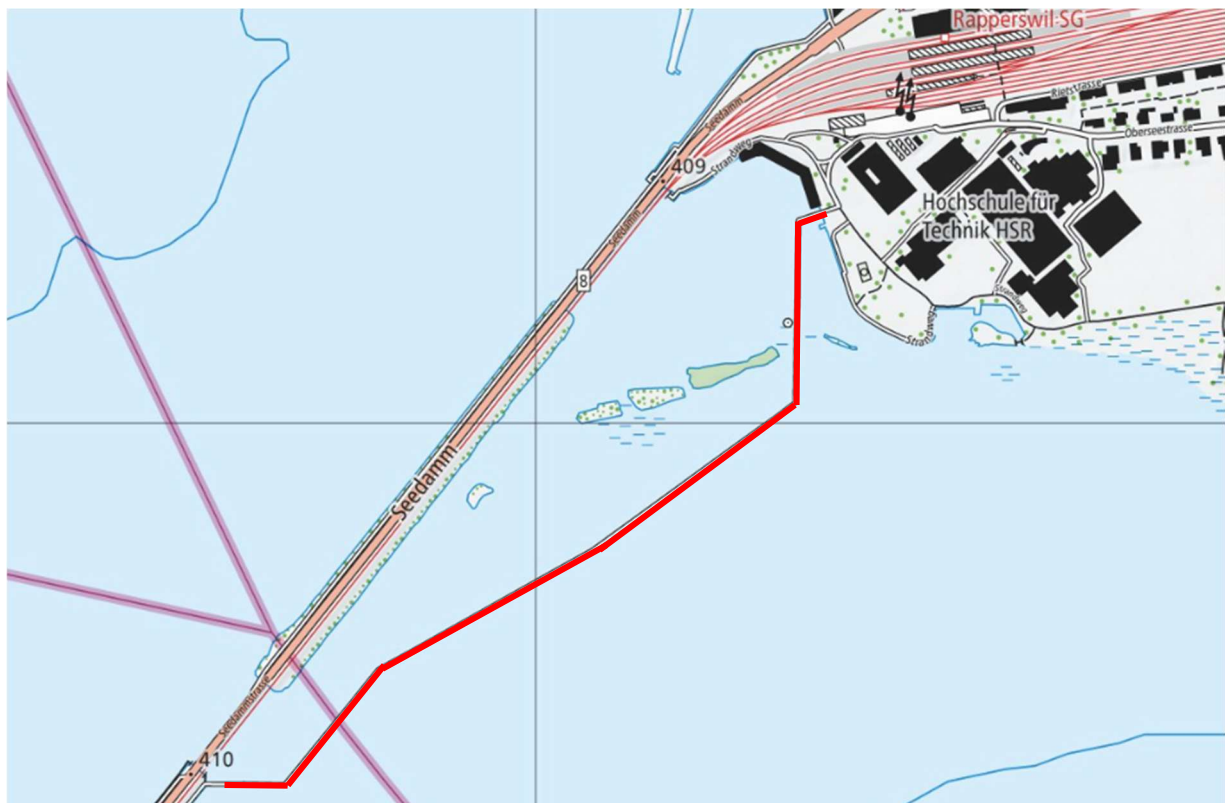


Abbildung 1: Situationsplan des Steges

Der Steg dient als rege genutzte Fussgängerverbindung entlang des Seedamms und ist bei der Bevöl- kerung sehr beliebt. Bei Zählungen in den ersten Jahren nach der Eröffnung wurde festgestellt, dass der Steg in den Sommermonaten täglich von ungefähr 1000 Personen genutzt wurde.

3 Bauwerk

Der 2.5 m breite Steg liegt jeweils auf einem Hauptpfahl (direkt unter der Gehfläche) und einem Nebenpfahl (seitlich des Steges) auf, welche in den Seegrund gerammt wurden. Auf den Pfählen liegt ein Stahljoch auf, welches biegesteif an den Hauptpfahl angeschlossen ist. Am Stahljoch ist das Geländer montiert, welches auf der einen Seite mit einer dicht angeordneten Holzschalung und auf der anderen Seite mit Stahlseilen ausgestattet ist. Zudem dient das Joch als Auflager für die stehend verlegten Gehweglamellen, welche in Längsrichtung tragend verlegt sind. Der Lamellenbelag wird ausserdem durch Spanschrauben zusammengespannt, sodass eine Plattenwirkung und somit eine verbesserte Verteilung der Kräfte in Querrichtung erzeugt wird.

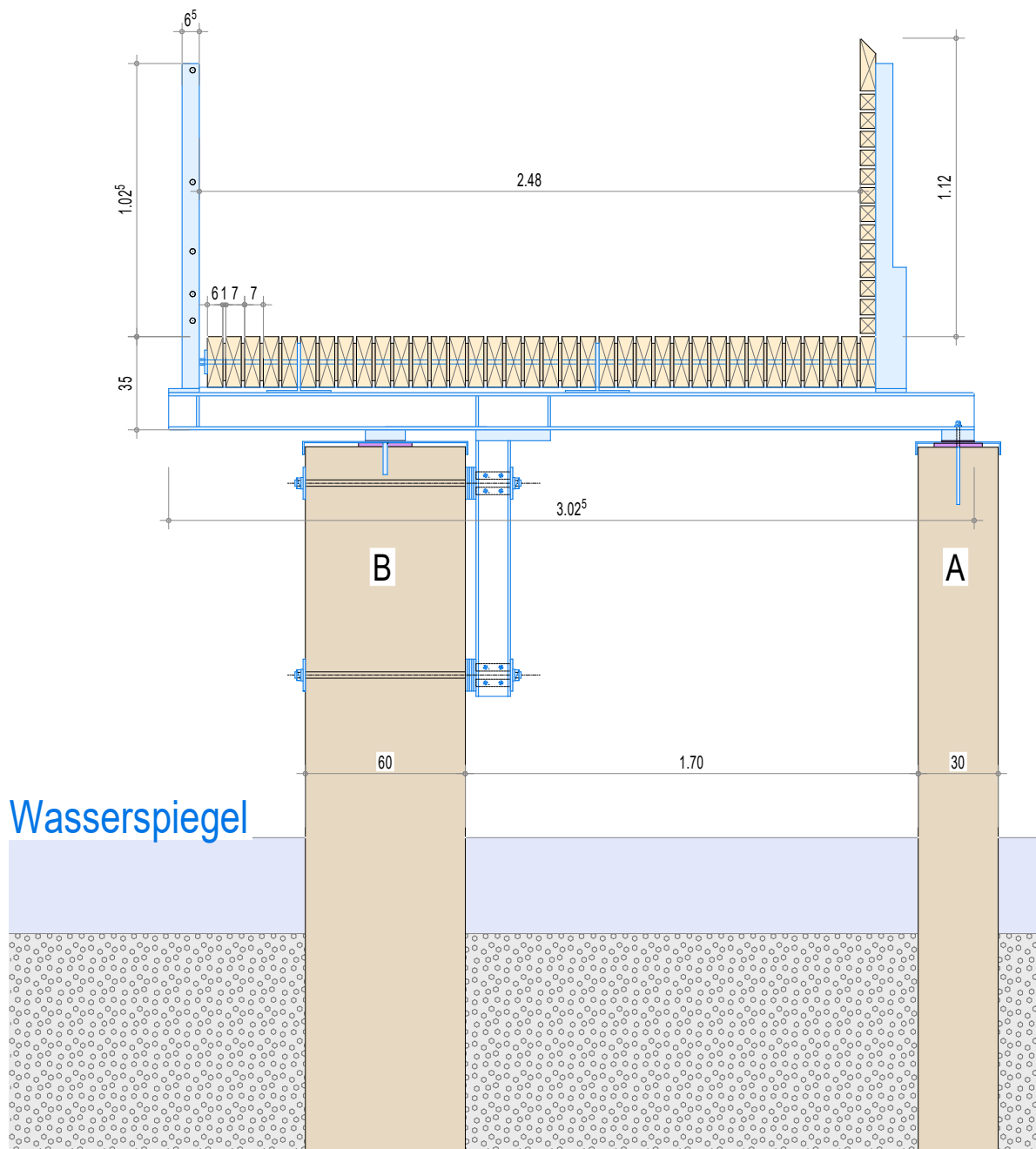


Abbildung 2: Querschnitt des bestehenden Steges [m]

Zum Steg gehört auch noch die Aussichtsplattform Göttersitz, welche sich im Bereich der Schiffdurchfahrt auf der Seite Hurden befindet. Die Plattform wird von 15 zusätzlichen Pfählen gestützt, welche bis zum Handlauf des Geländers hochlaufen.



Abbildung 3: Göttersitz und Durchfahrt Hurden

4 Zustandsbeurteilung

4.1 Aktueller Zustand

Bereits zwischen 2012 und 2017 wurden einzelne Pfähle mittels Bohrwiderstandsmessungen untersucht. Seit 2018 wird die Entwicklung der Fäulnis jedes einzelnen Pfahles jährlich untersucht. Anhand der Resultate dieser Bohrwiderstandsmessungen wird die Tragfähigkeit der beschädigten Pfähle berechnet. Aufgrund dieser Messungen wurden anschliessend provisorische Verstärkungsmassnahmen vollzogen, um nicht mehr ausreichend tragfähige Pfähle zu stützen.

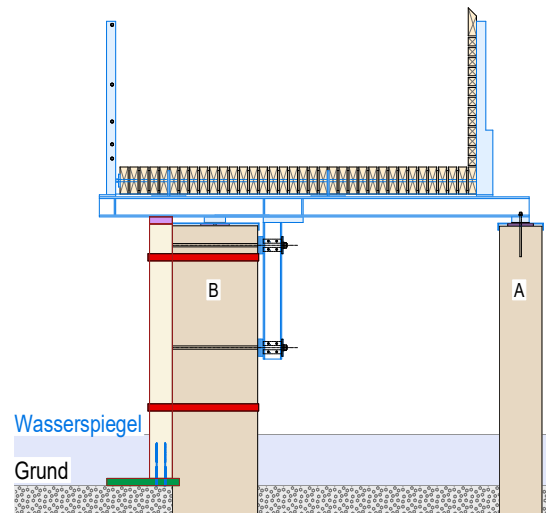


Abbildung 4: Unterstützungsmassnahmen bei nicht mehr tragfähigen Pfählen

Parallel zu den Ermittlungen des Fäulnisausmasses erfolgt seit der Entdeckung des Befalls prophylaktisch eine regelmässige Behandlung mit Antagonisten (biologische Konkurrenzbildung). Zudem werden laufend faule Gehweglamellen, durch Ausschneiden verfallener Teile und Einkleben neuer Teile, saniert.

Alle Stahlbauteile sind duplexiert und in einem guten Zustand. Bei Stichprobenmessungen während dem Bau des Steges wurde allerdings festgestellt, dass die Duplexierung ungenügend ausgeführt wurde und in vielen Fällen nicht den Vorgaben entspricht.

4.2 Holzschutzmassnahmen

Beim Bau des Holzsteges Rapperswil – Hurden wurde versucht durch natürliche, organisatorische sowie bauliche Massnahmen einen ausreichenden Holzschutz zu generieren. Zu diesem Zweck wurde entschieden, die Konstruktion aus dauerhaftem Eichenholz zu fertigen. Es wurde darauf geachtet, dass alle Bauteile gut luftumspült sind. Zudem wurden die Kontaktflächen zwischen den einzelnen Hölzern minimiert. Es wurden bewusst kleine Holzquerschnitte gewählt und mit genügend Abstand montiert, dass ein vollständiges Austrocknen der Konstruktion gewährleistet ist. Ausserdem wurden die Pfähle mit einem Stahlblech abgedeckt, um das Hirnholz vor Feuchtigkeit zu schützen.

Durch eine optimale Trocknung sollten nachträgliche Risse minimiert und allfällige Pilzkolonien abgetötet werden. Leider erfolgte die Trocknung aufgrund von Lieferengpässen teilweise nur ungenügend, wodurch vereinzelt auch Holz mit erhöhter Feuchte eingebaut wurde. Es ist denkbar, dass der Steg auf diesem Weg befallen wurde, da die erhöhte Holzfeuchte den Pilzen das Überleben ermöglicht haben könnte.

Seit der Entdeckung des Pilzbefalls wird versucht, mithilfe biologischer Bekämpfungsmassnahmen (Antagonisten), die Ausbreitung zu verhindern. Diesbezüglich werden Sporen von *Trichoderma species pluralis (spp.)* mit Acronal Plus 6288 zu einer Lasur vermischt, welche auf die Holzoberflächen aufgetragen wird. *Trichoderma spp.* ist eine Schimmelpilzgattung und hat deshalb auf das Holz nur eine verfärbende, jedoch keine festigkeitsmindernde Wirkung auf das Holz. Der Einsatz dieses Antagonists könnte das Wachstum der Pilze verlangsamen, jedoch wahrscheinlich nicht verhindern, weshalb der Einsatz nicht uneingeschränkt empfohlen werden kann. Eine Behandlung mit *Trichoderma spp.* ist zwar präventiv möglich, kurativ kann jedoch die Behandlung häufig nur eine unzureichende Wirkung erzielen.

4.3 Analyse Pilzbefall

Bereits seit längerem ist bekannt, dass der Steg trotz der oben genannten Holzschutzmassnahmen vom Eichenwirrling (*Daedalea Quercina*), welcher Braunfäule verursacht, sowie dem Schmetterlingsporling (*Trametes Versicolor*), welcher Weissfäule verursacht, befallen ist. Da in den Bohrwiderstandsmessungen bisher kein Befallsmuster erkennbar ist und sich der Befall des Eichenwirrlings über fast den gesamten Steg verteilt, wird vermutet, dass das Holz schon während des Einschnitts in der Sägerei durch Pilzsporen befallen war. Bei der Begehung vom 22. September 2022 wurden durch Herr Heeb von der EMPA Dübendorf neue Holzproben genommen und anschliessend analysiert. Dabei wurde neuerdings auch ein Befall durch den Eichenporling (*Donkioporia Expansa*), Balkenblättling (*Gloeophyllum Trabeum*) und den Zaunblättling (*Gloeophyllum Sepiarium*) festgestellt.

Aufgrund der Bohrwiderstandsmessungen vom Sommer 2023 und vorangegangener Messungen wurden bisher rund 14 % der Pfähle (ohne Göttersitz) als nicht mehr ausreichend tragfähig identifiziert, welche anschliessend jedoch durch entsprechende Sanierungsmassnahmen wieder ertüchtigt wurden. Eine Übersicht aller nicht tragfähigen Pfähle ist im Anhang 11.2 ersichtlich.

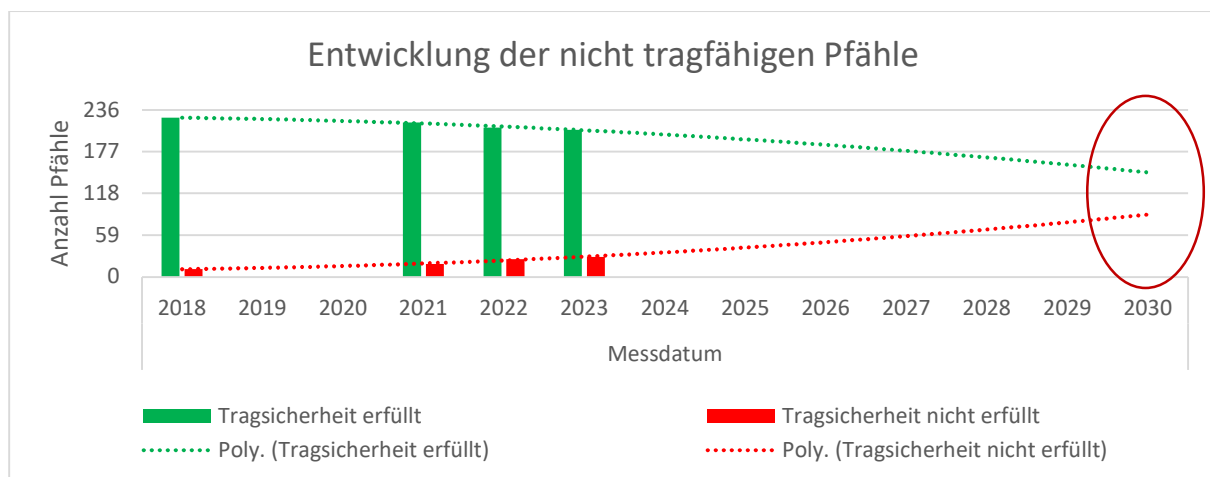


Abbildung 5: Entwicklung der nicht tragfähigen Pfähle

Anhand der Abbildung 5 ist erkennbar, dass bis zum Ende des Jahrzehnts 40 – 60 weitere Pfähle saniert werden müssten, was ungefähr 6 – 8 Pfählen pro Jahr entspricht.

4.3.1 Göttersitz

Der Zustand der Pfähle am Göttersitz ist bereits seit mehreren Jahren relativ schlecht und alle Pfähle weisen starke Fäule auf. Aus diesem Grund wurde die Plattform bereits im Frühling 2022 für Besucher gesperrt. Da seit 2021 keine Messungen mehr durchgeführt wurden, wurden die Pfähle des Göttersitzes auch nicht für die aktuelle Entwicklungsprognose berücksichtigt.

