



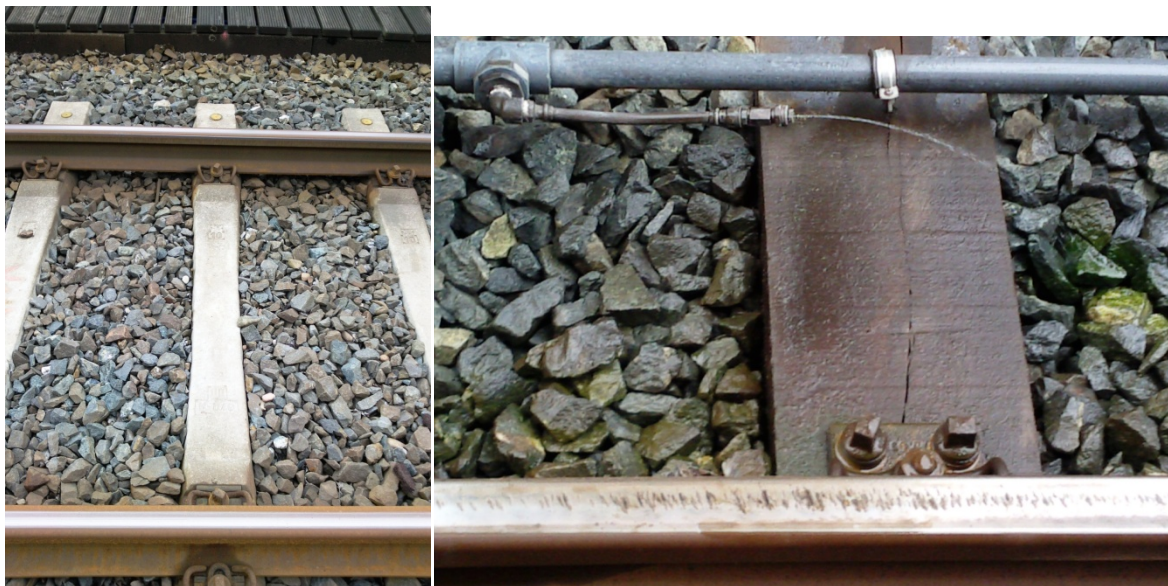
Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb



- BACHELORARBEIT -

Life Cycle Cost von verlegten Schwellen im Netz der  
Hamburger HOCHBAHN

Braunschweig, Juli 2011



Bearbeiter: Hauke Sievers, Matr.-Nr. 2938994

„Life Cycle Cost am Beispiel von frei bewitterten und im Tunnel verlegten  
Holzschwellen im Einsatz der Hamburger HOCHBAHN“

in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrswesen,  
Eisenbahnbau und -betrieb  
und der Hamburger HOCHBAHN AG

Bearbeiter: Hauke Sievers  
Hagenring 83  
38106 Braunschweig

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Siefer  
Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb  
Pockelstraße 3  
38106 Braunschweig

2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Jörn Pachel  
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung  
Pockelstraße 3  
38106 Braunschweig



01.04.2011

Sf/Ja

Bachelorarbeit

für Herrn Hauke Sievers, Matr.-Nr. 2938994

## „Life Cycle Cost am Beispiel von frei bewitterten und im Tunnel verlegten Holzschwellen im Einsatz der Hamburger Hochbahn“

### **Ausgangssituation**

Holzschwellen werden neben der mechanischen Beanspruchung durch den Bahnverkehr zusätzlich durch den natürlichen Wechsel der klimatischen Umgebungsbedingungen beansprucht. Durch die Witterungseinflüsse sind Holzschwellen anfällig für Rissbildung, Fäulnis und Zersetzung. Unbehandelte Holzschwellen haben daher sehr kurze Liegedauern von fünf bis 18 Jahren. Zur Imprägnierung werden sie mit Teeröl getränkt, um die Liegedauern auf bis zu 40 Jahre zu erhöhen. Über den Einfluss der Lage von Holzschwellen in witterungsgeschützten Bereichen wie Tunneln auf die genannten Folgen der Witterungsbeeinflussung ist bisher wenig bekannt.

In großen Teilen des Netzes der Hamburger Hochbahn liegen Holzschwellen. Diese befinden sich zum Teil in Tunneln.

### **Untersuchungsziele**

In dieser Bachelorarbeit soll erörtert werden, wie sich die Lage der Holzschwellen auf die Liegedauer und damit die LCC auswirkt. Dafür sind die Eigenschaften von Holzschwellen zu erörtern und dabei die lageabhängigen Liegedauern, die sich durch die trockene Lage im Tunnel und die frei bewitterte Lage außerhalb von Tunneln ergeben, besonders zu berücksichtigen.

Anschließend sind die LCC der Holzschwellen mit denen von Betonschwellen zu vergleichen und zu bewerten.

Es soll eine Prognose der Instandhaltungskosten für die Holzschwellen im Netz der Hamburger Hochbahn und eine Empfehlung für eine kostenoptimierte Materialwahl gegeben werden.



Abschließend sind die Ergebnisse der Bachelorarbeit zusammen zu fassen und ein Ausblick zu formulieren. Die Ergebnisse sind in einer Präsentation vorzustellen.

### **Arbeitsprogramm**

- Auftaktgespräch und Terminabstimmung mit den Betreuern bei der Hamburger Hochbahn
- Literaturrecherche
- Kurze Erörterung der Eigenschaften von Holzschwellen, mit besonderem Schwerpunkt auf Liegedauer und Kosten (Material, Herstellung und Instandhaltung) und Einflüssen durch die Witterung
- Vergleich der im Tunnel und außerhalb von Tunneln verlegten Holzschwellen
- Vergleich der LCC von Holz- und Betonschwellen
- Bestandsaufnahme des Schwellenmaterials an ausgewählten Streckenabschnitten der Hochbahn und Prognose der Instandhaltungskosten unter Empfehlung einer kostenoptimalen Materialwahl
- Zusammenfassung und Ausblick
- Präsentation der Arbeit

### **Literaturempfehlungen**

- Hempe, T.; Lillie, D.; Lepke, D.; Peterson, L.-A., Liegedauer von Holzschwellen in Tunneln der Hamburger Hochbahn AG, Der Eisenbahningenieur 2/2006; Seite 46-50

### **Zur Verfügung gestelltes Material**

- Datenbestand des Hochbahn Fachbereich BIB2

Die Ergebnisse der Arbeit sind nachvollziehbar darzustellen. Vom Bericht sind vier gebundene Exemplare sowie ein Exemplar in digitaler Form auf CD am IVE abzugeben. Das „Merkblatt zur Erstellung studentischer Arbeiten am IVE“ ist zu berücksichtigen.

Als Ansprechpartner stehen bei der Hamburger Hochbahn Herr Dipl.-Ing. Gaulrapp und am IVE Frau Dipl.-Ing. Jakob zur Verfügung. Häufige Rücksprachen mit den Betreuern sind erwünscht.



Bearbeitungsumfang: 15 Wochen

Tag der Ausgabe:

Tag der Abgabe:

Prof. Dr.-Ing. Th. Siefer

Als Zweitprüfer wird Herr Prof. Dr.-Ing. Jörn Pachtl benannt.

## **I. Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Einleitung</b>	1
<b>2. Aufbau des Fahrwegs</b>	3
2.1 Oberbau	4
2.2 Schotteroberbau	5
2.3 Feste Fahrbahn	6
<b>3. Die Schwelle</b>	8
3.1 Aufgaben der Schwelle	9
3.2 Die Holzschwelle	11
3.3 Die Betonschwelle	14
3.4 Die Stahlschwelle	17
<b>4. Schwellenmaterial im Netz der Hamburger HOCHBAHN</b>	19
4.1 Holzschwellen bei der HOCHBAHN	20
4.1.1 Herstellung von Holzschwellen	22
4.2 Vergleich der verlegten Holzschwellen	23
4.2.1 Holzschwellen in Tunneln der HOCHBAHN	24
4.2.1.1 Ergebnisse der Schwellenuntersuchung	26
<b>5. Betonschwellen bei der HOCHBAHN</b>	30
5.1 Herstellung von Spannbetonschwellen	31
<b>6. Life Cycle Kosten von Holz- und Betonschwellen</b>	34
6.1 Lebenszykluskosten	34
6.1.1 Rahmenbedingung der LCC-Betrachtung	35
6.1.2 Kalkulation der LCC	37
6.1.2.1 Kalkulationsdaten	37
6.1.2.2 Buchenholzschwellen in der 70er Teilung	38
6.1.2.3 Spannbetonschwellen in der 70er Teilung	40