4.3.2 Klimamessungen

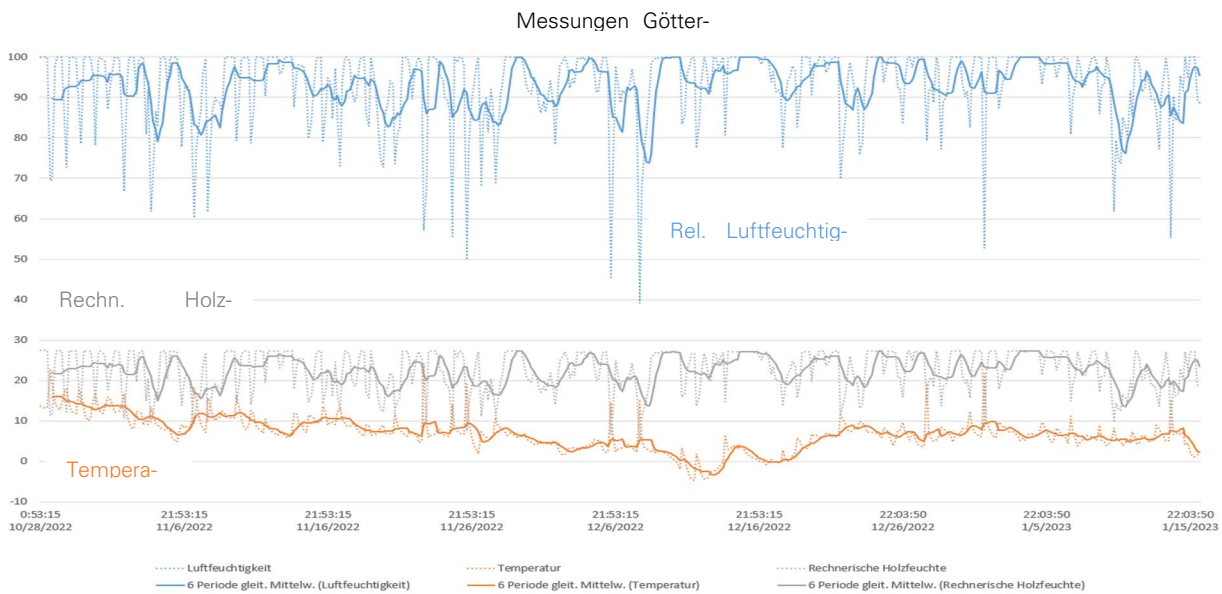


Abbildung 6: Klimadaten Göttersitz

An zwei Standorten (Heilig Hüsli und Göttersitz) wurden zwischen Oktober 2022 und Januar 2023 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessungen durchgeführt, um herauszufinden, ob der Pilzbefall in einem Zusammenhang mit dem umgebenden Klima stehen könnte. Durch die Messung während der Herbst- und Winterzeit sollte die kritische Zeitspanne mit den höchsten relativen Luftfeuchtigkeiten und gleichzeitig den tiefsten Temperaturen erfasst werden. Aus den Messungen wurde anschliessend die jeweilige Holzgleichsfeuchte berechnet (graue Linie). Durch anhaltend feuchte Verhältnisse kann die Holzfeuchte langsam ansteigen und ab einer Holzfeuchte von 20 % kann das Holz theoretisch befallen werden. Wirklich wahrscheinlich ist ein Befall jedoch erst ab 25 % Holzfeuchte bei weniger resistenten Hölzern.

Während der Temperaturverlauf in der Abbildung 6 ungefähr den Erwartungen entspricht, zeigt sich der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit deutlich erhöht. Der Vergleich der errechneten Holzfeuchten mit gemessenen Holzfeuchten stützt diese Resultate ebenfalls. Anhand der Abbildung 6 lässt sich folgern, dass sich die mittlere Holzfeuchte über grosse Teile des Jahres über 20 % bewegt und vorallem auch während des kritischen Zeitraumes von November bis Januar über längere Zeit im Bereich von über 25 % liegen kann. Holzfeuchten von über 25 % begünstigen schlussendlich das Pilzwachstum sehr, weshalb der starke Befall nach der Auswertung der Messresultate nicht unbedingt überrascht.

4.3.3 Prognose zum Pilzbefall

In der nachfolgenden Abbildung 7 ist erkennbar, dass der gesamte Steg bis zum Ende dieses Jahrzehnts sehr wahrscheinlich befallen sein wird. Zudem werden bis dann auch bereits ausgeführte Sanierungen erneuert werden müssen. Das für die Unterstützungspfähle verwendete Lärchenholz wird unter den gegebenen Klimabedingungen sehr wahrscheinlich nicht länger als 10 bis 15 Jahre tragfähig sein, da es nicht über eine ausreichende Dauerhaftigkeit verfügt. Das bedeutet, auch Teile der bereits ausgeführten Sanierungsmassnahmen müssten Anfang des nächsten Jahrzehnts sehr wahrscheinlich erneuert werden.

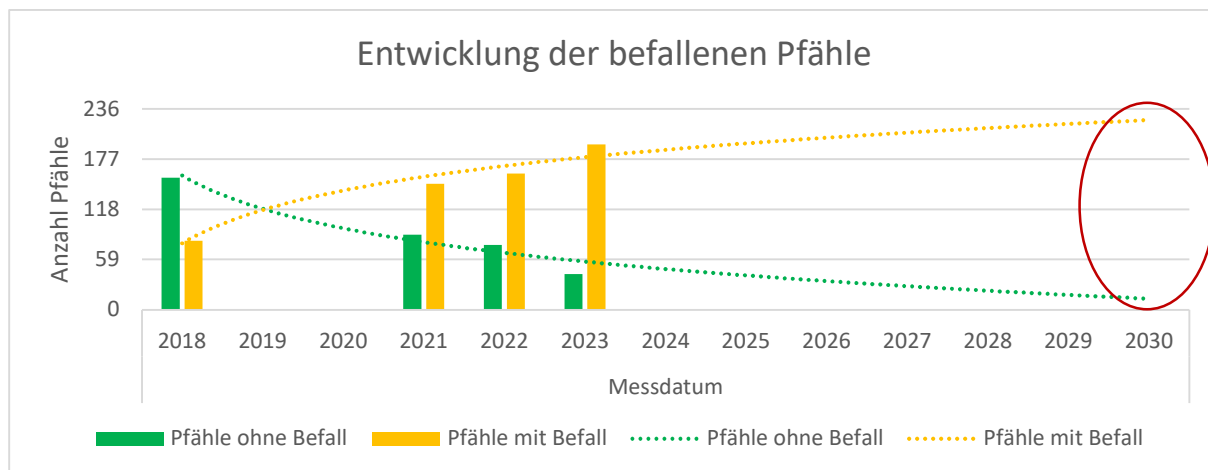


Abbildung 7: Entwicklung der befallenen Pfähle

Anhand der Abbildung 7 beträgt die Lebensdauer des Steges sinnvollerweise noch 5 – 7 Jahre, vorausgesetzt, dass jährlich fällige Sanierungen ausgeführt werden. Bis zum Ende des Jahrzehnts wird sehr wahrscheinlich der ganze Steg befallen sein. Danach erscheint eine Weiterführung der Sanierung nicht mehr als sinnvoll. Einerseits müssten viele Pfähle neu unterstützt werden und andererseits müssten bei einigen bereits sanierten Pfählen die Massnahmen erneut ausgeführt werden. Das weniger resistente Lärchenholz der Unterstützungspfähle wird dann bei einigen Pfählen ebenfalls seine Endlebensdauer erreicht haben und ersetzt werden müssen. (10 – 15 Jahre Lebensdauer)

4.4 Unterhaltskosten

Seit Entdeckung des Pilzbefalls nehmen die laufenden Kosten stetig zu. Mittelfristig kann nicht mit einem Rückgang der Unterhaltskosten gerechnet werden, auch wenn im Jahr 2023 die Kosten wahrscheinlich aufgrund geringerer Aufwendungen für die Pfahlsanierungen kurzfristig etwas niedriger ausfallen könnten als in den beiden Jahren zuvor.

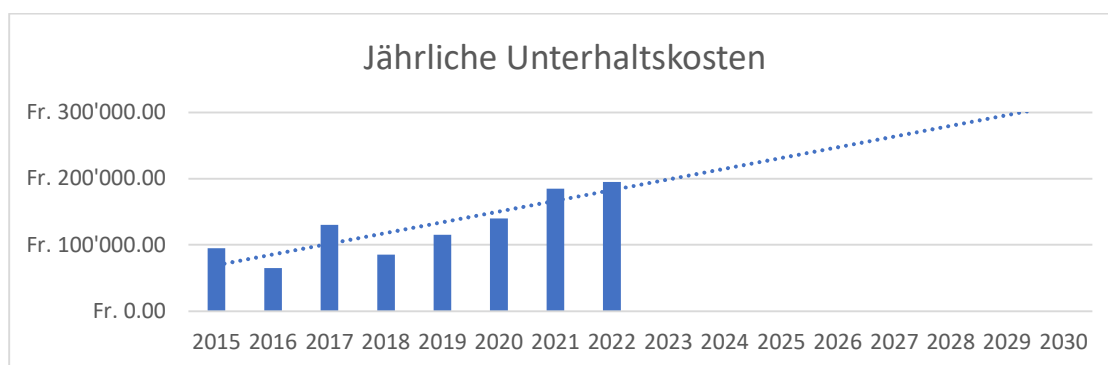


Abbildung 8: Entwicklung der jährlichen Unterhaltskosten

Die Abbildung 8 zeigt, dass die jährlichen Unterhaltskosten in den letzten Jahren stetig zugenommen haben und bis zum Ende des Jahrzehnts wahrscheinlich noch bis auf ungefähr Fr. 300'000 ansteigen werden. Für eine Fussgängerbrücke mit offen bewittertem Tragwerk muss über eine Lebensdauer von 40 Jahren mit jährlichen Unterhaltskosten von 1 bis 2.5 % der Investitionssumme gerechnet werden. [1] Für eine konservative Schätzung wird davon ausgegangen, dass sich die Unterhaltskosten von anfänglich Fr. 0 auf Fr. 195'000 jährlich linear erhöht haben. Das würde bedeuten, dass in die durchschnittlichen Unterhaltskosten Ende 2022 bei Fr. 87'500 pro Jahr lagen. Die anfänglichen Investitionskosten

von rund Fr. 3 Mio. würden bedeuten, dass die durchschnittlichen Unterhaltskosten im Jahr zwischen Fr. 30'000 und Fr. 75'000 liegen sollten. Bereits nach nur etwas mehr als der Hälfte der zu erwartenden Lebensdauer sind also die durchschnittlichen Unterhaltskosten signifikant höher als sie eigentlich am Ende der Lebensdauer maximal sein sollten. In Anbetracht dessen macht es also Sinn, den Steg in absehbarer Zeit zu ersetzen.

4.5 Beurteilung und Massnahmen

Die ungenügende Holz Trocknung in Kombination mit den vorherrschenden, feuchten klimatischen Bedingungen begünstigen das Pilzwachstum auch bei resistenten Hölzern, weshalb der starke Befall rückblickend nicht unbedingt überrascht. Die steigenden Unterhaltskosten sprechen für eine Totalsanierung des Steges in den nächsten 5 – 7 Jahren.

Um den Befall zu verlangsamen, wird der Steg weiterhin zweimal jährlich mit Antagonisten, also biologischen Gegenspielern, besprüht, welche die Ausbreitung der Pilze unterbinden soll. Mithilfe der regelmässigen Bohrwiderstandsmessungen kann die Tragfähigkeit und somit die Sicherheit bis zum Ersatz des Steges weiterhin gewährleistet werden.

Da sich der Pilzbefall über den ganzen Steg verteilt und ohnehin eine Totalsanierung nötig ist, sollte der Steg bestenfalls komplett rückgebaut und anschliessend ein neuer Steg gebaut werden. Dadurch kann das Risiko einer Kreuzkontamination und damit eines erneuten Pilzbefalls minimiert werden. Zudem ist die Verwendung einer äusserst dauerhaften Holzart essenziell für eine lange Lebensdauer. Eichenholz, welches zu den resistentesten einheimischen Hölzern zählt, ist offenbar nicht für den Einsatz unter den vorherrschenden Klimabedingungen geeignet. Ausserdem muss das Holz fachgerecht vorgetrocknet werden, um einen Pilzbefall durch auf dem Holz vorhandene Pilzsporen zu verhindern.

Rechnerisch sollten zudem alle Stahlbauteile noch mindestens 60 Jahre Schutzdauer durch die Duplexierung aufweisen. Dies muss jedoch mittels Schichtdickenmessungen überprüft werden, bevor diese Bauteile wiederverwendet werden. Durch die Wiederverwendung der Stahlbauteile könnten jedoch rund Fr. 200'000 eingespart werden. Aus diesem Grund sollte versucht werden, diesen Ansatz in die Sanierungsvorschläge zu integrieren.

5 Variantenstudium Totalsanierung

5.1 Grundsätze

Das Variantenstudium konzentriert sich auf die Materialisierung, verschiedene Pfahlersatzmöglichkeiten und die benötigten Bauhilfsmassnahmen zur Ausführung einer umfassenden Instandstellung des Steges. Ziel ist es nicht, die gestalterisch beste Lösung für dieses Projekt zu finden, sondern eine technisch einwandfreie und dauerhafte Konstruktion.

Auf einen Neubau mit tiefer greifenden Tragwerksanpassungen oder einer neuen Linienführung wird aus verschiedenen Gründen, welche nachfolgend erläutert werden, bewusst verzichtet.

- Bereits für den Bau des bestehenden Steges war aufgrund seiner Lage im Naturschutzgebiet Frauenwinkel ein aufwendiges Bewilligungsverfahren nötig. So musste der Steg entlang einer vorgegebenen Linienführung geplant werden. Da das Naturschutzgebiet als Lebensraum für zahlreiche Vogelarten und als Rastplatz für Wandervögel dient, wurde zu deren Schutz jeweils auf einer Seite des Steges eine Geländerschaltung angebracht. Diese soll als Sichtschutz dienen und ruhenden Vögeln, gerade auch vor Kindern oder Hunden etwas Schutz bieten. Ein neuer Steg, mit stark verändertem Querschnitt oder neuer Linienführung hätte mit Sicherheit ein aufwendiges Bewilligungsverfahren zur Folge und sollte aus diesem Grund vermieden werden.
- Wenn die Linienführung beibehalten werden muss, würde dies unweigerlich zum Konflikt zwischen dem alten und neuen Pfahlraster führen. Es macht also Sinn, den alten Raster genau gleich weiterzuverwenden, in dem die bestehenden Pfähle als Auflager für die neuen Pfähle genutzt werden. Andernfalls könnte der gleiche Raster einfach um ein paar Meter parallel zum bestehenden Raster verschoben werden, damit neue Pfähle eingebracht werden können, ohne dass die bestehenden Pfähle vollständig rückgebaut werden müssen. Varianten mit kürzeren Rasterabständen wurden ebenfalls geprüft. Es ergeben sich jedoch Konflikte mit dem bestehenden Raster, was zu hohen Mehrkosten führt. Ein grösserer Rasterabstand ist dagegen aufgrund der Festigkeitseigenschaften des Holzes wirtschaftlich nicht sinnvoll.
- Da der Steg auch designtechnisch ansprechend wirkt und in der Bevölkerung sehr beliebt ist, sollte die Konstruktion im Rahmen einer Totalsanierung nicht grundlegend verändert werden. Aus diesem Grund wird auch auf Varianten mit einem Oberbau aus Stahl oder Beton verzichtet. Der Steg soll sich weiterhin optimal in die Umgebung des Naturschutzgebietes integrieren. Ein Oberbau aus Holz ist dafür eine wichtige Voraussetzung.

Im Kapitel 6.1 werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten tabellarisch zusammengefasst. Nachfolgend sind alle erarbeiteten Teilvarianten aufgeführt. Diese sind untereinander frei kombinierbar.

5.1.1 Auflistung Pfahlersatzvarianten

- Stahlpfähle
- Betonpfähle
- Holzpfähle mit Manschetten
- Stahlpfähle mit Manschetten

5.1.2 Auflistung Materialisierung Oberbau

- Einheimische Hölzer
- Tropenhölzer
- Accoya

5.1.3 Auflistung Bauhilfsmassnahmen

- Stegsperrung
- Hilfssprengwerk
- Hilfsbrücke aus Pontons
- Hilfsbrücke aus Aluminium

Aufgrund der Attraktivität des Stegs in der Bevölkerung ist es ideal, wenn dieser während der Bauphasen in Betrieb bleiben kann. Aus bauablauftechnischer Sicht ist dagegen ein kompletter Rückbau und anschliessender Neubau zu bevorzugen. Dies würde auch das Risiko einer Kreuzkontamination des Holzes reduzieren. Es ist jedoch kritisch zu hinterfragen, wie hoch die Mehrkosten für eine Sanierung während dem Betrieb sein dürfen.

5.2 Pfahlersatz

5.2.1 Einleitung

Für den Pfahlersatz gibt es aus konstruktiver Sicht zwei Möglichkeiten. Diese können in verschiedenen Varianten ausgeführt werden. Die erste Möglichkeit besteht darin, neue Pfähle jeweils um die halbe Spannweite versetzt zum alten Raster zu rammen und die bestehenden Pfähle am Seegrund zu kappen. Die zweite Möglichkeit wäre, die bestehenden Pfähle als Auflager für Pfahlaufsätze wiederzuverwenden, welche mittels Stahlmanschetten auf die bestehenden Pfähle aufgesetzt werden. Weitere Varianten mit kürzeren Rastern oder andere Materialkombinationen wurden geprüft, erwiesen sich jedoch nicht als zielführend. Insbesondere eine Reduktion der Pfahlabstände führt zu einem deutlich grösseren Materialbedarf und Konflikten mit dem alten Raster.

Falls ein Pfahlersatz mittels Manschetten gewählt wird, ist es zudem aufgrund der grossen Stückzahl der Pfähle empfehlenswert, mittels eines Probepfahles die Funktionstüchtigkeit der Manschette zu sicherzustellen.

Bezüglich der Materialisierung wurde Holz, Stahl und Beton in Betracht gezogen. Für alle Materialien wurden anschliessend verschiedene Sanierungsvarianten erarbeitet. Im Folgenden sind vier mögliche Sanierungsvarianten mit Vor- und Nachteilen beschrieben.

5.2.2 Variante neue Stahlpfähle

Bei dieser Variante werden die bestehenden Holzpfähle am Seegrund abgetrennt und fachgerecht entsorgt. Als neue Fundation werden neue Stahlpfähle in Form von Stahlrohren gerammt. Um keinen Konflikt mit den bestehenden Pfählen zu verursachen, wird der Pfahlraster beibehalten. Die neuen Pfähle sind jeweils um eine halbe Spannweite versetzt.

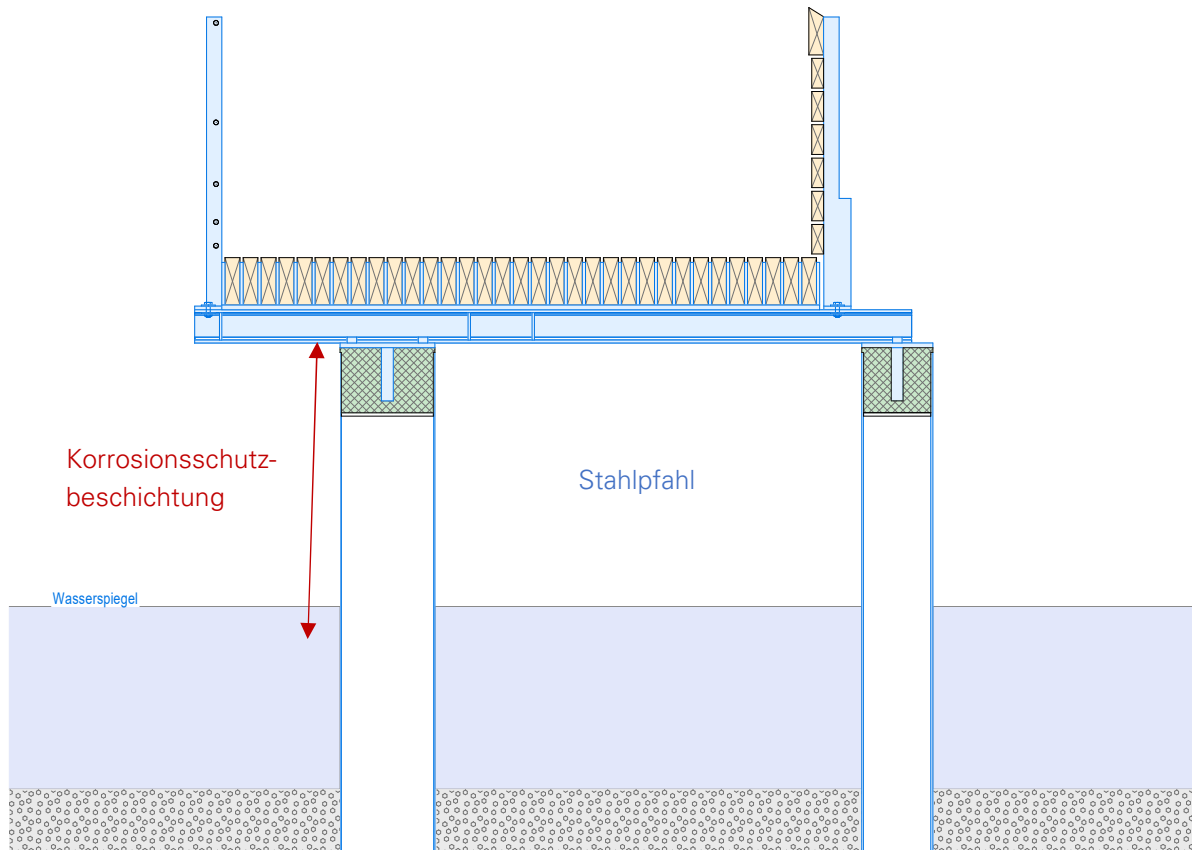


Abbildung 9: Neue Stahlpfähle

Aufgrund der geringeren Mantelreibung der Stahlpfähle müssen sie eine ca. 30 % längere Einbindung in den Seegrund aufweisen als die bestehenden Holzpfähle [2]. Damit sind die neuen Pfähle 1.5 – 2.5 m länger als die bestehenden Pfähle ($L = 7 - 15$ m). Der Gewichtsunterschied zwischen den Stahl- und Holzpfählen ist gering und führt nicht zu einem nennenswerten Unterschied bei der Einbindelänge.

Es werden Stahlpfähle mit dem gleichen Durchmesser wie die bestehenden Holzpfähle verwendet. Einerseits wird dadurch sichergestellt, dass der horizontale Pfahlwiderstand gleich bleibt und andererseits bleibt die heute vorhandene Optik mit einem grossen Hauptpfahl und einem kleineren Nebenpfahl erhalten. Die benötigte Wandstärke ergibt sich aus der statischen Beanspruchung des Steges sowie aus den Erfordernissen beim Rammvorgang. In diesem Fall wird der Bauzustand massgebend, da für das Rammen voraussichtlich eine minimale Wandstärke von 10 Millimeter vorausgesetzt wird. Damit die Pfähle nicht korrodieren und die geforderte Lebensdauer erreichen, werden sie im luftumspülten Bereich, sowie im Luft – Wasser Übergangsbereich mit einem Schutzsystem für eine Korrosivitätskategorie C4 mit langer Schutzdauer sichergestellt (z.B. Duplexsystem oder mehrschichtige Lackierung). Oberflächen, welche ständig unter Wasser oder im Erdreich sind korrodieren nicht, da kein Sauerstoff in der Umgebung vorhanden ist.

Der Anschluss des Hauptpfahls an die Tragkonstruktion der Brücke erfolgt biegesteif mittels eines eingegossenen Kopfteils analog zu der Variante in Kapitel 5.2.3. Dieses kann in den vorhandenen Hohlraum

des Stahlpfahls eingesetzt werden. Mit dem Kopfteil lassen sich geringe Schiefstellungen der Pfähle kompensieren. Das Stahlbauteil kann komplett vorgefertigt werden. Die Querträger werden mittels Trägerklemmen fixiert. Der Anschluss des Nebenpfahls erfolgt analog.

Falls der Steg nicht gesperrt wird, muss der Oberbau in Etappen ausgebaut und nach den Rammarbeiten neu eingebaut werden. Für die temporäre Fussgängerführung ist eine Hilfsbrücke notwendig. Diese ist im Abschnitt 5.4 beschrieben.

Vorteile: Die Anschlüsse an die Querträger können komplett vorgefertigt werden. Es muss somit kein Korrosionsschutz vor Ort appliziert werden. Der ganze Oberbau kann mit dem Pfahl verschraubt werden und ist somit einfach zu ersetzen.

Nachteile: Die Anschlüsse am Pfahlkopf müssen vor Ort vergossen werden, um Bautoleranzen aufnehmen zu können. Zudem verlängert die Aushärtungszeit des Betons die Bauzeit. Ausserdem steigen die Materialkosten stark an, da eine Mindestwandstärke für das Rammen der Pfähle benötigt wird, obwohl diese aus statischer Sicht wesentlich kleiner sein könnte.

Für die Rammarbeiten mit dem Ponton ist eine minimale Wassertiefe von ca. 1 m erforderlich. In Bereichen mit tieferem Wasserspiegel kann mit Baggermatratzen und einem Rammbagger gearbeitet werden. Es werden entsprechende Bewilligungen benötigt. Die Belieferung der Pfähle erfolgt, wo möglich, per Schiff. Werden die Stahlpfähle als dichte Rohre gefertigt, können sie auch schwimmend transportiert werden. Somit können sie mit einem kleinen Boot auch in die Flachwasserbereiche gezogen werden.

5.2.3 Variante neue Betonhohlpfähle

Bei dieser Variante werden die bestehenden Holzpfähle am Seegrund abgetrennt und entsorgt. Als neue Fundation werden Betonhohlpfähle gerammt. Um keinen Konflikt mit den bestehenden Pfählen zu verursachen, wird der Pfahlraster beibehalten. Die neuen Pfähle sind jeweils um eine halbe Spannweite versetzt.

Aufgrund der geringeren Mantelreibung der Betonhohlpfähle müssen sie eine ca. 25 % längere Einbindung in den Seegrund aufweisen als die bisherigen Holzpfähle [2]. Der Gewichtsunterschied, zwischen den Beton- und den Holzpfählen ist grösser als bei den Stahlpfählen. Bezogen auf die Nutzlast erfordert das Zusatzgewicht eine zusätzliche Vergrösserung der Einbindelängen um ca. 5 %. Somit müssen Betonhohlpfähle, wie die Stahlpfähle, rund 30 % länger sein als die vorhandenen Holzpfähle.

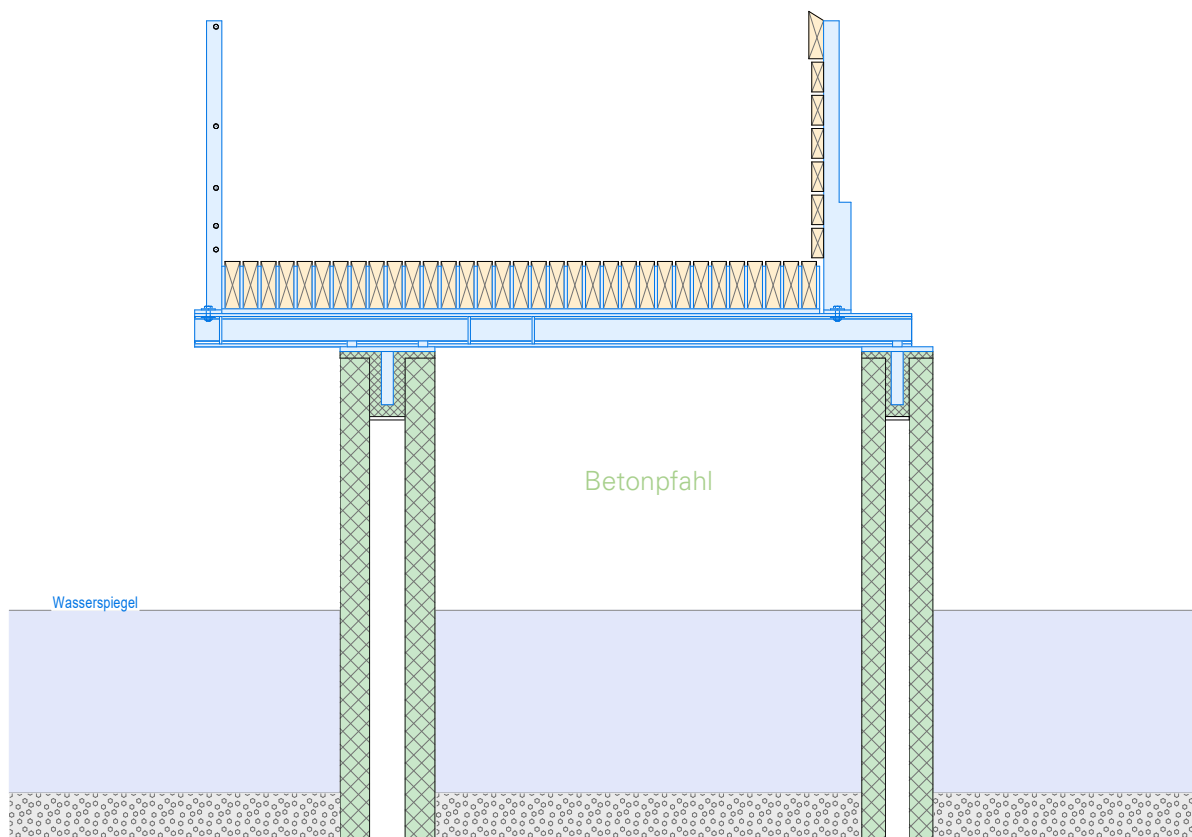


Abbildung 10: Neue Betonpfähle

Es werden Betonhohlpfähle mit ähnlichem Durchmesser wie die bestehenden Holzpfähle verwendet. Einerseits wird dadurch sichergestellt, dass der horizontale Pfahlwiderstand gleich bleibt und andererseits bleibt die heute vorhandene Optik mit einem grossen Hauptpfahl und einem kleineren Nebenseitpfahl erhalten. Aufgrund der horizontalen Beanspruchung benötigen die Pfähle eine höhere Bewehrung als bei Standardpfählen. Entsprechend müssen die Pfähle speziell für das Projekt produziert werden. Der Korrosionsschutz wird durch die vorhandene Bewehrungsüberdeckung gewährleistet.

Der Anschluss des Hauptpfahls an die Tragkonstruktion der Brücke erfolgt biegesteif mittels eines eingegossenen Kopfteils. Dieses kann in den vorhandenen Hohlraum des Betonpfahls eingesetzt werden. Mit dem Kopfteil lassen sich geringe Schiefstellungen der Pfähle kompensieren. Das Stahlbauteil kann komplett vorgefertigt werden. Die Querträger werden mittels Trägerklemmen fixiert. Der Anschluss des Nebenseitpfahls erfolgt analog.

Falls der Steg nicht gesperrt wird, muss der Oberbau in Etappen ausgebaut und nach den Rammarbeiten neu eingebaut werden. Für die temporäre Fussgängerführung ist eine Hilfsbrücke notwendig. Diese ist im Abschnitt 5.4 beschrieben.

Vorteile: Die Anschlüsse an die Querträger können komplett vorgefertigt werden. Der ganze Oberbau kann mit dem Pfahl verschraubt werden und ist somit einfach zu ersetzen. Die Betonhohlpfähle sind deutlich günstiger als Stahlpfähle. Ausserdem ist keine spezielle Oberflächenbehandlung notwendig, um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten.

Nachteile: Die Betonhohlpfähle sind deutlich schwerer als Stahl- oder Holzpfähle. Entsprechend ist der Aufwand für die Logistik etwas grösser als bei Stahlpfählen. Ein späterer Rückbau der Pfähle ist zudem aufwendiger. Allenfalls müssen die ganzen Pfähle für den Rückbau gezogen werden.

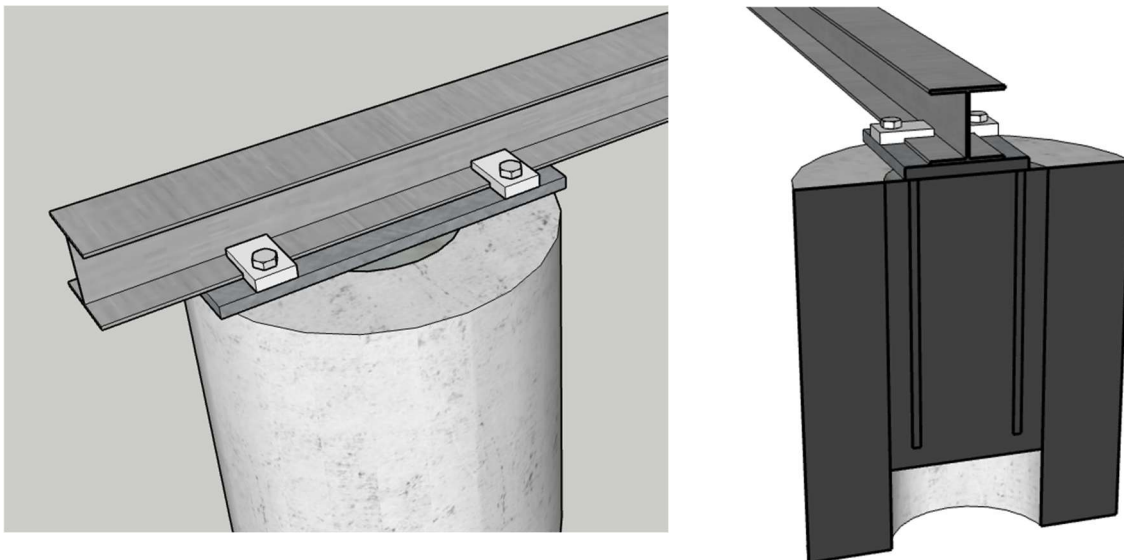


Abbildung 11: Kopfdetail Betonpfahl

Für die Rammarbeiten mit dem Ponton ist eine minimale Wassertiefe von ca. 1 m erforderlich. In Bereichen mit tieferem Wasserspiegel kann mit Baggermatratzen und einem Rammbagger gearbeitet werden. Es werden entsprechende Bewilligungen benötigt. Die Belieferung der Pfähle erfolgt, wo möglich, per Schiff. In den Flachwasserbereichen können die Pfähle mit einem grossen Bagger mit Greifer ebenfalls über die Baggermatratzen transportiert werden. Sehr lange Pfähle müssen in Einzelteilen geliefert und beim Rammen mit Manschetten verschweisst werden.