6.1.2.4 Buchenholzschwellen in der 65er Teilung	41
6.1.2.5 Spannbetonschwellen in der 65er Teilung	43
6.1.3 Interpretation und Fazit der LCC Analyse	44
6.2 LCC von Holzschwellen im Tunnel	47
<b>7. Bestandsaufnahme des Schwellenmaterials</b>	<b>49</b>
7.1 Betrachtung und Analyse der Streckenabschnitte	49
7.1.1 Tunnelstrecke Rathaus – Rödingsmarkt	49
7.1.2 Viaduktstrecke Rödingsmarkt	50
7.1.3 Freistrecke Ohlsdorf	53
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>55</b>
<b>9. Literaturverzeichnis</b>	<b>56</b>

## **II. Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Abbildung des Fahrwegs	3
Abbildung 2: Schematischer Aufbau der wesentlichen Gleisformen	4
Abbildung 3: Konstruktionstypen der Festen Fahrbahn	7
Abbildung 4: Druckverteilung der Radkraft über die Systemkomponenten	9
Abbildung 5: Beispielhafter Querschnitt einer Holzschwelle	11
Abbildung 6: Spannbetonschwelle B 70 W 60	16
Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung einer Y-Stahlschwelle	18
Abbildung 8: Feuchteverteilung der Schwellen der Abstellanlage Horner Rennbahn	27
Abbildung 9: Spannbetonschwelle B 70 W mit Stromschienenträger	30
Abbildung 10: Spannbetonschwelle für Führungsschiene	33
Abbildung 11: Holzschwelle mit Sprinkleranlage	51
Abbildung 12: Betonschwellen im Netz der HOCHBAHN	53

## **III. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Anwendungsbereiche der Holzschwellen bei der HOCHBAHN	20
Tabelle 2: Abmessung von Schwellen (Holz und Beton)	21
Tabelle 3: Kalkulationsdaten	37
Tabelle 4: Vergleich der Kosten	44
Tabelle 5: Betonschwellen inklusive Instandhaltungskosten	46

## 1. Einleitung

Die Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) ist das bedeutendste Verkehrsunternehmen Hamburgs und der größte Partner im Hamburger Verkehrsverbund (HVV).

Mit 3 U-Bahnlinien (U1, U2, U3) und den über 100 Buslinien bietet die HOCHBAHN, mit ihren mehr als 4300 Mitarbeitern, ein hohes Mobilitätsangebot und gilt als eines der modernsten Nahverkehrsunternehmen in Europa. Zur Zeit befindet sich eine weitere U-Bahnlinie (U4) im Bau, die Europas größtes Stadtentwicklungsprojekt, die HafenCity, mit der Innenstadt verbindet und im Herbst 2012 fertiggestellt werden soll. Täglich befördert die HOCHBAHN so mehr als eine Millionen Menschen mit Bus und U-Bahn.

Im Streckennetz liegen ca. 204 km Betriebsgleise, wobei die U1 mit 109 km den größten Anteil hat. Weiterhin sind 45 km in Betriebshof- und Werkstätten- bzw. auf Kehr- und Abstellgleisen verlegt. Die Linien verlaufen zu über 90 % auf Dämmen, Einschnitten und Tunneln. Ein verhältnismäßig geringer Teil (9 km) ist auf Brücken und Viadukten verbaut, wobei der Großteil hierbei aus Stahl besteht. Durch die insgesamt hohe Stückzahl von über 400 sind diese Brücken und Viadukte jedoch prägend für das Hamburger Stadtbild und gaben der HOCHBAHN letztendlich auch ihren Namen.

Das hochfrequentierte und teilweise fast 100 Jahre alte Streckennetz muss 24 Stunden am Tag funktionstüchtig sein. Modernisierung, Instandsetzung und -haltung ist dabei ein wesentlicher Faktor. Die Züge der HOCHBAHN, die bei 1435 mm Regelspur eine Maximalgeschwindigkeit von 80 km haben, werden durch eine Stromschiene mit 750 V Gleichspannung bedient. Zwischen 1963 und 1978 sind die Fahrschienen von S36 auf S49 umgerüstet worden. Als Oberbauart sind bei der HOCHBAHN Querswellen vorherrschend. Nur in wenigen Bereichen ist der Oberbau in Form der Festen Fahrbahn konzipiert. Bis 1991 sind in Haupt- und Nebengleisen auf freier Strecke, sowie in Tunneln Kiefernholzswellen eingebaut worden, seit 1992 auf Freistrecken aufgrund der höheren technischen Liegedauer und des angepassten Preises Buchenholzswellen. Die HOCHBAHN hat ab 1998 angefangen ebenfalls Betonswellen in ihrem Streckennetz zu verbauen.

In Anlehnung an die Standardbetonschwelle der Deutschen Bahn AG (DB AG) sind auf rund 19 km Spannbetonswellen des Typs B 70 W verlegt worden. Durch die längere technische Nutzungsdauer der Betonswellen im Vergleich zu den Holzswellen sowie

deutlich verringerten Instandhaltungskosten durch eine höhere Beanspruchbarkeit sollen die Spannbetonschwellen einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben und auch in Zukunft die Holzschwelle auf Freistrecken ersetzen. In Tunnelstrecken ist ein Einbau von Betonschwellen nicht angedacht, da Holzschwellen bedingt durch die guten klimatischen Verhältnisse eine lange Liegedauer aufweisen und ein Einbau von Betonschwellen durch das geringe Lichtraumprofil sehr problematisch ist.

Die folgende Arbeit beinhaltet einen allgemeinen Überblick über Oberbauarten und verschiedene Schwellenmaterialien und geht dann speziell auf die Schwellenarten im Netz der Hamburger HOCHBAHN über. Schwellen im Tunnel und auf Freistrecken werden verglichen und die Lebenszykluskosten der Holzschwellen denen der Betonschwellen gegenüber gestellt. In einer abschließenden Bestandsaufnahme des Schwellenmaterials an drei verschiedenen Streckenabschnitten wird eine Prognose der Instandhaltungskosten gegeben und Alternativen in der Materialwahl aufgezeigt.

Ziel dieser Ausführung ist es, die Abhängigkeit der Lage und der damit verbundenen Liegedauer auf die Life Cycle Cost von Holz- und Betonschwellen aufzuzeigen und eine mögliche Kostenoptimierung durch den Einsatz von Spannbetonschwellen im Netz der HOCHBAHN zu prognostizieren.



## 2.1 Oberbau

Der Oberbau muss die durch den Rad-Schiene-Kontakt entstehenden statischen, quasistatischen und dynamischen Kräfte ohne bleibende Verformung aufnehmen und in den Untergrund weiterleiten können. Dabei spielen die statischen Kräfte, hervorgerufen durch die Gewichtskraft des Fahrzeuges, die größte Rolle. Zusätzlich treten speziell bei Bogenfahrten quasistatische Kräfte durch die Flieh- und Führungskräfte auf, die in lateraler Richtung wirken sowie dynamische Kräfte durch das Bremsen und Anfahren der Fahrzeuge oder durch Unstetigkeitsstellen im Gleis.

Im Allgemeinen kann zwischen zwei Oberbaukonstruktionen unterschieden werden, dem Schotteroberbau und dem der Festen Fahrbahn. Beim Schotteroberbau sind die Schwellen aus Holz, Beton oder Stahl in der Bettung „schwimmend“ gelagert, wohingegen bei der Festen Fahrbahn die Schienen entweder auf einer Schwelle oder direkt auf der Beton- oder Asphalttragschicht montiert werden.

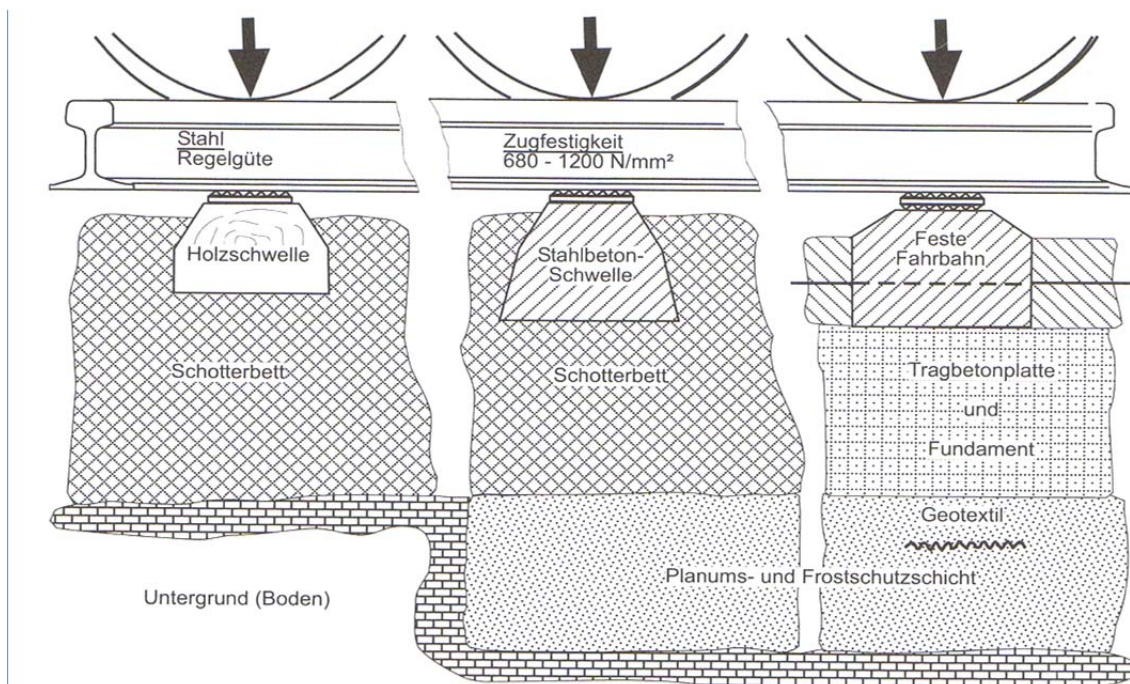


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der wesentlichen Gleisformen<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> siehe Lichtenberger, Bernhardt: Handbuch Gleis – Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit, Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, Hamburg 2004, Seite 30

### 2.1.1 Schotteroberbau

Der Schotteroberbau ist eine weit verbreitete Art der Oberbauform. Unabhängig davon mit welcher Schwellenart gearbeitet wird, ergeben sich durch die „schwimmende“ Lagerung der Schwellen in der Bettung hohe Anforderungen an den Schotter. Um die Lasten, die durch die Schwelle in die Bettung eingetragen werden, aufnehmen zu können und möglichst gleichmäßig in den Untergrund weiterzuleiten, muss der verwendete Schotter eine hohe Rauigkeit und Kantigkeit sowie eine große Zähigkeit und Druckfestigkeit aufweisen. Dabei ist zu gewährleisten, dass die Bettung einen hohen Widerstand gegenüber der Quer- und Längsverschiebung der Schwellen bietet und sie somit in sicherer Lage gehalten werden. Zur Vermeidung von Frostschäden und um die Tragfähigkeit des Untergrundes nicht zu gefährden, hat der Schotter eine gute Wasser- und Luftdurchlässigkeit aufzuweisen, wobei die Möglichkeit zur Korrektur durch Richt- und Stopfarbeiten stetig gegeben sein muss.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wird Gleisschotter aus gebrochenem Hartgestein (Basalt, Granit und Diabas) verwendet. In Deutschland kommt Granit am häufigsten zum Einsatz. Die richtige Zusammensetzung ist für die Qualität von großer Bedeutung. So sollte der Schotter hauptsächlich aus groben, unregelmäßigen und scharfkantigen Stücken mit Durchmesser zwischen 15 mm und 63 mm bestehen. Bei der Hamburger HOCHBAHN kommt Hartgesteinschotter mit der Korngröße 22,4/63 mm zum Einsatz.<sup>3</sup>

Eine weitere Schotterform ist der Rundsotter. Dieser wird hauptsächlich in gesteinsärmeren Ländern eingebaut um Transportkosten zu minimieren. Durch die im Verhältnis zum gebrochenen Hartgesteinschotter deutlich geringere Verzahnung, weist der Rundsotter eine erheblich schlechtere Gleislagestabilität auf. Setzungen und Kornumlagerungen sind die Folge.<sup>4</sup>

Ein großer Vorteil der Oberbaukonstruktion mit Hartgesteinschotter liegt darin, dass die einwirkenden Kräfte gleichmäßig verteilt in den Untergrund weitergeleitet werden und dieser somit nicht so stark belastet wird wie beispielsweise bei der Festen Fahrbahn.

---

<sup>3</sup> siehe RUO – Richtlinie für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg, Teil 3. Oberbau. 10/2004, Kapitel 1.2.1 (RUO, Teil 3. Kapitel)

<sup>4</sup> siehe Bauen im Betrieb – Vorlesungsumdruck 2011

Setzungsunterschiede können schnell behoben und Überhöhungen angepasst werden. Ein variabler Schwellenaustausch ist möglich.

Durch steigende Achslasten und höhere Frequentierung der Strecken kann es allerdings zu einem erhöhten Schotterverschleiß kommen. Um einer Veränderung der Gleislage durch Kornabrieb, Kornzerstörung und/oder Kornumlagerungen entgegen zu wirken oder um den ordnungsgemäßen Gleiszustand wieder herzustellen, sind bei dem Schotteroberbau verschiedene Instandhaltungsmaßnahmen notwendig. Diese erstrecken sich von kleineren Durcharbeitungen über Bettungsreinigung, Planumsverbesserung und Schotterbettverdichtung bis hin zum vollständigen Materialaustausch.

Speziell im Hochgeschwindigkeitsverkehr stellt die Feste Fahrbahn eine mögliche Alternative gegenüber dem Oberbau mit Schotter und Schwelle dar, allerdings ist der Schotteroberbau zur Zeit wirtschaftlicher und verlässlicher.

### **2.1.2 Feste Fahrbahn**

Speziell im japanischen Hochgeschwindigkeitsverkehr wurden die Entwicklungen vorangetrieben, da es durch die schnell fahrenden Züge immer wieder zu Schotterflug kam, der die Fahrzeuge beschädigt und zusätzlich eine Gefahr für Mensch und Tier darstellt. Bei der Festen Fahrbahn wird der Schotter als lastverteilendes Element durch ein anderes lagesicheres Material wie Asphalt oder Beton ersetzt.<sup>5</sup>

In Deutschland haben sich verschiedene Systeme etablieren können und werden auch im Netz der Deutschen Bahn verwendet z.B. (Bauart Rheda, Züblin, SATO FFYS)

Grundsätzlich kann bei den Bauarten der Festen Fahrbahn zwischen zwei Systemen unterschieden werden.

- die Lagerung auf Stützpunkten
- die kontinuierliche Lagerung

---

<sup>5</sup> siehe Jochim, Haldor und Lademann, Frank: Planung von Bahnanlagen, Grundlagen – Planung – Berechnung, Carl Hanser Verlag, München 2009, S.110-111

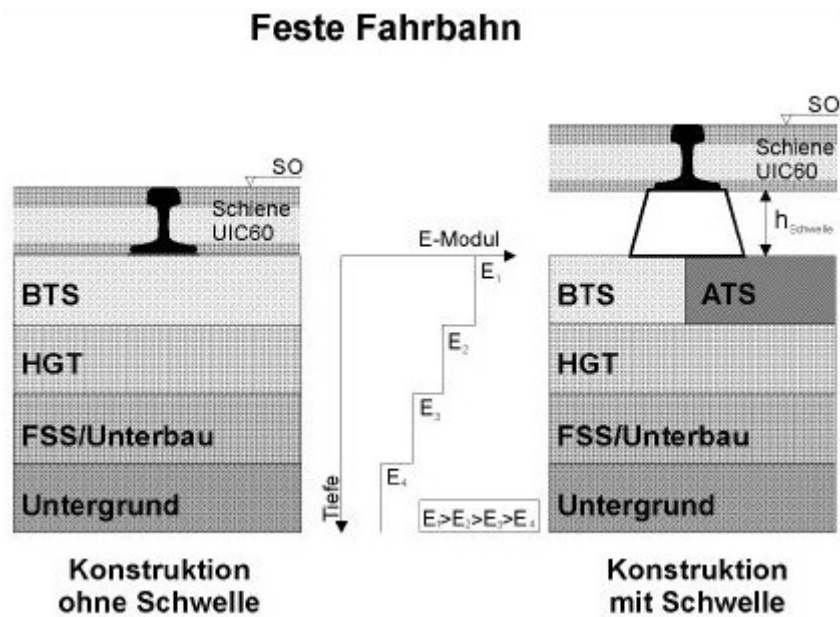


Abbildung 3: Konstruktionstypen der Festen Fahrbahn<sup>6</sup>

Da die Feste Fahrbahn hauptsächlich für den Hochgeschwindigkeitsverkehr interessant ist und für die Hamburger HOCHBAHN eine untergeordnete Rolle spielt, wird in dieser Arbeit nicht weiter auf das Thema eingegangen. Es ist lediglich zum Vergleich der verschiedenen Oberbaukonstruktionen mit aufgeführt.