5.2.4 Variante Stahlmanschetten und Holzpfähle

Auch bei dieser Variante werden die bestehenden Holzpfähle unter Wasser abgetrennt und die befallenen Teile entsorgt. Die Pfahlteile, welche permanent unter Wasser sind, werden weiterverwendet. Anschliessend wird eine Stahlmanschette über den Pfahlstummel gesetzt und der Hohlraum mit Mörtel ausinjiziert. Dadurch entsteht ein biegesteifer Übergang zwischen Holzpfahl und Stahlmanschette. Oben in die Manschette wird ein neuer Tropenholzpfahl eingesetzt. Auch hier wird der Hohlraum zwischen Manschette und Pfahl mit Mörtel ausinjiziert. Der Oberbau wird wie bisher am Pfahl befestigt. Modifizierte Hölzer, wie das in Kapitel 5.3.5 beschriebene Accoya, können für die Pfähle nicht verwendet werden, da Querschnitte in dieser Grösse nicht vorhanden sind und verleimt werden müssten. Es bestehen jedoch Zweifel, ob eine solche Verleimung bei den vorherrschenden Feuchteschwankungen und direktem Wasserkontakt beständig sein könnte. Bei druckimpregniertem Holz liegt das Problem im stetigen Auswaschprozess welcher im Wasser langsam stattfindet. Die Flora und Fauna des Naturschutzgebietes, deren Schutz oberste Priorität hat, könnten durch die Imprägnierung Schaden nehmen.

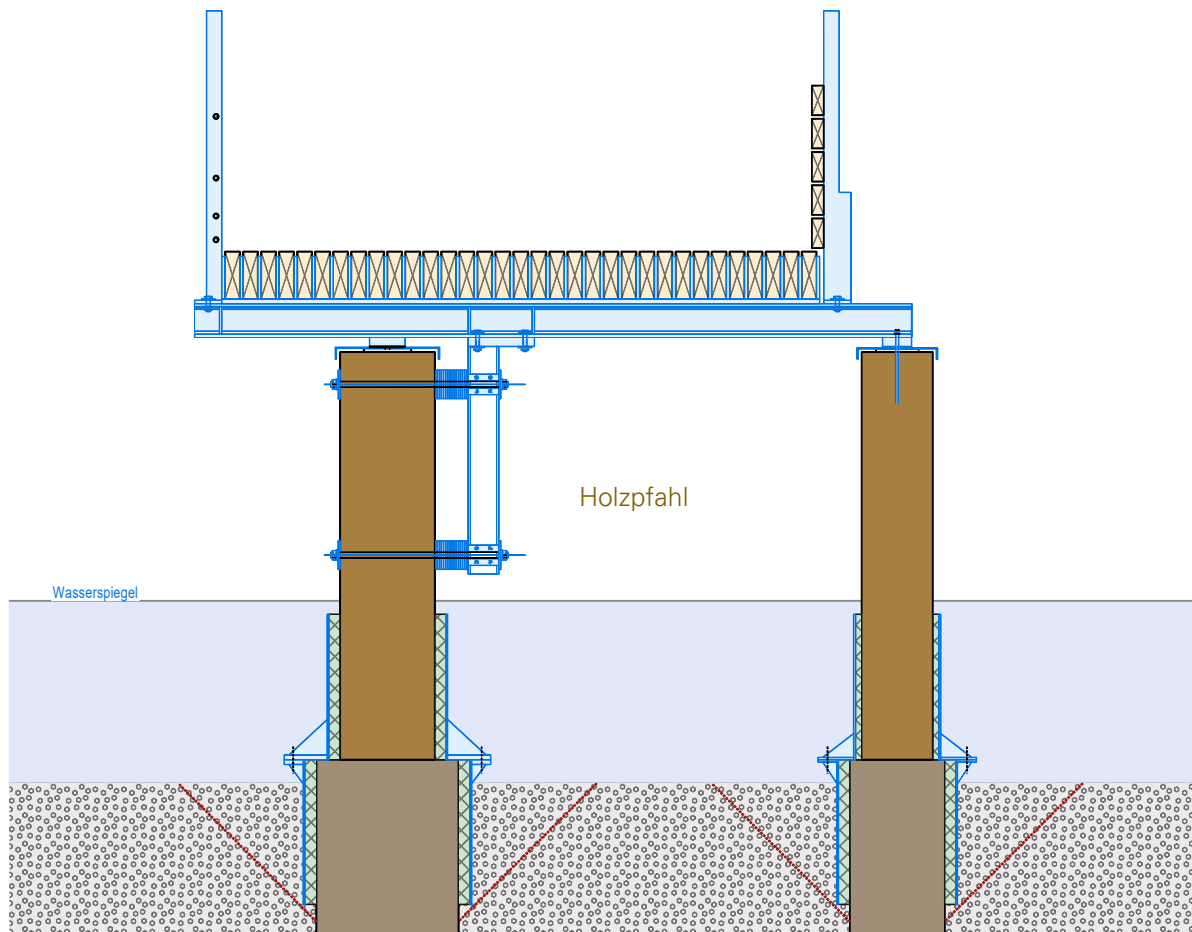


Abbildung 12: Holzpfähle mit Manschetten

Vorteile:

Es müssen keine Pfähle gerammt werden, wodurch weniger Kosten in der Montage entstehen. Bei gleichem Pfahldurchmesser bleibt die Optik, wie sie heute gegeben ist. Es sind jedoch auch kleinere Pfähle möglich. Der Oberbau wird wie bisher an die neuen Holzpfähle angeschlossen. Es wird nur so viel Tropenholz verwendet wie nötig.

Nachteile: Die Montage der Manschetten ist aufwendig und teilweise ist ein Aushub notwendig, damit die Manschette bei Niedrigwasser nicht sichtbar ist. Dies betrifft etwa ein Drittel aller Pfähle. Ausserdem sollte die Manschette, wenn immer möglich, komplett unter Wasser sein, damit das Quellen und Schwinden des Holzpfahles in der Manschette minimiert wird. Die neuen Holzpfähle bergen trotz hoher Dauerhaftigkeit wieder ein Infektionsrisiko. Die Bauzeit verlängert sich zudem leicht, weil die benötigten Pfahllängen immer erst nach dem Ausmessen des Pfahlstumpfes bekannt werden und danach auf Mass bestellt werden müssen.

Die Manschetten lassen sich mit einem Arbeitsboot transportieren, womit die Zugänglichkeit im ganzen Perimeter gegeben ist. Die Holzpfähle können aufgrund der hohen Dichte des Tropenholzes in der Regel nicht schwimmend transportiert werden. Daher müssen sie, wo möglich, mit dem Ponton oder Schiff angeliefert werden. Im Flachwasserbereich sind die Pfähle kurz und können zum Beispiel mit einem Helikopter eingeflogen werden. Alternativ kann der Transport auch über den bestehenden Steg erfolgen. Allenfalls sind dazu Hilfsmassnahmen wie Schienensysteme, Seilzüge und Hebeegeräte notwendig.

Diese Variante könnte mit dem in Abschnitt 5.4.3 beschriebenen Hilfssprengwerk während dem Betrieb ausgeführt werden. Das funktioniert jedoch nur, wenn der Oberbau geometrisch und konstruktiv unverändert bleibt. Problematisch ist, dass es im Bereich des Oberbaus durch den Kontakt von gesundem und befallenem Holz wieder zu einer Infektion kommen kann. Zudem verlängert sich durch die starke Etappierung die Bauzeit. Stattdessen könnte auch diese Variante mithilfe einer Hilfsbrücke oder Stegsperrung ausgeführt werden.

5.2.5 Variante Stahlmanschetten und Stahlpfähle

Diese Variante entspricht vom Ablauf her der Variante 3 in Kapitel 5.2.4, jedoch wird an die Stahlmanschette ein Stahlrohr angesetzt, anstelle eines Holzpfahles. Das Stahlrohr kann über eine Flanschverbindung an der Manschette befestigt werden. Für den Anschluss an den Oberbau ist eine neue Konstruktion notwendig. Diese kann mittels eingegossenen Kopfteils analog zu der Variante 1 in Kapitel 5.2.2 ausgeführt werden. Wird die Lage der Manschette nach dem Versetzen eingemessen, dann kann der Anschluss an den Oberbau bereits vorgefertigt werden. Dadurch sind vor Ort keine zusätzlichen Arbeiten notwendig.

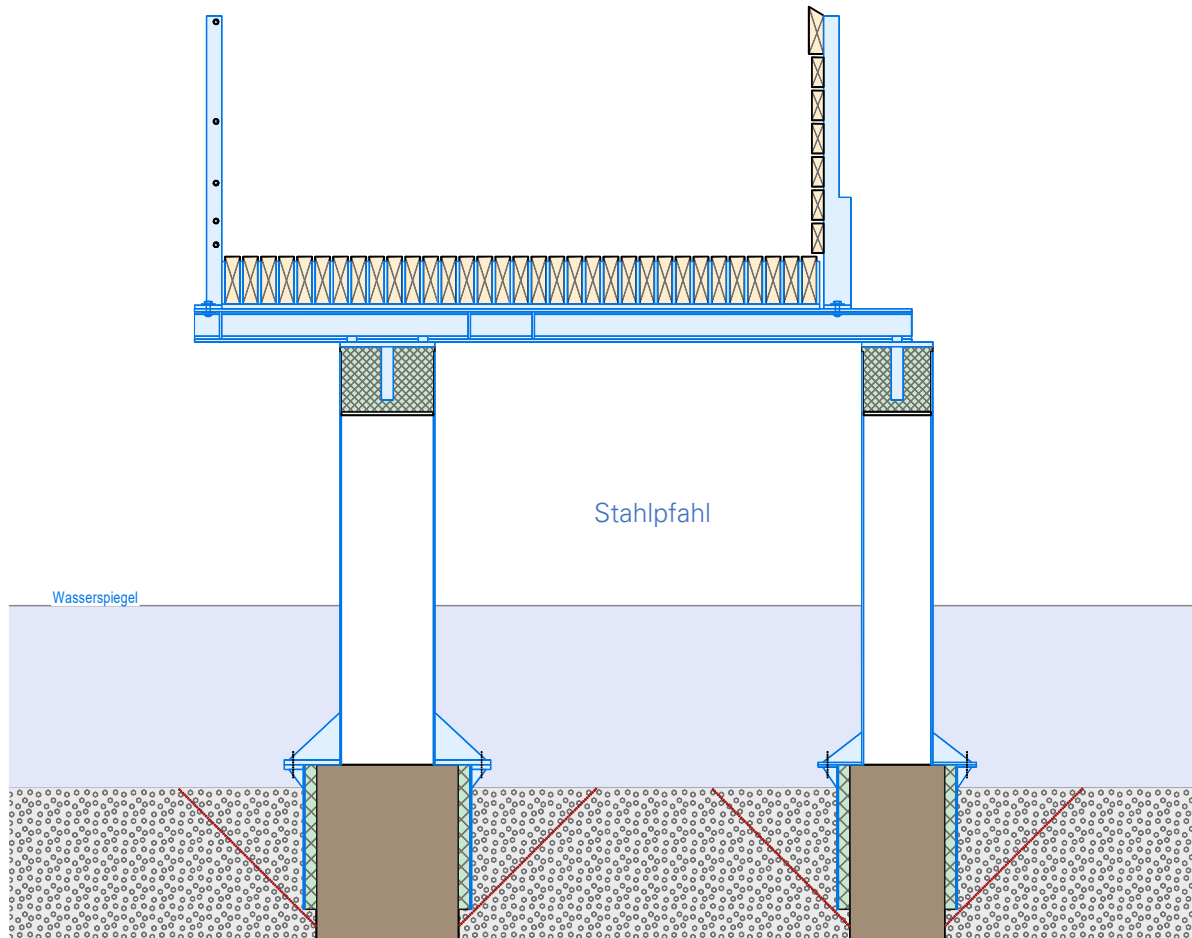


Abbildung 13: Stahlpfähle mit Manschetten

- Vorteile: Bei gleichem Pfahldurchmesser bleibt die Optik ähnlich, wie sie heute gegeben ist. Die Stahlrohre können aber auch kleiner ausgeführt werden. Durch die Flanschverbindung an der Manschette und die geschraubte Verbindung am Oberbau kann das Pfahlstück zwischen Manschette und Oberbau bei Bedarf einfach ausgetauscht werden. Es wird verhältnismässig wenig Stahl benötigt.
- Nachteile: Die Montage der Manschetten ist aufwendig. Zudem wird die Optik des Steges leicht verändert, wenn Stahl anstelle von Holz verwendet wird. In seichtem Gewässer muss rund um den Pfahl ein Aushub erstellt werden, sodass die Manschette nach der Montage ständig unter Wasser bleibt. Dies betrifft ungefähr ein Drittel aller Pfähle. Die Bauzeit verlängert sich zudem leicht, weil die benötigten

Pfahllängen immer erst nach dem Ausmessen des Pfahlstumpfes bekannt werden und danach auf Mass bestellt werden müssen.

Die Manschetten lassen sich mit einem Arbeitsboot transportieren, womit die Zugänglichkeit im ganzen Perimeter gegeben ist. Die Stahlpfähle können, wo möglich, mit dem Boot oder Ponton transportiert werden. Werden die Pfähle als geschlossene Körper ausgebildet, können sie auch schwimmend transportiert werden. So können auch die Flachwasserzonen erreicht werden. Alternativ kann der Transport auch über den bestehenden Steg erfolgen. Allenfalls sind dazu Hilfsmassnahmen wie Schienensysteme, Seilzüge und Hebegeräte notwendig. Ebenfalls ist bei geringem Gewicht ein Transport mit dem Helikopter möglich, wobei die Bauabläufe so zu planen sind, dass eine möglichst hohe Leistung erreicht wird.

Diese Variante könnte auch mit dem in Abschnitt 5.4.3 beschriebenen Hilfssprengwerk während dem Betrieb ausgeführt werden. Das funktioniert jedoch nur, wenn der Oberbau geometrisch und konstruktiv unverändert bleibt. Problematisch ist, dass es im Bereich des Oberbaus durch den Kontakt von gesundem und befallenem Holz wieder zu einer Infektion kommen kann. Zudem verlängert sich durch die starke Etappierung die Bauzeit. Stattdessen könnte auch diese Variante mithilfe einer Hilfsbrücke oder Stegsperrung ausgeführt werden.

5.3 Oberbau

5.3.1 Grundsätzliches zur Eignung von Holz

Holzarten werden entsprechend ihrer natürlichen Resistenz gegenüber Pilzen und anderen Schädlingen in unterschiedliche Dauerhaftigkeitsklassen (DK 1 – 4) eingeteilt. Dabei werden die dauerhaftesten Hölzer in die Klasse 1 eingeteilt.

Nicht nur die Dauerhaftigkeit der jeweiligen Holzart hat Einfluss auf deren Lebensdauer, sondern auch die Feuchtigkeitsexposition des verbauten Holzes. Diesbezüglich werden verschiedene Gebrauchsklassen definiert. Die Gebrauchsklasse 1 steht dabei für einen Gebrauch im trockenen Innenbereich. Im Gegensatz dazu steht die Gebrauchsklasse 5 für dauerhaften Kontakt mit Salzwasser.

Aufgrund der überraschend schlechten Resistenz der Eiche (DK 2) und den Erkenntnissen aus durchgeführten Klima- und Holzfeuchtemessungen, ist die Verwendung einer Holzart aus der höchsten Dauerhaftigkeitsklasse zu bevorzugen, um eine ausreichende Materiallebensdauer zu erreichen. Dies, obwohl der Oberbau des Steges nur der Gebrauchsklasse 3.2 zugeordnet werden muss, da er nicht in direktem Kontakt mit dem Seewasser steht [3].