<sup>6</sup> siehe Bauen im Betrieb - Vorlesungsumdruck, 2011

### 3. Die Schwelle

Die erste Eisenbahn in Deutschland fuhr 1835 von Fürth nach Nürnberg auf Flachschiene mit rechteckigem Querschnitt, die auf mindesten 2 Schwellen aufgelagert waren. Der Fahrweg des „Adlers“ wies eine Regelspur von 1435 mm auf, die bis heute beibehalten wurde. Die Schienen waren auf hölzernen Längsschwellen aufgelagert, die wiederum auf Fels- bzw. Holzblöcken lagen. Erst später kamen die heute nahezu ausschließlich verwendeten Querschwellen zum Einsatz, die die Aufgabe hatten, die Standfestigkeit der Schiene zu gewährleisten und feste Gleislage und Spurrhaltung zu sichern.<sup>7</sup>

Im Laufe der Jahre wurden verschiedenste Schwellenarten und auch Materialien entwickelt. Neben Holzschwellen aus Weich- oder Hartholz, wurden speziell Ende des 19. Jahrhunderts viele Stahlschwellen produziert. Mit Beginn des 2. Weltkrieges war die Produktion allerdings rückläufig und es wurden mehr Betonschwellen gefertigt. Gerade in Japan werden teilweise Schwellen aus Kunststoff bzw. Kunstholz eingebaut. Auch bei der HOCHBAHN ist 2010 eine Weiche mit Schwellen aus FFU (Fiber reinforced Foamed Urethane) Kunstholz eingebaut wurden. Diese Schwellen aus Glasfasern und Polyurethan haben, bei einem spezifischen Gewicht und einer Verarbeitbarkeit wie Holz, eine deutlich höhere Liegedauer und Beständigkeit, sind in der Anschaffung jedoch teurer.

Für den Einsatz bei der Hamburger HOCHBAHN und diese Arbeit sind Holzschwellen sowie Spannbetonschwellen hauptsächlich relevant. Auf die Sonderformen der Betonschwelle sowie auf die verschiedenen Arten und Konstruktionen der Stahlschwelle und Schwellen aus anderen Materialien wird daher in dieser Arbeit nur kurz eingegangen.

---

<sup>7</sup> siehe Lewark, Siegfried: Die Holzschwelle im Wettbewerb, Forst und Holz 46, 1991, S. 27

### 3.1 Aufgaben der Schwellen

Wie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben, entstehen durch den Rad-Schiene-Kontakt sowohl lotrechte Lasten durch Eigengewicht, horizontale Kräfte durch die Fliehkraft und Längskräfte in der Schiene. Über die Schiene und die Schienenbefestigung werden die Kräfte an die Schwelle weitergeleitet, die sie dann möglichst gleichmäßig verteilen und in die Bettung weiterleiten soll. Die Schienenbefestigungen stellen dabei eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Schwelle und Schiene dar und dienen in Verbindung mit der Schwelle dazu, eine gleichbleibende Spurweite zu sichern. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Kraftübertragung vom Radsatz, über die Schiene und die Schienenbefestigung in die Schwelle und von da aus über die Bettung auf das Planum.

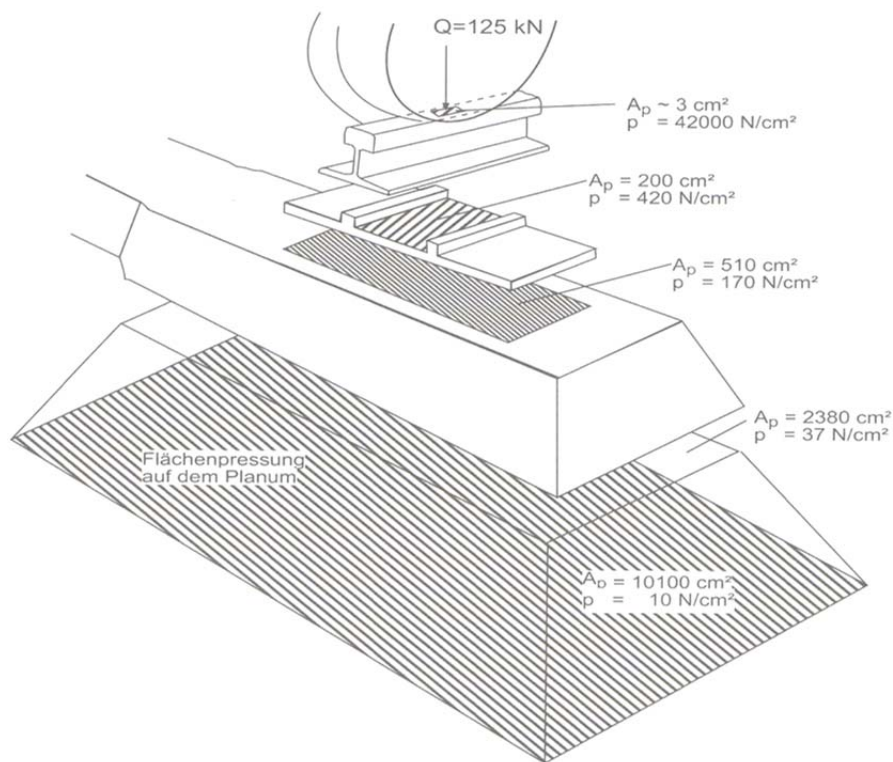


Abbildung 4: Druckverteilung der Radkraft über die Systemkomponenten<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> siehe Lichtberger B., Handbuch Gleis, S. 42

Durch die in Deutschland hauptsächlich verwendeten Schienenbefestigungen („Oberbauart K“ für Holzschwellen und „Oberbauart W“ für Betonschwellen) entsteht eine verwindungs- und schubsichere Verbindung von Schiene und Schwelle in Form von einem möglichst steifen Gleisrost.<sup>9</sup> Die Schienen sind somit in der Höhe gegen Setzungen und Aufwölbungen, in der Seite gegen allgemeine Horizontalkräfte und in Längsrichtung gegen Brems-, Beschleunigungs- und Temperaturkräfte sowie Schienenwandern gesichert.

Weiterhin dienen die Schwellen dazu, die aus Zugüberfahrten resultierenden Schwingungen der Schienen zu dämpfen und die Einflüsse von Schall- und Körperschallwellen auf die Umwelt zu verringern.

Die Verteilung der Kräfte auf die Bettung ist stark von der Lagestabilität des Gleisrostes abhängig. Einflussgrößen hierbei sind:

- Querverschiebewiderstand, der von dem Verschiebewiderstand der Schwellen in der Bettung abhängt, sowie von dem Verdrehwiderstand der Schienen auf den Schwellen
- Längsverschiebewiderstand, der von dem Verschiebewiderstand in Gleislängsrichtung abhängig ist
- Durchschubwiderstand, der den Widerstand gegen das Verschieben der Schiene auf der Schwelle beschreibt
- Die allgemeine Rahmensteifigkeit des Gleisrostes sowie Temperaturlängskräfte und Lagefehler

Um ausreichende Quer- und Längsverschiebewiderstände zu gewährleisten sind beim Einschottern die geforderten Bettungsdicken zu beachten. So ist die notwendige Bettungsdicke unter dem Schienenaufleger zwar abhängig von der Schwellenbreite, dem Schwellenabstand und dem Reibungswinkel des Schotters, sie sollte aber nicht weniger als 30 cm betragen, damit sich die Druckverteilungslinien überschneiden und somit der Untergrund zwischen den Schwellen nicht hochgepresst wird.<sup>10</sup> Weiterhin sollte ein

---

<sup>9</sup> siehe Jochim H.; Ladenmann F., Planung von Bahnanlagen, S. 105

<sup>10</sup> siehe Lichtberger B, Handbuch Gleis, S. 173

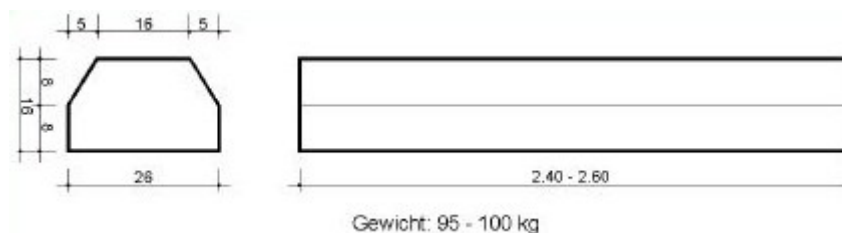
Vorkopfschotter von 40 – 50 cm eingebaut werden, da dieser ein wichtiger Faktor des Querverschiebewiderstandes ist.

### 3.2 Die Holzschwelle

Holzschwellen werden in vielen Ländern verbaut. Als zu verbauende Holzarten kommen vor allem Harthölzer wie europäische Eiche oder Buche, in Tunneln auch günstigere Weichholzarten wie Kiefer oder aber tropische wie Eukalyptus, Azobé, Bongossi oder Bangkirai in Frage. Dabei hat sich die Buchenholzschwelle als Standardschwelle in Deutschland durchgesetzt. Typische Regelabmessungen der Schwellen mit rechteckigem Querschnitt in stark beanspruchten Gleisen sind:<sup>11</sup>

- In Europa Hartholz 16 x 16 x 260 cm (Eiche, Buche)
- In USA diverse Holzarten 18 x 23 x 240 – 270 cm.

Das Stückgewicht einer Holzschwelle mit Regelabmessungen beträgt 95 – 100 kg und ist somit einer der Vorteile von Holzschwellen gegenüber Spannbetonschwellen, da sie einfach manuell einzubauen sind und geringere Transportkosten aufweisen.



**Abbildung 5: Beispielhafter Querschnitt einer Holzschwelle**

---

<sup>11</sup> siehe Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, Seite 152

Holz ist im Verhältnis zu Beton und Stahl ein leicht zu bearbeitender Baustoff. Daher kommen Holzschwellen bevorzugt in Bereichen zum Einsatz, in denen unterschiedliche Bohrbilder notwendig sind oder Sonderaufplattungen verwendet werden müssen. Weitere Einsatzgebiete von Holzschwellen sind Brücken, da Betonschwellen teilweise aus technischen und statischen Gründen nicht eingesetzt werden können und Bereiche, in denen mit einer erhöhten Entgleisungsgefahr zu rechnen ist. In Rangierbahnhöfen und Weichen werden Holzschwellen verbaut, weil sie unempfindlicher gegenüber Bruchbelastungen sind.

Holz ist ein natürlicher Baustoff. Daher ist die Beanspruchbarkeit der Holzschwelle abhängig von dem natürlichen Wechsel der klimatischen Bedingungen und der sich einstellenden Holzfeuchte sowie der dadurch resultierenden Gefahr von Rissen, Fäulnis, Pilz- und Insektenbefall. Besonders bei Holzfeuchten > 20 % ist von einer erhöhten Gefährdung durch fäulniserregende Pilze auszugehen. Unbedeutend ist die Gefahr des Befalls durch Pilze laut DIN, wenn die konstante Holzfeuchte im Bauteil unter 20 % liegt (Gefährdungsklasse 1 nach DIN EN 355-2).

Um die Lebensdauer der Schwellen um bis zu 20 Jahre zu verlängern, werden sie mit Teeröl getränkt. Durch die Verabschiedung der Chemikalien – Verbotsordnung (ChemVerbotsV) und der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) wurden die Aufarbeitungsmöglichkeiten der teerölgetränkten Altschwellen sowie die weitere Verwendung im Garten- und Landschaftsbau in Deutschland ab 1993 stark eingeschränkt.<sup>12</sup> Holzschwellen mussten fortan als Sondermüll entsorgt werden. Da die Schwellen nur noch in speziell dafür zugelassenen Werken bei sehr hohen Temperaturen verbrannt werden durften, stiegen die Entsorgungskosten stark an, was negative Auswirkungen auf die Life Cycle Cost der Holzschwellen hatte und damit auch auf ihre Wirtschaftlichkeit.

Eine unsachgemäße Holz Trocknung mit zu schnellem Austrocknen der äußeren Querschnittsbereiche führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Feuchte über den gesamten Holzquerschnitt. Zugspannungen im Umfangsbereich und radial verlaufende Trocknungsrisse sind die Folge, da der Randbereich beim Trocknen stärker schwindet als der Markbereich.<sup>13</sup> Sofern die Rissbildung durch die natürlichen Quell- und

---

<sup>12</sup> siehe [www.holzschwellenoberbau.de/de/cms/geschichte-holzschwelle/](http://www.holzschwellenoberbau.de/de/cms/geschichte-holzschwelle/) (Abruf: 18.06.2011)

<sup>13</sup> siehe Dipl.-Ing. König, Christian: Bauwerkserhaltung. Vorlesungsskript 2009, Holz I, Seite 8

Schwindvorgänge nicht zu sehr ausgeprägt ist und dadurch die Verspannkraft der Schienenbefestigung negativ beeinflusst wird stellen diese aber keine Beeinträchtigung der Schwellentragfähigkeit dar.

Weisen die Schwellen Krümmungen auf, so liegt die Ursache meist im Wuchs des Baumes, sind Holzschwellen gebogen, handelt es sich dagegen um Schwindungs- oder Spannungsfolgen des Holzes. Die Schwindung in radialer und tangentialer Richtung ist dabei aufgrund der starken Anisotropie erheblich größer als in Längsrichtung. Da verbogene Schwellen in der Regel eine Spurverengung hervorrufen, wird bei Holzschwellen in senkrechter Richtung eine Krümmung von 5 mm Pfeilhöhe angestrebt.<sup>14</sup>

Durch Austrocknen der oberen Holzzone kann es speziell im Sommer während langer Trockenperioden zu Rissbildung kommen und auch ein Nachbiegen der Schwelle ist möglich. Hierbei entstehen durch die ungleiche Feuchteverteilung Zugspannungen an der Schwellenoberseite, die zu einem Hochkommen der Schwellenenden führen und einer damit einkehrenden Spurverengung.<sup>15</sup>

Desweiteren kann es bei Holzschwellen zu Schäden durch Eindrücken der Unterlegplatten, hervorgerufen durch die wiederholte Einwirkung der Fahrzeuglasten kommen oder aber auch zu einem Aufweiten der Schraubenlöcher durch speziell in Bogenfahrten auftretende Kräfte in y-Richtung. Rostwasser der Befestigungsmittel kann ebenfalls zu Schäden und Fäulnis führen.

Die technische Nutzungsdauer von Holzschwellen wird bestimmt durch die biologischen und mechanischen Beanspruchungen sowie dem Widerstand gegenüber diesen Einwirkungen.<sup>16</sup> Je nach Qualität des Holzes und dem Einbringverfahren des Holzschutzmittels, haben Holzschwellen eine Gebrauchsdauer von 23 bis 40 Jahren.

Die Schienenbefestigung stellt dabei immer eine Schwachstelle dar. So ist es bei Holzschwellen notwendig, als Instandhaltungsmaßnahmen die aufgeweiteten Löcher der Befestigungsmittel neu zu verdübeln und mit Kunststoff aufzufüllen. Die Maßnahmen dienen dazu wieder einen korrekten Auflagerbereich unter den Rippenplatten herzustellen und die Spurweite zu regulieren.

---

<sup>14</sup> siehe Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, Seite 153

<sup>15</sup> siehe Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, Seite 153

<sup>16</sup> siehe Hempe, T.; Lillie, D.; Lepke, D.; Peterson, L.-A.: Liegedauer von Holzschwellen in Tunneln der Hamburger HOCHBAHN AG, Der Eisenbahningenieur 2/2006; Seite 46 – 50, S. 46

Folgende Verfahren werden bei der Holzschwellensanierung eingesetzt:<sup>17</sup>

- Schraubenlochanierung mit dem Aluminium-Spiraldübel Spdü
- Sanierung der Schwellenschraubenbefestigung mit SAS-Schwellenschrauben
- Schraubenlochanierung im Transversan-Verfahren

Im Netz der Deutschen Bahn AG werden heute standardgemäß Betonschwellen des Typs B 70 W eingebaut. Holzschwellen finden sich lediglich vereinzelt im Streckennetz wieder, hauptsächlich in Rangierbahnhöfen, auf Nebenstrecken oder aber auf Brücken bzw. bei Unterführungen. In Nahverkehrsunternehmen ist die Holzschwelle aber weiterhin eine weit verbreitete Schwellenart.

### **3.3 Die Betonschwelle**

Nachdem in der Anfangszeit der Eisenbahn ausschließlich Holzschwellen verwendet wurden, gerieten mit den immer weiter steigenden Achslasten und den erhöhten Geschwindigkeiten andere Materialien in den Fokus. Ende des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Betonschwellen eingeführt und 1906 die erste Eisenbetonschwelle in Deutschland auf der Strecke Nürnberg – Bamberg verlegt.