Gebrauchsklassen (GK) nach SN EN 335:2013					
GK	Allgemeine Gebrauchssituation		Holzfeuchte ¹⁾	Mögliches Auftreten von Schadorganismen ²⁾	
 GK 1	Innenbereich, trocken		trocken, ständig unter 20%	- selten holzerstörende Insekten	
 GK 2	Innenbereich ³⁾ oder unter Dach, nicht der Witterung ausgesetzt. Möglichkeit der Kondensation		gelegentlich über 20%	- wie Gebrauchsklasse 1 - holzverfärbende Pilze	
GK 3	Aussenbereich, ohne Erdkontakt, der Witterung ausgesetzt	 GK 3.1	eingeschränkt feuchte Bedingungen ⁴⁾	gelegentlich bis häufig über 20%	- wie Gebrauchsklasse 2 - holzerstörende Pilze (Braun-/Weissfäule)
		 GK 3.2	anhaltend feuchte Bedingungen ⁵⁾		
 GK 4	Aussenbereich, in Kontakt mit Erde oder Süswasser		ständig über 20%	- wie Gebrauchsklasse 3 - holzerstörende Pilze (Moderfäule) und Bakterien	
 GK 5	Dauerhaft oder regelmässig in Salzwasser eingetaucht		ständig über 20%	- wie Gebrauchsklasse 4 - holzerstörende Organismen im Meer	

Abbildung 14: Gebrauchsklassen nach SN EN 335:2013 [3]

Andere Materialien als Holz werden hier nicht in Betracht gezogen, da dadurch das Erscheinungsbild des Steges wesentlich verändert werden würde. Bei einer geeigneten Materialwahl sollte das Holz zudem unter normalen Umständen in der Gebrauchsklasse des Oberbaus (offen bewittert, ohne

Erdkontakt) eine ausreichende Lebensdauer erreichen können. Im Lignatec 35/2023 sind die wichtigsten Bauhölzer aufgelistet:

Handelsname	Vierlettercode nach SN EN 13556	Dauerhaftigkeitsklassen ¹⁾ von Kernholz ²⁾ gegenüber holzerstörenden:				Eignung nach Gebrauchsklasse (siehe Kapitel 8)				
		Pilzen		Käferlarven		GK 1	GK 2	GK 3,1	GK 3,2	GK 4
		geprüft im Feld	Hausbock	Nagekäfer	Käfer					
Europäische Hölzer										
Robinie	ROPS	1-2	³⁾	D						
Europäische Eiche	QCXE	2-4	³⁾	D						
Edelkastanie	CTST	2	³⁾	D						
Europäische Lärche	LADC	3-4	D	D						
in Europa kultivierte Douglasie	PSMN	3-4	D	D						
Föhre	PNSY	3-4	D	D						
Tanne	ABAL	4	S	S						
Fichte	PCAB	4	S	S						
Bergahorn	ACPS	5	³⁾	D						
Buche	FASY	5	³⁾ ⁴⁾	S						
Esche	FXEX	5	³⁾	S						
Tropische Hölzer										
Azelia, Doussie	AFXX	1		D						
Massaranduba	MNXX	1		D						
Cumarú	DXOD	1		D						
Ipé	TBXX	1		D						
Bilinga	NADA	1		D						
Angelim vermelho	DEEX	1		D						
Itaúba	MZXX	1		D						
Iroko	MIXX	1-2		D						
Merbau	INXX	1-2		D						
in Plantagen kultiviertes Teak	TEGR	1-3		D						
Yellow balau (= Bangkirai)	SHBL	2		D						
Louro vermelho	OCRB	2		D						
Azobé (= Bongossi)	LOAL	1-2		D						
Sipo	ENUT	2-3		D						
Jatoba (= Courbaril)	HYCB	2-3		D						
Sapelli	ENCY	3		D						
Limba	TMSP	4		S						
Modifizierte und behandelte Hölzer*										
chemisch modifizierte Pinus radiata & P. sylvestris (acetyliert, furfuryliert)	CMT	1								

- * gemäss Angaben einzelner Hersteller
 TMT kann je nach Holzart und Herstellungsprozess stark variieren
 WPC kann je nach Holzart und Herstellungsprozess stark variieren
- Eignung und Vorbehalte zum Einsatz der Holzarten gemäss Anwendungsempfehlung gemäss Tabelle 24**
- ☐ geeignet
 - ☐ Die natürliche Dauerhaftigkeit ist üblicherweise ausreichend, aber unter ungünstigen Bedingungen (Anwendungsform, Detailausbildung, Klima, Exposition usw.) kann ein chemischer Holzschutz empfehlenswert sein.
 - ☐ Die natürliche Dauerhaftigkeit kann bei günstigen Bedingungen (Anwendungsform, Detailausbildung, Klima, Exposition usw.) oder bei beschränkter Nutzungsdauer ausreichend sein. Andernfalls ist ein chemischer Holzschutz notwendig.
 - ☐ Nur bei kurzer Nutzungsdauer (max. 5-10 Jahre) oder bei besonders günstigen Bedingungen (Anwendungsform, Klima, Exposition usw.) kann die natürliche Dauerhaftigkeit ausreichend sein. Ein chemischer Holzschutz ist üblicherweise erforderlich.
 - ☐ nicht geeignet

Abbildung 15: Einteilung der Hölzer in Dauerhaftigkeitsklassen [4]

In jedem Fall sollte das Holz wieder jährlich mit Antagonisten behandelt werden, da diese das Holz effektiv vor einem erneuten Befall schützen können. Falls der Neubau etappenweise erfolgt, muss zudem das Holz des alten Steges lokal, an den Kontaktstellen mit dem neuen Stegabschnitt, behandelt und unschädlich gemacht werden. So kann ein Übergreifen des Befalls, vom alten auf den neuen Stegabschnitt möglicherweise verhindert werden.

5.3.2 Tragwerksanpassungen

Um die Montagezeit zu minimieren, können Elemente vorproduziert und anschliessend versetzt werden. Nach dem Einbau der Elemente müssen nur noch die Querkraftstösse ausgeführt werden, um die Kraftdurchleitung sicherzustellen. Dies ergibt grundsätzlich zwei verschiedene Elementlängen von 4.5 m und 10.5 m.

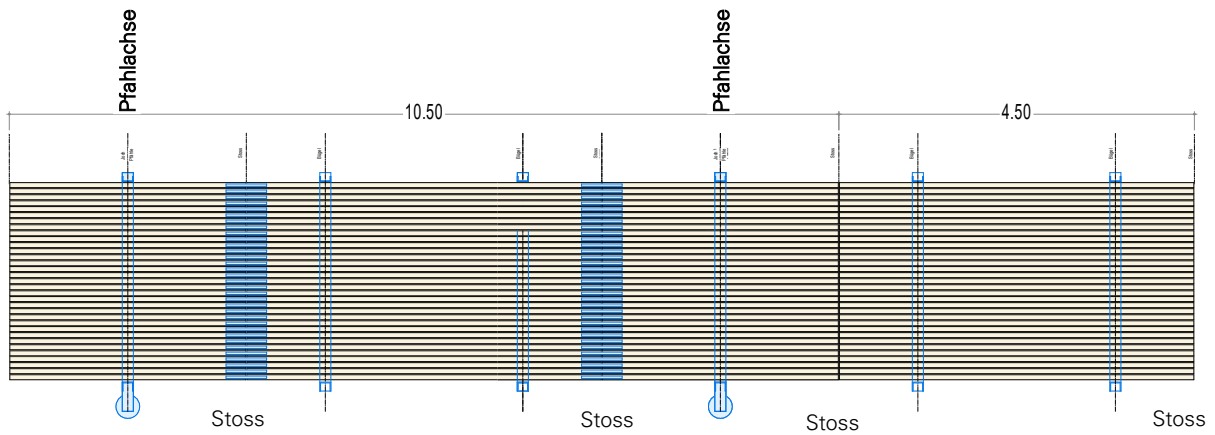


Abbildung 16: Elementierung für den Einbau [m]

Die Tragstruktur bleibt grundlegend unverändert, da auch der Pfahlraster beibehalten wird. Neben den Stahlpfehlen und deren Kopfdetails betreffen die Tragwerksanpassungen hauptsächlich die Gehweglamellen und deren Befestigung. Die Pfahlmanschetten sind stets unter Wasser und deshalb nur schlecht sichtbar.

Beim neuen Vorschlag wurde darauf geachtet, dass einzelne Lamellen mit wenig Aufwand ausgetauscht werden können, falls dies nötig wird. Um dies zu erreichen, werden die Lamellen mittels Stahlrechen mit den Bügeln verbunden. Gleichzeitig dient der Stahlrechen als Kipphalterung.

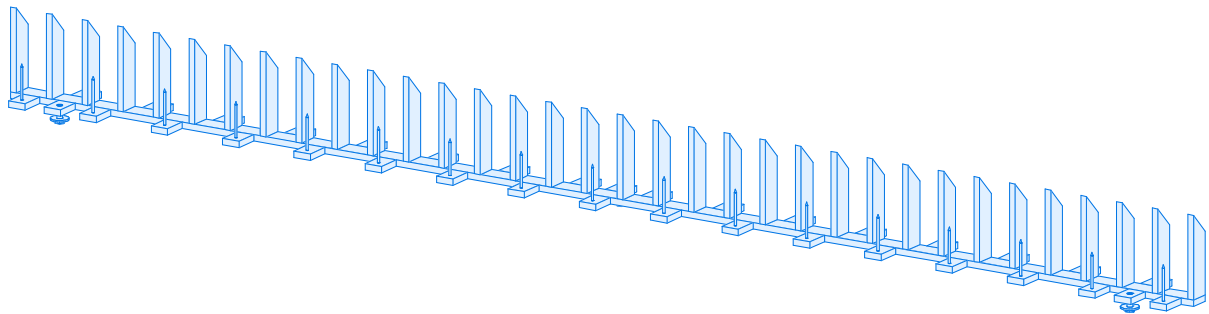


Abbildung 17: Stahlrechen Gehweglamellen

Auf Keilzinkungen und damit auf grosse Lamellenlängen wird aus Dauerhaftigkeitsgründen bewusst verzichtet, auch wenn dafür zusätzliche Stahlverbindungen benötigt werden. Um die Verfügbarkeit sicherzustellen, werden die Lamellen neu in 3 m und 4.5 m Abschnitte unterteilt, welche untereinander mit zwei verschiedenen Längsstössen verbunden werden. Längen über 5 m erschweren die Bereitstellung der Hölzer erheblich. Dadurch könnte der Preis von Accoya noch etwas sinken. Bei der eingeholten Richtofferte wurde mit grösseren Längen gerechnet.

Da bei einem sogenannten Gerbergelenk nur die Querkraft übertragen werden muss, reicht ein Schraubenkreuz dafür aus. Bei der zweiten Stossart muss dagegen noch ein Moment übertragen werden, weshalb es etwas aufwendiger ist und eine zusätzliche Stahleinlage benötigt.

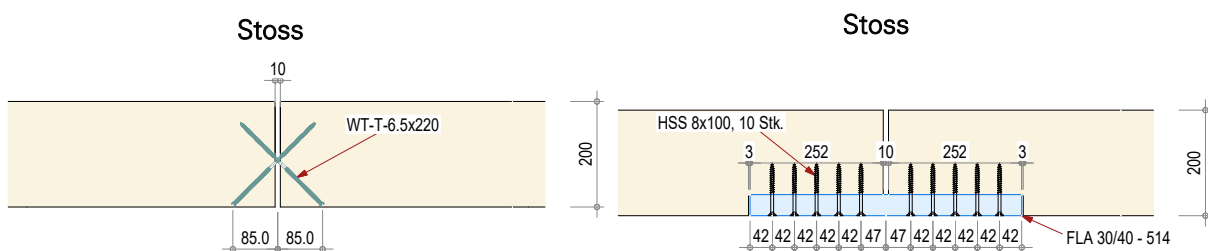


Abbildung 18: Längsstoss ohne (links) und mit Momentenübertragung (rechts) [mm]

Da es keine grundlegenden Tragwerksveränderungen gibt, können die Stahljoche wiederverwendet werden, falls die Restschutzdauer der Duplexierung ausreichend ist. Allenfalls könnte diese auch erneuert werden. Durch die Wiederverwendung der alten Stahlbauteile könnten so rund Fr. 200'000 eingespart werden, auch wenn eine Neubeschichtung nötig wird.

5.3.3 Variante Einheimische Hölzer

Als einheimische Alternativen zur Eiche, wurden Edelkastanie, Robinie und Lärche genauer untersucht. Eichenholz kommt bei einer Totalsanierung nicht mehr infrage, da das Risiko einer Kreuzkontamination zu gross ist und die Dauerhaftigkeit nicht ausreichend ist. Das Holz der Robinie und der Edelkastanie weist neben dem Eichenholz die beste Dauerhaftigkeit unter den einheimischen Hölzern auf. Bei beiden Holzarten liegt jedoch das Problem in der Verfügbarkeit der benötigten Längen und Querschnitte. Auch die Verfügbarkeit von langsam wachsender, einheimischer Lärche ist problematisch, welche erfahrungsgemäss eine gute Dauerhaftigkeit aufweist. Nach weiteren Abklärungen wurde zudem klar, dass vergleichbare Objekte (Holzsteg KKL, Seeplattform Schifffahrt Bodensee) bereits nach 10 Jahren saniert werden mussten und dauerhaftigkeitstechnisch nicht überzeugen können. Daher erscheint der Einsatz von einheimischen Hölzern hier nicht sinnvoll.

5.3.4 Variante Tropenholz

Als Alternative zu einheimischen Hölzern wie der Eiche haben verschiedene Tropenhölzer aufgrund ihrer grossen Menge an natürlichen Holzinhaltstoffen eine äusserst hohe Resistenz gegenüber Pilzen und zudem extrem gute Festigkeitseigenschaften. Dadurch könnten Querschnitte stark reduziert (fast halbiert) und Material eingespart werden. In Anbetracht dessen könnten viele Tropenhölzer als perfekte Konstruktionshölzer bezeichnet werden. Die grosse Problematik der Tropenhölzer liegt allerdings, in der schlecht kontrollierten und wenig nachhaltigen Waldwirtschaft. Es gibt zwar viele verschiedene Nachhaltigkeitszertifikate, welche jedoch aufgrund fehlender Kontrolle oder Lobbyismus nur wenig über die Nachhaltigkeit von Unternehmen aussagen. Das bekannteste und strengste Nachhaltigkeitsiegel ist das FSC – Siegel, welches weltweit gültige Standards für die Forstwirtschaft vorschreibt. Sowohl der FSC selbst, als auch viele der FSC - zertifizierten Tropenholzproduzenten stehen bezüglich der Nachhaltigkeit aber in der Kritik. Aus diesem Grund sollten bei der Wahl von Tropenhölzern zusätzliche Controllingmassnahmen in Betracht gezogen werden um die Nachhaltigkeit in der Lieferkette zu gewährleisten.

Für die Stegsanierung kommen beispielsweise die Holzarten Ipé, Greenheart oder Bongossi infrage, welche der höchsten bzw. zweithöchsten Dauerhaftigkeitsklasse zugeordnet werden. [4]

Auf Empfehlung der EMPA Dübendorf sollten Dauerhaftigkeitsversuche durchgeführt werden um die Resistenz der verschiedenen Tropenhölzer gegenüber den vorhandenen Pilzen sicherzustellen.

5.3.5 Variante Accoya

Seit einigen Jahren werden vermehrt biologisch modifizierte Hölzer im Aussenbereich eingesetzt. Beim Accoyaholz beruht die Resistenz auf einer Modifikation des Holzes mittels Essigsäureanhydrid. Durch die Bindung von Essigsäureanhydrid an offene Bindungsstellen der Holzzellen verringert sich in erster Linie die Wasseraufnahmefähigkeit, wodurch die Holzaustragsfeuchte wesentlich tiefer liegt als bei natürlichen Hölzern. Dies wiederum verhindert einen Befall durch Pilze, da diese einen Holzfeuchte von mindestens 20 % benötigen, um sich auf einem Substrat ausbreiten zu können. Das Holz wird aufgrund

der günstigen Wachstumsbedingungen in Neuseeland auf Plantagen gewonnen, anschliessend nach Europa verschifft und in den Niederlanden weiterverarbeitet. Accoya erscheint für den Oberbau in jedem Fall als sinnvolle Lösung. Erfahrungen von verschiedenen exponierten Bauwerken in den Niederlanden (siehe Brücke Sneek oder Mosesbrücke), sowie die Resultate aus verschiedenen Studien stimmen zuversichtlich [5]–[8]. Aufgrund der starken Resistenz kann Accoya ebenfalls der höchsten Dauerhaftigkeitsklasse zugeteilt werden [4]. Auf Empfehlung der EMPA Dübendorf sollten noch weitere Dauerhaftigkeitsversuche durchgeführt werden, um die Resistenz gegenüber den vorhandenen Pilzen sicherzustellen.

5.4 Bauhilfsmassnahmen

5.4.1 Einleitung

Aufgrund der Attraktivität des Stags in der Bevölkerung ist es ideal, wenn dieser während der Bauphasen in Betrieb bleiben kann. Aus bauablauftechnischer Sicht ist dagegen ein kompletter Rückbau und anschliessender Neubau zu bevorzugen. Dies würde auch das Risiko einer Kreuzkontamination des Holzes reduzieren. In den folgenden Abschnitten werden mehrere Varianten für eine Offenhaltung des Stags während der Bauphase beschrieben. Es ist jedoch kritisch zu hinterfragen, wie hoch die Mehrkosten für eine solche Massnahme sein dürfen.

5.4.2 Variante Stegsperrung

Idealerweise kann der Steg gesperrt werden, um den ganzen Steg zu ersetzen. Der Vorteil dabei ist, dass Kosten für eine temporäre Umgehung (z.B. in Form einer Hilfsbrücke) vermieden werden. Zudem wird die Bauzeit stark reduziert und somit einerseits die Kosten und andererseits die Immission auf das Naturschutzgebiet reduziert. Mit dem kompletten Rückbau wird zudem der gesamte Pilz und damit die Quelle einer möglichen Kreuzkontamination entfernt.

5.4.3 Variante Hilfssprengwerk

Bei einem Pfahlersatz mittels Manschette kann eine Hilfsbrücke und eine Stegsperrung mit einem Hilfssprengwerk umgangen werden. Das Sprengwerk entlastet und überbrückt jeweils einen einzelnen Pfahl, damit dieser saniert werden kann. Die Sanierung mithilfe dieses Sprengwerks funktioniert jedoch nur, wenn das System des Oberbaus weder geometrisch noch konstruktiv verändert wird.

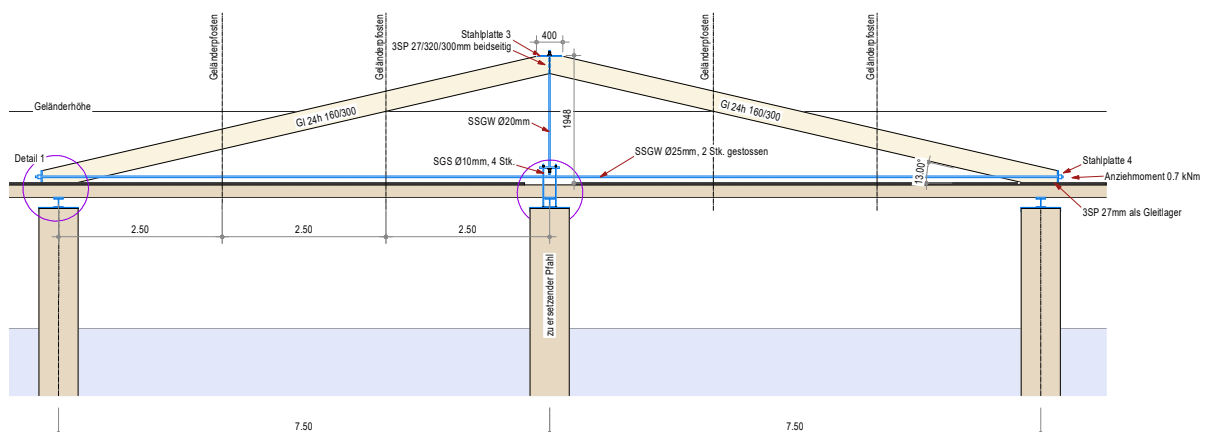


Abbildung 19: Hilfssprengwerk [m]

Die Arbeit mit einem Hilfssprengwerk zieht einen langsamen Bauablauf nach sich, da mit einem Sprengwerk immer nur ein Pfahl entlastet und bearbeitet werden kann. Mit mehreren Teams, die am Steg verteilt arbeiten, kann die Leistung erhöht werden. Das grösste Problem daran ist, dass aufgrund der Sanierungsarbeiten am geöffneten Steg immer auch ein Teil des Gehwegs durchgängig sein muss. Das bedeutet, dass altes Holz unweigerlich in Kontakt mit neuem Holz kommt und dadurch das Risiko einer Kreuzkontamination besteht. Ausserdem können so auch die Stösse der Längslamellen nicht angepasst und in ihrer Position leicht verschoben werden. Eine Verschiebung der Stösse würde die Belastung reduzieren, wodurch diese einfacher ausgebildet werden können.

5.4.4 Variante Hilfsbrücke aus Pontons

Die provisorische Fussgängerführung kann auch über eine Pontonbrücke erfolgen. Die Pontons werden parallel zum Steg verankert. Zudem wird der Gehweg entsprechend den Vorgaben mittels Geländer gesichert. Die möglichen Etappen hängen von der Anzahl eingesetzter Pontons ab. Nach dem Umbau der Etappen werden die Pontons für die neue Etappe umgesetzt und neu verankert.

Der Vorteil der Pontons ist die Flexibilität bei der Positionierung und beim Umsetzen. Allenfalls müssen hier Hilfspfähle für die Sicherung der Pontons gerammt werden. Die Pontons sind sehr teuer und nicht unbedingt für den Bau einer Hilfsbrücke ausgelegt. Entsprechend sind grosse Aufwendungen notwendig, um einen sicheren Fussweg zu erstellen. Aufgrund der Höhenunterschiede zwischen Ponton und Steg ist eine Hilfskonstruktion notwendig, um den Höhenunterschied zu überbrücken. Diese muss alle Relativbewegungen zwischen Ponton und Steg aufnehmen. Die maximale Brückenlänge ist durch die Anzahl der einsetzbaren Pontons limitiert. Der Übergang zwischen den Pontons besteht aus beweglichen Teilen, woran sich Personen möglicherweise verletzen könnten. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass dieser Übergang möglicherweise nicht behindertengerecht gestaltet werden kann.

5.4.5 Variante Hilfsbrücke aus Aluminium

Als Fundation der Hilfsbrücke dient der bestehende Hauptpfahl des Stegs und ein zusätzlicher Rammpfahl ausserhalb der Brückenachse. Als Pfahlraster können 15 m realisiert werden, wodurch für die Hilfsbrücke nur bei jedem zweiten Hauptpfahl ein Hilfspfahl notwendig ist. Der Hilfspfahl kann als Holzpfahl (z.B. Fichte) ausgebildet werden und wird nach Gebrauch am Seegrund abgetrennt oder wieder gezogen. Als Querträger können handelsübliche Stahlprofile (z.B. UNP 300 S355) mit den Holzpfählen verschraubt werden. Die Hilfspfähle und die Querträger können auf der gesamten Steglänge vorgängig gebaut werden, sodass der Oberbau flexibel mit den Arbeitsetappen versetzt werden kann. Der Abstand zum bestehenden Steg muss möglichst gross sein, um die Fussgänger während den Rammarbeiten nicht zu gefährden. Ein Abstand von Hauptpfahl zu Hilfspfahl von ca. 10 – 12 m und damit ein Abstand der Fussgänger zum Rammgerät von ca. 5 – 7 m kann realisiert werden.

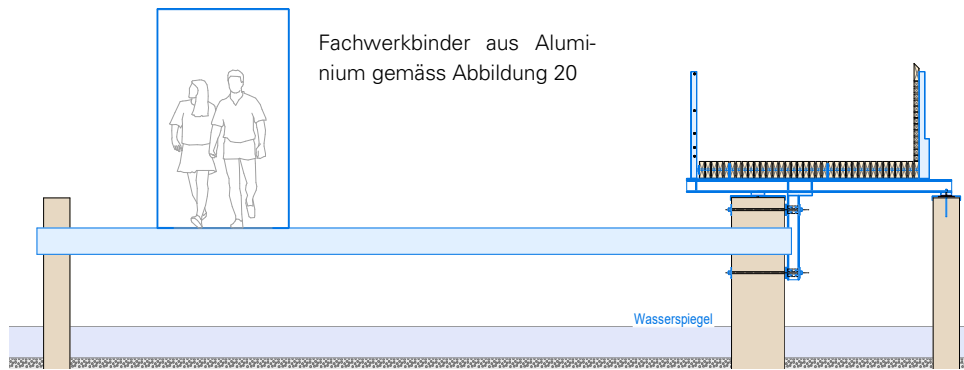


Abbildung 20: Querschnitt Hilfssteg

Der Oberbau lässt sich mit einer leichten Dienstbrücke aus Aluminium realisieren, welche bei verschiedensten Gerüstbauern erhältlich ist. Der Vorteil gegenüber einem Eigenbau besteht darin, dass Spannweiten von 15 m bei kleinem Eigengewicht möglich sind. Entsprechende Geländer und Übergänge sind bereits vorhanden und müssen nicht zusätzlich eingebaut werden. Die einzelnen Brückenelemente à 15 m können an Land zusammengebaut und am Stück vom Ponton aus erstellt werden. Damit sind Gesamtlängen von 200 m und mehr möglich, womit bei der Etappierung eine grosse Flexibilität gegeben ist. Bei einem Eigenbau wären die Brückenelemente nach der Realisierung möglicherweise nicht weiter nutzbar und würden verschrottet, was nicht im Sinne der Nachhaltigkeit ist. Der grösste Nachteil ist dagegen die teure Installation und Miete der Brücke, sowie die benötigten Hilfspfähle.



Abbildung 21: Beispiel einer leichten Dienstbrücke, Quelle: Roth Gerüste AG [9]

6 Varianten und Bewertung

6.1 Zusammenfassung Vor- und Nachteile der Teilvarianten

In nachfolgenden Abschnitt werden die Vor – und Nachteile der verschiedenen Varianten aus den Kapiteln 5.2 - 5.4 tabellarisch zusammengefasst.

6.1.1 Pfahlersatz

Tabelle 1: Variantenstudium Pfahlersatz

	Vorteile	Nachteile
V1 Stahl- pfähle	<ul style="list-style-type: none"> -Anschlüsse an Querträger können flexibel ausgebildet werden -Oberbau kann mit Pfahl verschraubt werden -> Oberbau einfach zu ersetzen 	<ul style="list-style-type: none"> -Stahloptik der Pfähle -Hoher Materialverbrauch -> Nachhaltigkeit -Aufwendige Beschichtung nötig -Beschädigungen der Beschichtung während Transport und Einbau möglich -Sehr teuer
V2 Beton- pfähle	<ul style="list-style-type: none"> -Tiefer Preis für Betonpfähle -Anschlüsse an Querträger können komplett vorgefertigt werden - Oberbau kann mit Pfahl verschraubt werden -> Oberbau einfach zu ersetzen -Kein zusätzlicher Korrosionsschutz notwendig -Flexible Pfahlkopfeinspannung 	<ul style="list-style-type: none"> -Betonoptik der Pfähle -Hoher Materialverbrauch -Hohes Eigengewicht -> erschwerte Logistik -Späterer Rückbau evtl. aufwendiger als bei Stahl- oder Holzpfählen
V3 Stahlman- schetten mit Holz- pfählen	<ul style="list-style-type: none"> -Holzoptik bleibt bestehend -geringer Materialaufwand -geringer Eingriff in die Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> -Nachhaltigkeit der Lieferkette muss kontrolliert werden -Manschette sollte komplett unter Wasser sein -> Schwinden und Quellen des Holzes -Montage der Manschetten sehr aufwendig
V4 Stahlman- schetten mit Stahl- pfählen	<ul style="list-style-type: none"> -Keine Hilfsbrücke notwendig -Nur der untere Teil der Manschette, welcher mit dem Pfahlstumpf verbunden ist, muss vollständig unter Wasser sein -> weniger Aushub notwendig -Es können kleinere Stahlrohre verwendet werden -> Materialverbrauch -Geschraubte Verbindungen -> einfacher Austausch -geringer Eingriff in die Umwelt -Kürzere und leichtere Rohre -> Einfache Logistik 	<ul style="list-style-type: none"> -Stahloptik der Pfähle -Montage der Manschetten aufwendig -Aufwendige Beschichtung nötig -Beschädigungen der Beschichtung während Transport und Einbau möglich

6.1.2 Oberbau

Tabelle 2: Variantenstudium Oberbau

	Vorteile	Nachteile
Einheimische Hölzer	-Nachhaltigkeit -Förderung einheimischer Forstwirtschaft -Günstig	-Geringe Dauerhaftigkeit -Verfügbarkeit nicht gegeben
Tropenhölzer	-Hohe Festigkeit -> kleine Dimensionen möglich -> geringeres Volumen -Gutes Austrocknungsvermögen aufgrund kleiner Dimensionen -Hohe Dauerhaftigkeit	-Nachhaltigkeit der Lieferkette muss kontrolliert werden -Nicht einheimisch -Teuer
Accoya	-Hohe Dauerhaftigkeit -Hohe Dimensionsstabilität -Biologisch abbaubar -Hersteller ist bereit weitere Versuchskosten in Form einer Gutschrift zu übernehmen	-Teuer -Nicht einheimisch (Plantagen Neuseeland) -Langzeiterfahrungswerte >25 Jahre fehlen

6.1.3 Bauhilfsmassnahmen

Tabelle 3: Variantenstudium Bauhilfsmassnahmen

	Vorteile	Nachteile
Stegsperrung	-Keine zusätzlichen Kosten für Bauhilfsmassnahmen -Sauberer und zügiger Rückbau / Neubau -Minimiertes Infektionsrisiko	-Sperrung (Opportunitätskosten aufgrund fehlender Durchgangsmöglichkeit)
Hilfssprengwerk	-Günstiger als Hilfsbrücken oder Pontons -Flexibel einsetzbar	-Es kann jeweils nur direkt an einem Pfahl gearbeitet werden -Lange Bauzeit -Oberbau müsste geometrisch und konstruktiv identisch bleiben -Keine strikte Trennung zwischen altem und neuem Holzbau -> Infektionsrisiko
Hilfsbrücke aus Pontons	-Flexibler Einsatz möglich -Alt- und Neubau über mehrere Felder hinweg getrennt -> Infektionsrisiko tiefer	-Sehr teuer -Einrichtungen für die Überbrückung der Höhenunterschiede notwendig -Kleinere Etappen als mit Aluminiumbrücke möglich -> längere Bauzeit
Hilfsbrücke aus Aluminium	-Flexibler Einsatz möglich -Alt- und Neubau über mehrere Felder hinweg getrennt -> Infektionsrisiko tiefer -Oberbau ist als Standardelement erhältlich -Etappenlänge ≥ 200 m möglich -Geländer, usw. bereits montiert	-Teure Miete -Zusätzliche Hilfspfähle sind notwendig -Sehr breiter Perimeter für Bauarbeiten

6.2 Bewertung nach Kriterien

Nachfolgend werden alle Varianten in Bezug auf verschiedene Kriterien bewertet, wobei bewusst alle Kriterien gleich stark gewichtet werden. Es werden dafür entweder Plus - oder Minuspunkte nach dem folgenden System verteilt:

--	-	0	+	++
Sehr negativ	negativ	neutral	positiv	Sehr positiv

Das Variantenstudium wird im Rahmen eines Vorprojektes durchgeführt, weshalb unterschiedliche Bauzeiten hier nicht abgeschätzt und bewertet werden.

6.2.1 Kosten

Die Kostenschätzungen beruhen teils auf Richtofferten und teils auf internen Schätzungen. Wichtiger als die absoluten Kosten sind deshalb die Relationen zwischen den verschiedenen Varianten.

6.2.1.1 Pfähle

Tabelle 4: Kostenschätzung verschiedener Pfahlersatzvarianten ± 20 % inkl. MwSt.

Kosten [Fr.]	Neue Stahlpfähle	Neue Betonpfähle	Holzpfähle Manschetten	Stahlpfähle Manschetten
Pfähle herstellen	Fr. 1'882'000	Fr. 572'000	Fr. 210'000	Fr. 227'000
Rammarbeiten	Fr. 354'000	Fr. 354'000	Fr. 0	Fr. 0
Manschetten herstellen	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 340'000	Fr. 255'000
Manschetten versetzen	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 1'416'000	Fr. 1'180'000
Kopfdetails herstellen	Fr. 236'000	Fr. 212'400	Fr. 23'600	Fr. 236'000
Total	Fr. 2'472'000	Fr. 1'138'400	Fr. 1'989'600	Fr. 1'898'000
Bewertung	-	++	-	+

6.2.1.2 Oberbau

Die Kosten für einheimische Hölzer und Tropenhölzer wurde intern grob abgeschätzt, da keine Offerten vorliegen oder die Verfügbarkeit gar nicht gegeben ist.

Tabelle 5: Kostenschätzung verschiedener Holzarten am Oberbau

Kosten [Fr.]	Einheimische Hölzer (Lärche)	Tropenhölzer (Bongossi)	Accoya
Total	Fr. 1'500'000	Fr. 1'100'000	Fr. 2'329'000
Bewertung	0	+	--

6.2.1.3 Bauhilfsmassnahmen

Tabelle 6: Kosten verschiedener Bauhilfsmassnahmen

Kosten [Fr.]	Stegsperrung	Hilfssprengwerk	Hilfsbrücke Aluminium
Total	Fr. 0	Fr. 250'000	Fr. 850'000
Bewertung	++	0	-

Die Kosten für eine Pontonbrücke sind gemäss der KIBAG AG sehr schwierig abzuschätzen. Die Ausführung der Verankerungen wäre sehr aufwendig und entsprechend wäre auch das Umsetzen der Pontonbrücke teuer. Zudem bestehe die Gefahr, dass bei Wind eine darüber gelegte Brücke beschädigt werden könnte.