Bereits vor der Jahrhundertwende hatte der französische Gärtner Monier die Idee, Beton als Baustoff für Schwellen zu verwenden. 1884 entwickelte er die erste schlaff bewehrte Eisenbetonschwelle, die eine fischbauchähnliche Form hatte. Das ungünstige Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit des Betons, konnte mit den schlaff eingelegten Bewehrungsstäben nicht ausreichend ausgeglichen werden. Aus diesem Grund wurde die Konstruktion den hohen Ansprüchen nicht gerecht und stellte keine Alternative zu Holzschwellen dar, hatte aber zur Folge, dass zahlreiche weitere Entdeckungen in vielen Ländern aufkamen. Mit der Entwicklung des Spannbetons in den 30er und 40er Jahren konnte die geringe Zugfestigkeit des Betons ausgeglichen werden und das

---

<sup>17</sup> siehe Marx, Lothar; Bugenhagen Detlef, Moßmann Dietmar: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus; DB-Fachbuch Band 8/13, 4. Auflage, Eisenbahn-Fachverlag, 1995 Heidelberg – Mainz, S.444

Hauptaugenmerk auf den optimalen Kompromiss zwischen technischen Anforderungen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten gelegt werden.<sup>18</sup>

Während die Produktion von Stahlschwellen rückläufig war entwickelte sich die Betonschwelle immer weiter. Hauptgründe dafür waren zum einen die vielen zerstörten Holzgleise nach dem 2. Weltkrieg, die 1939 eingestellte Produktion der Stahlschwellen und die Entwicklung des lückenlos verschweißten Gleises. Viele Formen wurden konzipiert, bis 1970 die B 70 Schwelle entwickelt wurde, die bis heute noch als Standard-Betonschwelle im Netz der DB AG eingebaut wird. Bei den Betonschwellen kann zwischen zwei Grundtypen unterschieden werden:<sup>19</sup>

- Monoblock – Betonschwelle (besteht aus einem Spannbetonblock)
- Zweiblock – Betonschwelle (zwei Spannbetonblöcke sind über eine Spurstange oder einen Stahlträger spurhaltend miteinander verbunden)

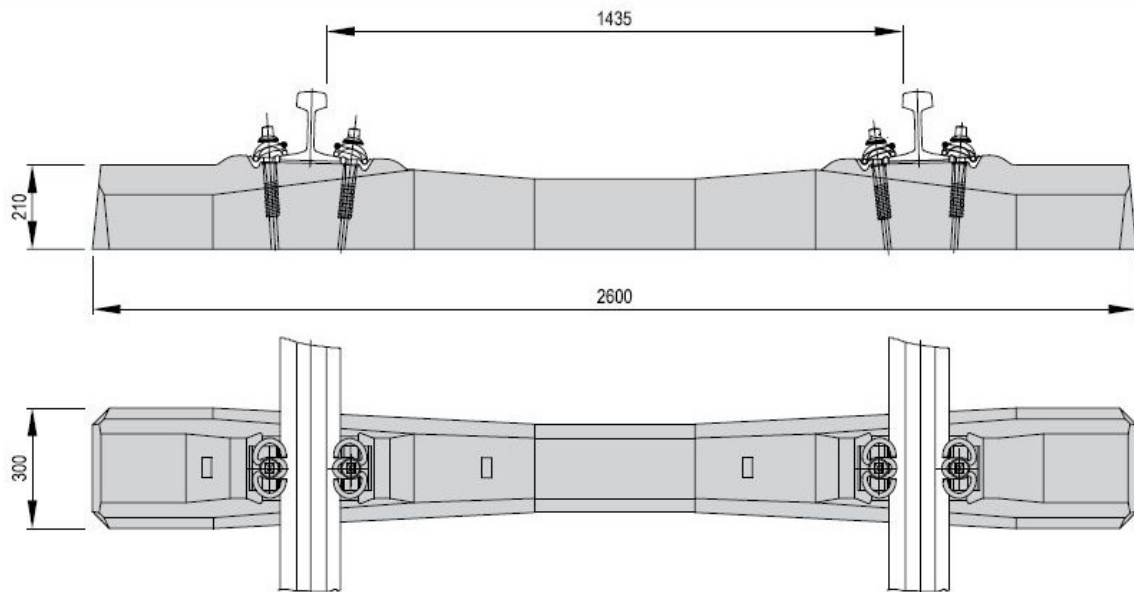
Neben diesen beiden Grundtypen der Spannbetonschwelle, wurden verschiedene weitere Konstruktionen wie Rahmenschwellen, die Breitschwelle oder die ZSX-Schwelle entwickelt. Da derartige Systeme für diese Arbeit nicht relevant sind, wird sowohl auf die oben genannten Konstruktionen als auch auf die Zweiblock – Monoschwelle, die hauptsächlich in Ländern wie Frankreich, Belgien, Spanien, Portugal und Griechenland eingesetzt wird, nicht weiter eingegangen.

Die Standardspannbetonschwellen haben ein Gewicht von ca. 300 kg und sind somit rund dreimal so schwer wie Holzschwellen. Der Anteil des Bewehrungsstahls liegt dabei zwischen 7 und 9 kg. Durch das deutlich höhere Gewicht haben die Betonschwellen einen besseren Querverschiebewiderstand als Holzschwellen sowie eine gute Lagestabilität. Das hohe Gewicht ist aber auch ein Nachteil, da die Schwellen dadurch nur noch mechanisch eingebaut werden können und eine höhere Schotterpressung als Holzschwellen aufweisen.

---

<sup>18</sup> siehe Parzefall, Birgitt: Die Spannbetonschwellen B55 und B70; Eine kritische Wertung der Belastungsannahmen, der Schwellenbemessung und der Schwellenprüfung, Heft 51, 1986; Seite 2

<sup>19</sup> siehe Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, S. 151



**Abbildung 6: Spannbetonschwelle B 70 W 60<sup>20</sup>**

Die Serienfertigung der Betonschwelle ist sehr wirtschaftlich, wodurch der Einkaufspreis unter dem der Hartholzschwellen liegt. Beim Herstellungsverfahren wird zwischen zwei Methoden unterschieden. Die Betonschwellen können sowohl im Sofortentschalungsverfahren hergestellt werden, wobei die Bewehrung nachträglich gegen den bereits erhärteten Beton verspannt wird oder aber auch im Verfahren der Spätentschalung, bei dem der Stahl bereits gegen die Form vorgespannt ist und der Beton darin erhärtet. Sonderformen, die in Einzelanfertigung hergestellt werden, sind teurer, da hierfür extra Schalungen hergestellt werden müssen und dies einen hohen Kostenfaktor ausmacht.

Betonschwellen sind resistent gegenüber biologischem Zerfall und die Befestigungsschrauben haben im Regelfall eine höhere Dauerhaftigkeit als die der Holzschwellen. Problematisch dagegen ist die hohe Anfälligkeit bei Entgleisungen. An den Schwellen entsteht dabei ein hoher Schaden, ein Schwellenaustausch ist meist unausweichlich.

---

<sup>20</sup> siehe: [www.moll-betonwerke.de/de/prod-gleisschwellen.htm](http://www.moll-betonwerke.de/de/prod-gleisschwellen.htm), Abruf: 18.06.2011

Im Netz der Hamburger HOCHBAHN werden seit 1996 Monoblock-Spannbetonschwellen eingebaut. Sofern das Lichtraumprofil und die Umgebungsbedingungen es zulassen, soll die Spannbetonschwelle fortan als Standardschwelle auf Freistrecken der HOCHBAHN eingebaut werden.

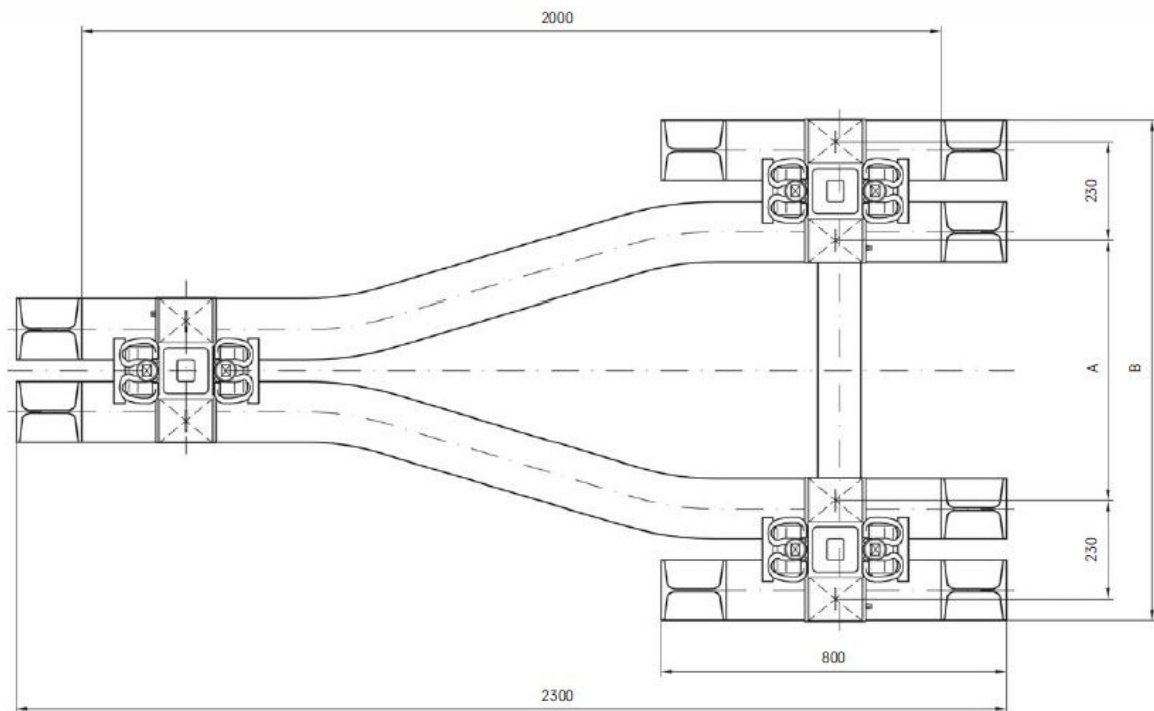
### **3.4 Die Stahlschwelle**

Bei den Stahlschwellen wird grundsätzlich zwischen zwei Formen unterschieden: Stahltragschwelle und Y-Schwelle. Die Stahltragschwellen hat mit 60 – 80 kg ein verhältnismäßig geringes Gewicht und ist somit einfach in der Handhabung. Durch die flache Einbauhöhe ist der Verbau bei beengten Verhältnissen möglich und nur eine geringere Schottermenge notwendig. Das Unterstopfen ist aufgrund der gewölbten Schwellenform aber sehr aufwendig, wodurch die Verlege- und Instandhaltungskosten im Vergleich zu anderen Schwellenarten deutlich steigen. Da die Stahltragschwellen den Schotter durch ungedämpfte Schläge stark beanspruchen, kommt es immer wieder zu erhöhten Abrieb, wodurch das Ableiten des Wasser aus der Bettung gehindert werden kann. Rostschäden sind eine mögliche Folge.

Auch die Y-Stahlschwelle hat eine geringe Bauhöhe. Bei einer Länge von 2,30 m ist sie kürzer als andere Schwellenarten, was ebenfalls zu einer Schotterersparnis führt. Durch den Dreiecksverband haben die Y-Stahlschwellen einen hohen Quer- und Längsverschiebewiderstand sowie eine große Torsions- und Rahmensteifigkeit. Ebenso wie bei Stahltragschwellen sind der Einbau und die Instandhaltung aufwendiger als bei Spannbetonschwellen. Zum Unterstopfen sind teure Spezialgeräte notwendig, durch den hohen Querverschiebewiderstand sind größere Fehllagen in seitlicher Richtung nur schwer maschinell zu korrigieren und die Y-Schwelle ist im Verhältnis zu der B 70 Spannbetonschwelle rund 70 € teurer.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> siehe Lichtberg, B.: Handbuch Gleis, S. 159



**Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung einer Y-Stahlschwelle** <sup>22</sup>

Stahlschwellen sind im Allgemeinen sehr gut recyclebar, aber aufgrund des strittigen Wirtschaftlichkeitsnachweises und der nicht immer gegebenen technischen Notwendigkeit bilden diese Schwellenarten die Ausnahme.

Im Netz der HOCHBAHN liegen weder Stahltrög noch Y-Stahlschwellen und durch die Verwendung der Stromschiene ist ein Einbau auch nicht angedacht. Somit fällt die Betrachtung dieser Schwellentypen knapper aus und dient lediglich als Vergleichsmöglichkeit mit den Holz- und Betonschwellen.

---

<sup>22</sup> siehe Thyssen Krupp GfT Gleistechnik GmbH, Top of Class. Y-Steel Sleeper, September 2010, S. 5

#### 4. Schwellenmaterial im Netz der Hamburger HOCHBAHN

Am 15. Februar 1912 wurde das erste Teilstück der Ringlinie zwischen Rathausmarkt und Barmbek nach nur sechs Jahren Bauzeit fertiggestellt. Rund einen halben Monat später, am 1. März begann der offizielle Betrieb. Hamburg, das sich somit mit Städten wie London, Paris oder auch New York, die bereits alle über ein U-Bahn System verfügten, messen konnte, baute sein Streckennetz von da an stetig aus. Die über 400 Brücken und Viadukte prägen das Stadtbild und gaben der Hamburger HOCHBAHN ihren Namen. Somit wurde sie zu einem Synonym für den Nahverkehr in Hamburg.<sup>23</sup>

Derzeit betreibt die HOCHBAHN ein Streckennetz von 101 km Linienlänge, bestehend aus 3 U-Bahn Linien. Die zurzeit im Bau befindliche und voraussichtlich 2012 fertiggestellte neue U4, die die Hafencity auf ca. 4 km mit der Innenstadt verbinden wird, ist dabei in dieser Arbeit nicht weiter mit aufgeführt.

Die 101 km Linienlänge sind dabei folgendermaßen auf die drei Linien verteilt:

- U1: 56 km
- U2: 22 km
- U3: 23 km

51 km der gesamten Strecke verlaufen auf Dämmen oder Einschnitten, 9 km auf Brücken bzw. Viadukten und 41 km in Tunneln. Somit ergibt sich eine Verteilung von frei bewitterten und im Tunnel verlegten Schwellen von ca. 60 zu 40.

Abhängig von der wirtschaftlichen und technischen Zweckmäßigkeit sowie den örtlichen Bedingungen werden im Netz der Hamburger HOCHBAHN entweder imprägnierte Holzschnellen oder Spannbetonschnellen eingesetzt.

---

<sup>23</sup> siehe [www.100-jahre-hochbahn.de](http://www.100-jahre-hochbahn.de) Abruf 18.06.2001

#### 4.1 Holzschwellen bei der HOCHBAHN

Wie in 3.3 schon erwähnt, baut die HOCHBAHN erst seit 1996 Betonschwellen in ihr Streckennetz ein. Ein Großteil der im Netz befindlichen Schwellen besteht aus Holz. Dabei wird je nach örtlichen Verhältnissen entweder Buche, Kiefer oder Eiche verwendet. Folgende Tabelle liefert einen Überblick über die Anwendungsbereiche.

Anwendungsbereiche für Holzschwellen	Buche	Kiefer	Eiche
<b>Normale Gleise:</b>			
im Freien	<b>x</b>		
im Tunnel		<b>x</b>	
<b>Brücken mit offener Fahrbahn:</b>			
gerade Gleise		<b>x</b>	
Bogengleise			<b>X</b>
<b>Weichen und Kreuzungen:</b>			
im Freien			<b>X</b>
im Tunnel		<b>x</b>	<b>X</b>

**Tabelle 1: Anwendungsbereiche der Holzschwellen im Streckennetz der HOCHBAHN<sup>24</sup>**

Die HOCHBAHN plant in Zukunft auf freier Strecke Spannbetonschwellen einzubauen. In Tunneln und auf Viaduktstrecken sollen weiterhin Holzschwellen verwendet werden. Durch das geringere Lichtraumprofil ist es nicht möglich im Tunnel Betonschwellen einzusetzen, da für das Einbringen der Schwellen Großgeräte verwendet werden müssen. Desweiteren haben nicht bewitterte Holzschwellen eine deutlich höhere Liegedauer als frei bewitterte. Auf Viadukten und Brücken werden weiterhin Holzschwellen eingebaut, da im Falle von Instandhaltungsmaßnahmen an Brücken Holzschwellen einfacher zu entfernen sind, sie ein besseres Dämpfungsverhalten aufweisen und einen besseren Erschütterungsschutz bieten als Betonschwellen. Außerdem ist die Statik der teils historischen Viadukte lediglich auf den Einsatz von Holzschwellen bemessen.