6.2.2 Dauerhaftigkeit

6.2.2.1 Pfähle

Die Bewehrungsüberdeckung schützt die Armierung langfristig und effektiv vor Korrosion, weshalb Betonpfähle sehr langlebig sind. Dasselbe gilt grundsätzlich für Stahlpfähle mit Schutzsystem der Korrosivitätskategorie 4. Allerdings wird die Beschichtung durch Witterungseinflüsse langsam abgetragen. Zudem muss bei der Montage vorsichtiger gearbeitet werden, damit die Beschichtung nicht beschädigt wird. Verschiedene Tropenhölzer zählen zu den resistentesten Holzarten, die es gibt. Ein solcher Pfahl kann unter guten Bedingungen die Dauerhaftigkeit eines Stahlpfahles erreichen.

Tabelle 7: Dauerhaftigkeit verschiedener Pfahlersatzvarianten

Dauerhaftigkeit	Neue Stahlpfähle	Neue Betonpfähle	Holzpfähle mit Manschetten	Stahlpfähle mit Manschetten
Bewertung	+	++	-	+

6.2.2.2 Oberbau

Bezüglich Dauerhaftigkeit können einheimische Hölzer nicht mit Tropenhölzern oder Accoya mithalten und würden mit grosser Wahrscheinlichkeit die geforderte Materiallebensdauer nicht erreichen. Während die Dauerhaftigkeit von Tropenhölzern über deren Holzinhaltstoffe sichergestellt wird, wird bei Accoya das Befallsrisiko durch eine reduzierte Holztaugfeuchte gesenkt. Sowohl die ausgewählten Tropenhölzer als auch Accoya werden der höchsten Dauerhaftigkeitsklasse zugeordnet. Accoya besitzt den Vorteil eines minimierten Quell- und Schwindmasses, welches Rissen und damit, gerade bei liegendem Holz, Wasseransammlungen vorbeugt.

Tabelle 8: Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten am Oberbau

Dauerhaftigkeit	Einheimische Hölzer	Tropenhölzer	Accoya
Bewertung	--	+	+

6.2.2.3 Bauhilfsmassnahmen

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit haben die Bauhilfsmassnahmen Einfluss, inwiefern das Risiko einer Kreuzkontamination besteht. Ein vollständiger Rückbau oder eine strikte Trennung zwischen altem und neuem Holz kann durch eine Stegsperrung oder Hilfsbrücken erreicht werden.

Tabelle 9: Auswirkungen verschiedener Bauhilfsmassnahmen auf die Dauerhaftigkeit

Dauerhaftigkeit	Stegsperrung	Hilfssprengwerk	Hilfsbrücke Pontons	Hilfsbrücke Aluminium
Bewertung	++	--	+	+

6.2.3 Nachhaltigkeit

Aufgrund seiner Lage mitten im Naturschutzgebiet Frauenwinkel sollte die Nachhaltigkeit der Stegsanierung ebenfalls in die Entscheidung miteinfließen. Diesbezüglich wurde eine Vergleichsrechnung erstellt, in der jeweils die Umweltbelastungspunkte für einen einzelnen Hauptpfahl berechnet werden.

Für den Transportweg wurden folgende Annahmen getroffen:

Stahl: 2000 km Schiff, 1000 km LKW

Beton: 200 km LKW

Tropenholz: 10'000 km Schiff, 2000 km LKW

Für den Variantenvergleich wurden die Ökobilanzdaten des KBOB herbeigezogen. Die Umweltbelastungspunkte quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. [10]

6.2.3.1 Pfähle

Tabelle 10: Vergleich der Pfahlvarianten bezüglich mittels Umweltbelastungspunkten [UBP] [10]

[UBP]	Stahlpfahl	Betonpfahl	Holzpfahl Manschette	Stahlpfahl Manschette
Herstellung	2'592'500	1'993'340	82'560	427'033
Transport	364'968	299'708	225'064	51'786
Total	2'957'468	2'293'048	307'624	478'819
Bewertung	--	-	0	0

Es ist gut ersichtlich, dass es eine grosse Differenz zwischen den neuen Pfählen und den Pfahlaufsätsen mit Manschetten gibt. Für das Tropenholz müssten evtl. sogar höhere Werte verwendet werden, da das Holz in Afrika unter unbekanntem Bedingungen verarbeitet wird. Dadurch reduziert sich die Differenz zwischen der dritten und vierten Variante.

6.2.3.2 Oberbau

Aus nachhaltigkeitstechnischer Sicht ist einheimisches Holz zu bevorzugen, da die Transportwege kurz gehalten werden können und die einheimische Wirtschaft gestärkt wird. Nachhaltigkeit bedeutet aber nicht nur die Umweltverträglichkeit zu maximieren, sondern auch, den Ressourcenverbrauch durch eine witterungsangepasste Materialwahl zu minimieren. In Anbetracht dessen beeinflusst die schlechte Dauerhaftigkeit der einheimischen Hölzer auch die Nachhaltigkeit. Accsys zeichnet sich durch seine Nachhaltigkeit in der Produktion aus und kann dies mit verschiedensten Zertifikaten belegen (Cradle to Cradle, etc.). Die langen Transportwege von Accoya und den Tropenhölzern verschlechtern allerdings deren Bilanz.

Tabelle 11: Nachhaltigkeit verschiedener Holzarten am Oberbau

Nachhaltigkeit	Einheimische Hölzer	Tropenhölzer	Accoya
Bewertung	+	--	+

6.2.3.3 Bauhilfsmassnahmen

Hilfsbrücken oder andere Hilfseinrichtungen verschlechtern die Bilanz aller Varianten, da der Materialverbrauch steigt. Die Kosten für Massnahmen zur Errichtung von Hilfsbrücken sind nicht unwesentlich. Bei einer Stegsperrung sind keine zusätzlichen Massnahmen nötig, weshalb dies die nachhaltigste Lösung wäre. Für das Hilfssprengwerk wird nur wenig zusätzliches Material benötigt. Die Hilfsbrücken

müssten dagegen mit Hilfspfählen gesichert werden. Zudem muss immer wieder eine Verbindung zwischen Steg und Umgehung erstellt werden.

Tabelle 12: Nachhaltigkeit verschiedener Bauhilfsmassnahmen

Nachhaltigkeit	Stegsperrung	Hilfssprengwerk	Hilfsbrücke Pontons	Hilfsbrücke Aluminium
Bewertung	++	0	-	-

6.2.4 Emissionen (Eingriffe in Natur, Baulärm, usw.)

6.2.4.1 Pfähle

Pfahlaufsätze mittels Manschetten verursachen am wenigsten Emissionen, da nicht gerammt werden muss. Zudem sind bei den Stahlaufsätzen wenige Zusatzarbeiten für Anschlüsse nötig.

Tabelle 13: Emissionen verschiedener Pfahlersatzvarianten

Emissionen	Neue Stahlpfähle	Neue Betonpfähle	Holzpfähle mit Manschetten	Stahlpfähle mit Manschetten
Bewertung	-	-	0	+

6.2.4.2 Oberbau

Die Emissionen auf die Umgebung sind in jedem Fall hoch. Die Ausführung des Oberbaus hat jedoch keinen Einfluss auf die Emissionen.

6.2.4.3 Bauhilfsmassnahmen

Eine Hilfsbrücke verstärkt hingegen aufgrund von Hilfspfählen, etc. die Emissionen. Durch eine Stegsperrung wird sowohl der Einflussbereich der Bauarbeiten, als auch der Umfang der Arbeiten minimiert.

Tabelle 14: Emissionen verschiedener Bauhilfsmassnahmen

Emissionen	Stegsperrung	Hilfssprengwerk	Hilfsbrücke Pontons	Hilfsbrücke Aluminium
Bewertung	++	0	--	--

6.2.5 Sanierung während Betrieb

Eine Sanierung während dem Betrieb wäre natürlich zu bevorzugen, da der Steg täglich von vielen Personen genutzt wird. Die Sperrung des Steges verursacht zwar keine direkten Kosten, jedoch Opportunitätskosten. Eine Sanierung mittels Hilfssprengwerk kann die Sicherheit und Begehrbarkeit der Fussgänger beeinträchtigen. Die Pfahlersatzvariante und die Materialisierung des Oberbaus haben hier keinen Einfluss.

Tabelle 15: Bauhilfsmassnahmen mit oder ohne Betrieb

Emissionen	Stegsperrung	Hilfssprengwerk	Hilfsbrücke Pontons	Hilfsbrücke Aluminium
Bewertung	--	+	++	++

6.3 Qualitativer Variantenvergleich

In diesem Abschnitt werden die Bewertungen der beschriebenen Kriterien zusammengeführt und bilanziert. Die Bilanzierung aller relevanten Kriterien gibt Aufschluss über die anschliessende Wahl der Bestvariante.

6.3.1 Pfahlersatz

Tabelle 16: Qualitativer Variantenvergleich der Pfahlersatzvarianten

	Neue Stahlpfähle	Neue Betonpfähle	Holzpfähle mit Manschetten	Stahlpfähle mit Manschetten
Kosten	--	++	-	+
Dauerhaftigkeit	+	++	-	+
Nachhaltigkeit	--	-	0	0
Emissionen	-	-	0	+
Total (+) (-)	-3	2	-2	3
Rangierung	4	2	3	1

6.3.2 Oberbau

Tabelle 17: Qualitativer Variantenvergleich der Materialisierung für den Oberbau

	Einheimische Hölzer	Tropenhölzer	Accoya
Kosten	0	+	--
Dauerhaftigkeit	--	+	+
Nachhaltigkeit	+	--	+
Total (+) (-)	-1	0	0
Rangierung	3	1	1

Sowohl für die Tropenhölzer, als auch für Accoya werden von der EMPA Dübendorf weitere Expositionsversuche empfohlen, um die Dauerhaftigkeit der Holzarten gegenüber den präsenten Pilzen belegen zu können.

6.3.3 Bauhilfsmassnahmen

Tabelle 18: Qualitativer Variantenvergleich der Bauhilfsmassnahmen

	Stegsperrung	Hilfssprengwerk	Hilfsbrücke Pontons	Hilfsbrücke Aluminium
Kosten	++	0	--	-
Dauerhaftigkeit	++	--	+	+
Nachhaltigkeit	++	0	-	-
Emissionen	++	0	--	--
Betrieb	--	+	++	++
Total (+) (-)	6	-1	-2	-1
Rangierung	1	3	4	2

7 Fazit

Der Holzsteg Rapperswil – Hurden befindet sich aufgrund eines starken Pilzbefalls in einem immer schlechter werdenden Zustand. Durch Bohrwiderstands- und Klimamessungen wurde die Entwicklung des Pilzbefalls untersucht und Verstärkungen wo erforderlich vorgenommen. Eine Totalsanierung des Steges ist jedoch anhand der Erkenntnisse aus den Messungen unumgänglich.

Die Linienführung sollte unbedingt beibehalten werden, um einerseits die Störung der umgebenden Flora und Fauna zu minimieren und andererseits um ein einfaches Baugenehmigungsverfahren zu ermöglichen. Aus diesem Grund sollte auch der Querschnitt des Oberbaus möglichst unverändert bleiben.

Die Machbarkeitsstudie zeigt, dass es verschiedene Möglichkeiten für eine Totalsanierung des Holzsteges gibt. Eine dauerhafte Konstruktion mit Holzpfählen ist jedoch nur durch den Einsatz von Holzarten der höchsten Dauerhaftigkeitsklasse möglich. Trotz positiven Erfahrungen von der Kapellbrücke in Luzern muss von der Verwendung von Eichenpfählen oder anderen einheimischen Hölzern abgesehen werden.

Diesbezüglich wurde ein Variantenstudium durchgeführt, in dem folgende Varianten untersucht wurden:

Pfahlersatz:	Stahlpfähle Betonpfähle Holzpfähle mit Manschetten (Tropenholz) Stahlpfähle mit Manschetten
Materialisierung Oberbau:	Einheimische Hölzer Tropenhölzer Accoya (Modifiziertes Holz)
Bauhilfsmassnahmen:	Stegsperrung Hilfssprengwerk Hilfsbrücke aus Pontons Hilfsbrücke aus Aluminium

In Anbetracht der Tatsache, dass in einem Naturschutzgebiet gebaut wird, sollte die Nachhaltigkeit bei der Sanierung eine wesentliche Rolle spielen. Anhand des Materialverbrauchs und der Eingriffe in die Umwelt durch bauliche Massnahmen kann die Nachhaltigkeit durch die verschiedenen Pfahlersatzvarianten erheblich beeinflusst werden. Die graue Energie für einen Holzpfahl ist um einiges tiefer als für einen Beton- oder Stahlpfahl und sollte theoretisch bevorzugt werden. Für den Einschlag von Tropenholz (FSC - zertifiziert), welches für die Pfahlsanierung infrage kommen würde, sind zusätzliche Controllingmassnahmen für die Lieferkette vorzusehen.

Für die Sanierung des Oberbaus gibt es nicht viele Optionen. Dieser sollte wieder aus Holz gefertigt sein, um die Optik und das Gefühl beim Gang über den Steg zu erhalten. Aufgrund der hohen Dauerhaftigkeitsanforderungen kommen nur wenige Hölzer infrage. Aus Gründen der Verfügbarkeit (Kastanie, Robinie, Lärche) und Dauerhaftigkeit (Eiche, Lärche) können keine einheimischen Hölzer empfohlen werden. Stattdessen muss entweder auf modifizierte Hölzer oder Tropenhölzer zurückgegriffen werden. Im Vergleich von Accoya mit verschiedenen Tropenhölzern, wäre ein Oberbau aus Tropenholz aufgrund des geringeren Materialpreises und Materialverbrauchs wahrscheinlich wesentlich günstiger, aber aufgrund der Waldwirtschaft dennoch kritisch zu betrachten. In jedem Fall wird von der EMPA Dübendorf eine Überprüfung einer oder mehrerer Holzarten durch Laborversuche empfohlen, um eine zuverlässige Aussage über die Lebenserwartung des Holzes machen zu können.

Das Versetzen eines neuen Pfahls benötigt weniger Zeit, als Pfahlaufsätze mittels Manschetten zu montieren. Die Montage der Holzpfähle mittels Manschette ist am aufwendigsten, da pro Pfahl zwei Manschetten mit Injektionsmörtel vergossen werden müssen. Die Ausführung des Oberbaus beeinflusst die Bauzeit nur unwesentlich.

Es muss hinterfragt werden, ob es sinnvoll ist, den Steg während dem Betrieb zu sanieren oder ihn temporär zu sperren. Dieser Entscheid hat grossen Einfluss auf die Gesamtkosten, welche sich bei einer Sanierung im Betrieb um ca. 12 – 20 % erhöhen würden. Zudem besteht dann immer noch ein Infektionsrisiko, da die Pilzquelle (bestehender Steg) noch teilweise vorhanden ist und Pilzsporen mit der Luft auf den neuen Steg übertragen werden könnten. Bei einem vollständigen Rückbau besteht dieses Risiko nicht. Die Entscheidung, ob der Steg in oder ausser Betrieb saniert wird, hat grossen Einfluss auf die Bauzeit. Diese sollte möglichst minimiert werden, sodass in einem Zeitraum gebaut werden kann, in dem im Naturschutzgebiet weder Fische laichen, noch Wandervögel an ihrem Rastplatz gestört werden. Mithilfe einer Stegsperrung liesse sich die Bauzeit höchstwahrscheinlich auf 3 – 4 Monate begrenzen.

Die Kosten für die Totalsanierung liegen je nach Variante zwischen Fr. 4 Mio. und rund Fr. 7 Mio.. Eine Zusammenstellung der Kosten aller Varianten ist im Anhang 11.1 ersichtlich.

7.1 Empfehlung

Wir empfehlen für die Sanierung in Anbetracht der Bewertung im Abschnitt 6.2, die Eichenpfähle mit Stahlpfählen und -manschetten zu ersetzen und den Oberbau entweder mit Accoya oder Tropenholz zu realisieren. Durch den Ersatz der Holz- mit Stahlpfählen sollte die Dauerhaftigkeit des gesamten Steges erhöht werden können, da sich kein Holz mehr im kritischen Bereich des stehenden Wassers befindet. Die Dauerhaftigkeit von Accoya sollte jedoch ausreichend sein, um gemäss der Garantie von Accoya eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren zu erreichen [11].

Es gilt jedoch zu beachten, dass bei der durchgeführten Bewertung alle Kriterien gleich stark gewichtet wurden. Eine andere Gewichtung könnte andere Varianten bevorzugen. Aufgrund der grossen Preisunterschiede könnte argumentiert werden, dass die Kosten wesentlich stärker gewichtet werden sollten als die restlichen Kriterien. In diesem Fall müsste ganz klar die Variante mit Betonpfählen und Oberbau aus Tropenholz in Betracht gezogen werden. Die Schätzung beruht in diesem Fall auf der Holzart Bongossi, Ipé oder Greenheart würden etwa 1.5x höhere Materialkosten mit sich bringen.

Es wird zudem eine Sperrung und ein vollständiger Rückbau des Steges empfohlen, um das Risiko einer Kreuzkontamination zu minimieren. Gemäss Aussagen von Herrn Heeb (EMPA Dübendorf) und internen Recherchen ist das Infektionsrisiko wesentlich höher bei direktem Kontakt von befallenem und gesundem Holz als durch Pilzsporen in der umgebenden Luft.

Die empfohlene Variante mit Stahlpfählen und einem Oberbau aus Accoya würde Kosten von rund Fr. 6.2 Mio. inkl. MwSt. verursachen.

7.2 Weiteres Vorgehen

Unter der Annahme, dass Accoya gewählt wird, sollten in Absprache mit Accsys (Accoya – Hersteller) und der EMPA Dübendorf Versuchsparameter für die Expositionsversuche mit Accoya definiert und ein Zeitplan für die Versuchsdurchführung erstellt werden. Bei der Wahl einer Tropenholzart sollten ebenfalls Expositionsversuche durchgeführt werden. Im Falle von Accoya wäre eine Rückvergütung der Versuchskosten vorgesehen, falls der Steg anschliessend effektiv mit Accoya erstellt wird. Gemäss einer Offerte der EMPA Dübendorf belaufen sich die Versuchskosten je nach Umfang auf Fr. 15'000 – 25'000. Eine aktualisierte Offerte ist jedoch noch einzuholen.

Ein Terminplan wird erst im Rahmen des Bauprojektes erarbeitet. Ebenfalls müssen dann die Schichtdicken der Duplexierung der bestehenden Stahljoche stichprobenartig gemessen und überprüft werden, um deren Restlebensdauer abschätzen zu können. Nur so kann eine ausreichende Dauerhaftigkeit des neuen Steges gewährleistet werden. Versuche zur Belegung der Funktionstüchtigkeit der Pfahlmanschetten könnten ebenfalls während der Bauprojektphase durchgeführt werden.

Im Frühling 2024 sollten zudem wieder Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt werden, um die Tragfähigkeit der Pfähle zu überprüfen und die Sicherheit des Steges bis zur Totalsanierung aufrechtzuerhalten. Diese sollten bis zum Ersatz des Steges jährlich durchgeführt werden.

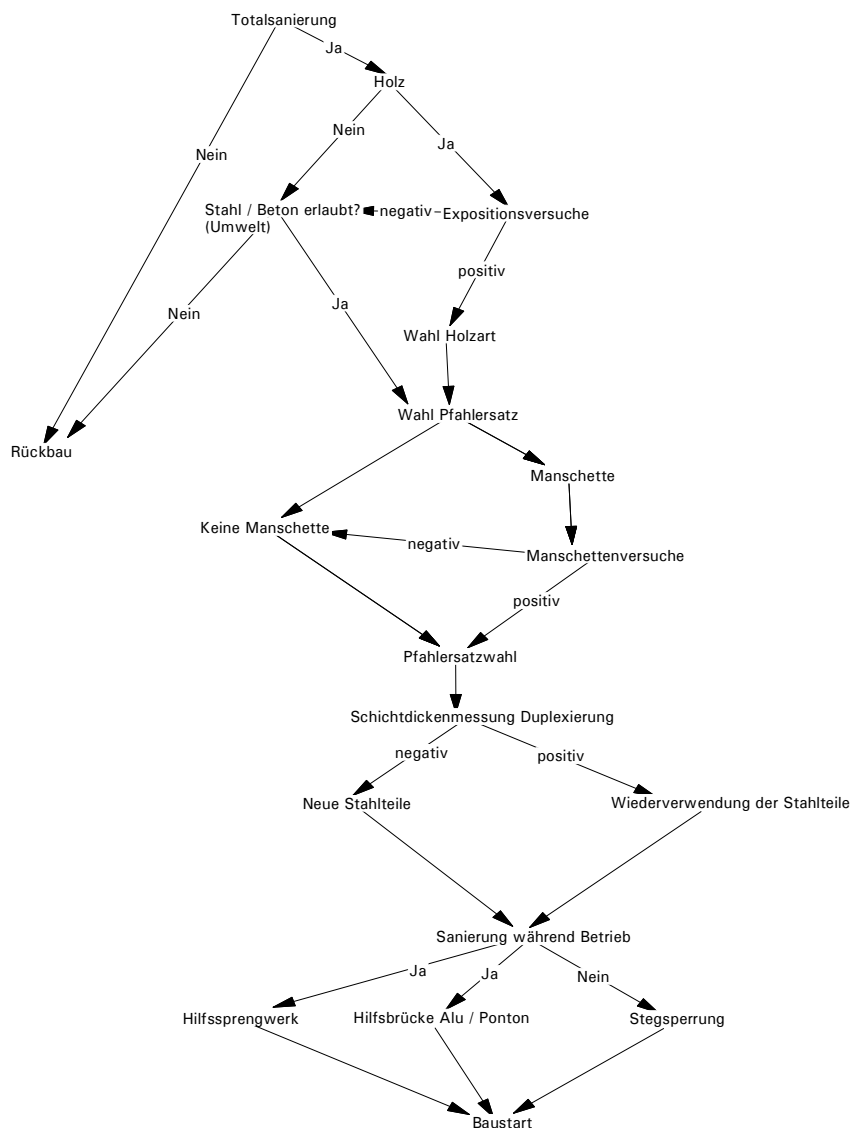


Abbildung 22: Entscheidungsbaum für das weitere Vorgehen

8 Quellenverzeichnis

- [1] Lignum, "Holzbrücken am Weg einschließlich Geschichte des Holzbrückenbaus unter Berücksichtigung neuester Entwicklungen," *Lignatec 21/2006*, pp. 14–16, 2006.
- [2] H. Canakci and F. Celik, "Interface Friction between Organic Soil and Construction Materials Waste Marble Powder View project An Investigation on The Usage of Different Types of Fly Ashes Activated with NaOH as Activator for The Stabilization of Organic Soils View project," 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/272365721>
- [3] Lignum, "Holzschutz im Bauwesen," *Lignatec 35/2023*, pp. 54–55, 2023.
- [4] Lignum, "Holzschutz im Bauwesen," *Lignatec35/2023*, p. 45, 2023.
- [5] M. E. Van Der Zee and B. F. Tjeerdsma, "Durability of acetylated Radiata Pine-investigation of the resistance against brown-, white- and soft rot fungi," 2007.
- [6] D. Trebelhorn, "Performance of Acetylated Wood in Aquatic Applications," 2021.
- [7] F. Di Sacco, M. Gahleitner, J. Wang, and G. Portale, "Durability of Accoya Wood in Ground Stake Testing after 10 Years of Exposure in Greece," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2020, doi: 10.3390/POLYM12081638.
- [8] "Kanalauskleidung - Accoya." Accessed: Jan. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.accoya.com/ch-de/projekte/kanalauskleidung-aus-accoya-holz/#project-gallery-1>
- [9] "Leichte Dienstbrücke."
- [10] KBOB ECOBAU IPB, "Oekobilanzdaten_ Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v3.0," 2022.
- [11] "Accoya® Holz-Garantieschein." [Online]. Available: www.accoya.com

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variantenstudium Pfahlersatz	30
Tabelle 2: Variantenstudium Oberbau	31
Tabelle 3: Variantenstudium Bauhilfsmassnahmen	32
Tabelle 4: Kostenschätzung verschiedener Pfahlersatzvarianten $\pm 20\%$ inkl. MwSt.....	33
Tabelle 5: Kostenschätzung verschiedener Holzarten am Oberbau.....	33
Tabelle 6: Kosten verschiedener Bauhilfsmassnahmen.....	33
Tabelle 7: Dauerhaftigkeit verschiedener Pfahlersatzvarianten.....	34
Tabelle 8: Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten am Oberbau.....	34
Tabelle 9: Auswirkungen verschiedener Bauhilfsmassnahmen auf die Dauerhaftigkeit	34
Tabelle 10: Vergleich der Pfahlvarianten bezüglich mittels Umweltbelastungspunkten [UBP] [10]	35
Tabelle 11: Nachhaltigkeit verschiedener Holzarten am Oberbau.....	35
Tabelle 12: Nachhaltigkeit verschiedener Bauhilfsmassnahmen	36
Tabelle 13: Emissionen verschiedener Pfahlersatzvarianten	36
Tabelle 14: Emissionen verschiedener Bauhilfsmassnahmen	36
Tabelle 15: Bauhilfsmassnahmen mit oder ohne Betrieb	36
Tabelle 16: Qualitativer Variantenvergleich der Pfahlersatzvarianten.....	37
Tabelle 17: Qualitativer Variantenvergleich der Materialisierung für den Oberbau	37
Tabelle 18: Qualitativer Variantenvergleich der Bauhilfsmassnahmen	37
Tabelle 19: Zusammenstellung der Kosten inkl. MwSt. aller Varianten ($\pm 20\%$)	43

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Situationsplan des Steges	5
Abbildung 2: Querschnitt des bestehenden Steges [m]	6
Abbildung 3: Göttersitz und Durchfahrt Hurden	7
Abbildung 4: Unterstützungsmassnahmen bei nicht mehr tragfähigen Pfählen.....	8
Abbildung 5: Entwicklung der nicht tragfähigen Pfähle.....	9
Abbildung 6: Klimadaten Göttersitz.....	10
Abbildung 7: Entwicklung der befallenen Pfähle.....	11
Abbildung 8: Entwicklung der jährlichen Unterhaltskosten.....	11
Abbildung 9: Neue Stahlpfähle	15
Abbildung 10: Neue Betonpfähle	17
Abbildung 11: Kopfdetail Betonpfahl	18
Abbildung 12: Holzpfähle mit Manschetten	19
Abbildung 13: Stahlpfähle mit Manschetten	21
Abbildung 14: Gebrauchsklassen nach SN EN 335:2013 [3].....	23
Abbildung 15: Einteilung der Hölzer in Dauerhaftigkeitsklassen [4]	24
Abbildung 16: Elementierung für den Einbau [m]	25
Abbildung 17: Stahlrechen Gehweglamellen	25
Abbildung 18: Längsstoss ohne (links) und mit Momentenübertragung (rechts) [mm].....	26
Abbildung 19: Hilfssprengwerk [m]	27
Abbildung 20: Querschnitt Hilfssteg	29
Abbildung 21: Beispiel einer leichten Dienstbrücke, Quelle: Roth Gerüste AG [9].....	29
Abbildung 22: Entscheidungsbaum für das weitere Vorgehen	40
Abbildung 23: Auswertung nicht tragfähiger Pfähle.....	44

11 Anhang

11.1 Kosten

Table 19: Zusammenstellung der Kosten inkl. Mwst. aller Varianten ($\pm 20\%$)

	Variante 1: Stahl- pfähle	Variante 2: Beton- pfähle	Variante 3: Holz- pfähle + Manschet- ten	Variante 4: Stahl- pfähle + Manschet- ten	Variante 1: Stahl- pfähle	Variante 2: Beton- pfähle	Variante 3: Holz- pfähle + Manschet- ten	Variante 4: Stahl- pfähle + Manschet- ten
	Accoya				Tropenholz (Bongossi)			
Installationsplatz	Fr. 50'000	Fr. 50'000	Fr. 50'000	Fr. 50'000	Fr. 50'000	Fr. 50'000	Fr. 50'000	Fr. 50'000
Rückbau und Entsorgung	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000
Pfähle herstellen	Fr. 1'880'000	Fr. 570'000	Fr. 210'000	Fr. 230'000	Fr. 1'880'000	Fr. 570'000	Fr. 210'000	Fr. 230'000
Rammarbeiten	Fr. 350'000	Fr. 350'000	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 350'000	Fr. 350'000	Fr. 0	Fr. 0
Manschetten herstellen	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 340'000	Fr. 250'000	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 340'000	Fr. 250'000
Manschetten versetzen	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 1'420'000	Fr. 1'180'000	Fr. 0	Fr. 0	Fr. 1'420'000	Fr. 1'180'000
Kopfdetails herstellen	Fr. 240'000	Fr. 210'000	Fr. 20'000	Fr. 240'000	Fr. 240'000	Fr. 210'000	Fr. 20'000	Fr. 240'000
Holzabbund	Fr. 2'300'000	Fr. 2'300'000	Fr. 2'300'000	Fr. 2'300'000	Fr. 1'100'000	Fr. 1'100'000	Fr. 1'100'000	Fr. 1'100'000
Stahlteile Oberbau	Fr. 160'000	Fr. 160'000	Fr. 160'000	Fr. 160'000	Fr. 160'000	Fr. 160'000	Fr. 160'000	Fr. 160'000
Montage Oberbau	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000	Fr. 1'020'000
Unvorhergesehenes 10%	Fr. 620'000	Fr. 490'000	Fr. 580'000	Fr. 570'000	Fr. 500'000	Fr. 370'000	Fr. 460'000	Fr. 450'000
Total exkl. Bauhilfsmassnahmen	Fr. 6'900'000	Fr. 5'400'000	Fr. 6'300'000	Fr. 6'200'000	Fr. 5'500'000	Fr. 4'100'000	Fr. 5'000'000	Fr. 4'900'000
%	168%	132%	154%	151%	134%	100%	122%	120%

11.2 Auswertung der nicht tragfähigen Pfähle

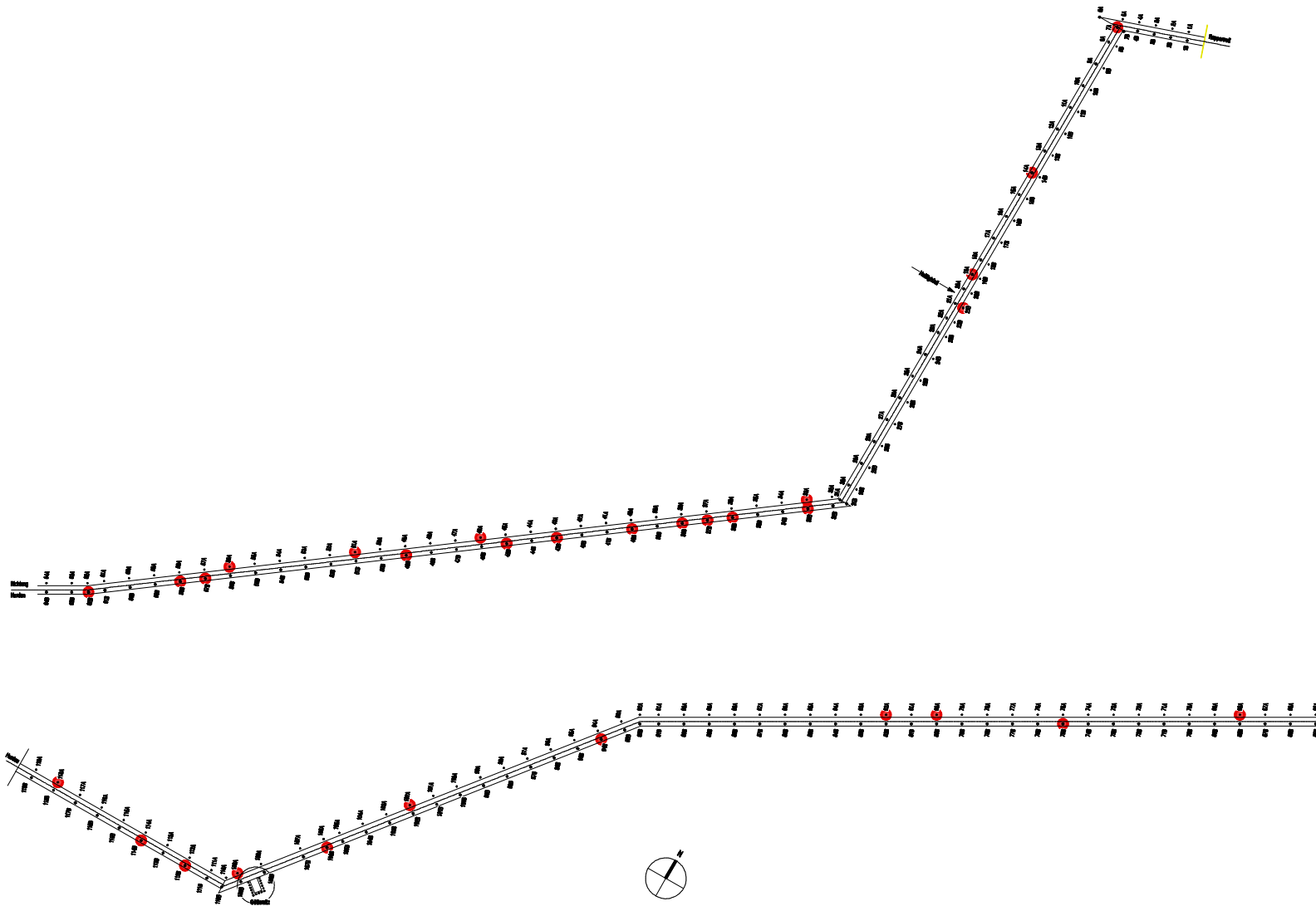


Abbildung 23: Auswertung nicht tragfähiger Pfähle