---

<sup>24</sup> siehe RUO Teil 3, Kapitel 1.3.1

Bei der HOCHBAHN werden zwei unterschiedlich imprägnierte Arten von Holzschwellen eingebaut:

- Teerölgetränkte Holzschwellen für den Freibereich
- Salzimprägnierte Kiefernswellen für Tunnelbereiche

Die Abmessungen der Schwellen sind in den Richtlinien für Planung, Bau und Entwurf von U-Bahn-Anlagen in Hamburg, Teil 3 Oberbau (RUO) festgelegt und Tabelle 2 zu entnehmen.

<b>Schwellenmaterial/ Gleiseinteilung</b>	Höhe [cm]	Breite [cm]	Länge [m]
Beton: Hauptgleise	20	26	2,60
Nebengleise	20	26	2,60
Holz: Hauptgleise	16	26	2,60
Nebengleise	15	24	2,50
Brücken mit offener Fahrbahn: Eichenschwellen	entsprechend den statischen Anfor- derungen, min 16	20	≥2,30 *
Kiefernswellen		20	

\* Die Länge wird durch den Abstand der Brückenlängsträger und gegebenenfalls durch den Platzbedarf für den Stromschienenträger bestimmt.

**Tabelle 2: Abmessung von Schwellen (Holz und Beton)**<sup>25</sup>

Die Schwellenteilung ist ebenfalls in der RUO geregelt. Der Abstand von Schwellenmitte zu Schwellenmitte ist dabei abhängig von der Streckentrassierung. In einer Geraden sowie in Bögen mit einem Radius > 300 m soll der Abstand der Schwellenmitten 71,5 cm betragen, in Bögen bei denen der Radius ≤ 300 m ist, sind 65 cm vorgesehen. Bei Weichen und Kreuzungen ist die Schwellenteilung den jeweiligen Zeichnungen zu entnehmen, die Grundteilung beträgt jedoch 60 cm.

---

<sup>25</sup> siehe RUO Teil 3, Kapitel 1.3.1

#### **4.1.1 Herstellung von Holzschwellen**

Nach der Fällung und zwischenzeitlichen Trocknung des Holzes werden die Stämme zu den Holzschwellenwerken transportiert. Die Holzstämme werden dort am Anfang der Betriebskette automatisch gesichtet, entrindet und durch Fräsen auf einen gleichmäßigen Durchmesser gebracht. Sofern keine Metallrückstände in dem Holz vorhanden sind fährt es vollautomatisch in das Sägewerk ein. Dort schneiden vier einzeln verstellbare Sägeblätter die Holzbalken in die gewünschte Form. Nach dem Sägevorgang wird eine Sichtprüfung der angehenden Schwellen durchgeführt um Ausschuss frühzeitig zu erkennen. Ebenfalls ist es in diesem Stadium möglich zugekaufte und geschnittene Schwellen in den Verarbeitungsprozess mit einzubeziehen. Sofern die in Form gebrachten Holzschwellen die Sichtprüfung bestanden haben, werden an der Stirnseite Reisschutzplatten eingepresst. Danach werden sie gestapelt und auf einem Lagerplatz zwischen 100 und 240 Tage getrocknet. Dabei ist darauf zu achten, dass schräg auf den oberen Schwellen Holzbalken aufliegen, die gegen direkten Niederschlag und Sonneneinstrahlung schützen. Um dadurch einen dementsprechend guten Wirkungsgrad zu erreichen, sind die Paletten mit den schrägen Holzbalken gen Süden auszurichten.

Nach der abgeschlossenen Trocknung und einer weiteren Sichtprüfung werden die Bohrungen für die Aufplattungen vorgenommen. Da der Imprägnierstoff lediglich in Faserrichtung, also längs der Schwelle in das Holz eindringen kann, werden zeitgleich an der Unterseite Bohrlöcher gesetzt, um ein besseres Durchdringen mit dem Tränkmittel zu erreichen.

Im Imprägnierwerk sind die Schwellen anschließend mit dem gewünschten Holzschutzmittel zu imprägnieren. Die hierfür benötigte Wärme kann unter anderem aus den Holzsnitzeln, die als Abfallprodukt im Sägewerk anfallen, in Biomasseheizwerken erzeugt werden. Für den Imprägniervorgang werden die Schwellen auf Loren gestapelt und in einen druckdichten Kessel gefahren. Durch das Erzeugen eines Vakuums werden die Holzschwellen unter Überdruck gleichmäßig mit dem Holzschutzmittel durchtränkt. Nach dem Imprägnieren kühlen die Schwellen in der Regel für rund 10 Stunden ab, bevor die jeweils erforderliche Aufplattung aufgebracht und fest verschraubt wird. Teilweise werden dabei die Schraubenlöcher noch mit Bitumen versetzt, um ein Eindringen von Feuchtigkeit zu erschweren.

Die nun einbaufertigen Schwellen werden wiederum auf Paletten gestapelt und je nach Kundenwunsch längs oder quer verladen zur Baustelle transportiert.

### **4.2 Vergleich der verlegten Holzschwellen**

Wie in 4.1 bereits beschrieben, baut die Hamburger HOCHBAHN in den Tunnelstrecken ausschließlich Holzschwellen ein. Für die kommenden Jahre ist durch die durchweg positiven Erkenntnisse bezüglich der Liegedauer und aufgrund der örtlichen Gegebenheiten auch weiterhin der Einsatz von Holzschwellen in Tunnelstrecken vorgesehen.

Bis 1991 wurden auf freier Strecke in Haupt- und Nebengleisen Kiefernholzschwellen eingebaut. Die angestrebte Liegedauer (bei einer Abweichung von +/- 20%) beträgt in den stärker belasteten Hauptgleisen, die rund 43 km Streckennetz ausmachen, 25 Jahre, auf Nebengleisen bei 21 km Länge 35 Jahre. Zwischen 1992 und 1997 wurden in rund 41 km Streckennetz und von 1998 bis 2004 auf 24 km Länge in Sonderbereichen, Buchenschwellen mit einer Liegedauer von >35 Jahre verlegt. In den Tunnelstrecken der HOCHBAHN sind lediglich Kiefernswellen eingebaut, die begründet durch die trockene Lagerung eine Liegedauer von >65 Jahren aufweisen. Alle Angaben basieren auf dem Stand vom 31.12.2004.<sup>26</sup>

Auf freier Strecke liegen (neben Betonschwellen) ausschließlich teerölimprägnierte Holzschwellen. Innerhalb der Tunnelstrecken hat die Hamburger HOCHBAHN seit Anfang der 90er Jahre auch salzprägnierte Kiefernswellen verwendet. Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit dieser Schwellen kommen sie nur in den trockenen Tunnelbereichen zum Einsatz.

Die Liegedauer von Holzschwellen ist stark abhängig von den biologischen und mechanischen Beanspruchungen sowie deren Widerstand gegen diese Einwirkungen (siehe dazu Kapitel 3.2). Bei dem Vergleich von frei bewitterten und in Tunneln verlegten Schwellen ist dabei die biologische Beanspruchung, hauptsächlich durch den Eintrag

---

<sup>26</sup> Mittel- und Langfriststrategie für die U-Bahn-Gleisanlagen 2006 – 2020, Hamburger HOCHBAHN, 10.10.2005

durch Feuchte und den damit verbundenen Folgen, der prägende Faktor in Bezug auf die Liegedauer und dadurch auch auf die Life Cycle Cost. Schwellen die im Freibereich verlegt sind, werden durch die wechselnden Einwirkungen von Niederschlag und Sonneneinstrahlung beansprucht. In der Nähe der Tunnelmündungen kommt es hauptsächlich durch die einfahrenden Fahrzeuge, die Kombination von Wind und Regen oder aber durch Kondensation zu Feuchteinträgen. Direkt in den Tunnelstationen kann Feuchtigkeit weiterhin auch durch Fahrgäste verursacht werden.

Abhängig von der sich einstellenden Holzfeuchte kann es zu einem Pilzbefall kommen, der durch Abbau organischen Materials Fäulnis als Folge hat. Diese begünstigt das Auftreten von holzschädigenden und holzerstörenden Insekten. Die bedeutendsten Trockenholz befallenden Insekten sind dabei der Hausbockkäfer, der Nagekäfer und der Splintholzkäfer. Die eigentliche Schädigung des Querschnitts geht von der Larve aus, die sich von dem Holz ernährt und durch ihre Fraßgänge eine erhebliche Schwächung des Querschnitts hervorruft. Je nach Art liegen die optimalen Lebensbedingungen der holzschädigenden Insekten bei 20 – 30° C und einer Luftfeuchte von 12 – 30%.<sup>27</sup>

### **4.2.1 Holzschwellen in Tunneln der HOCHBAHN**

Die Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH (IVE) stellte im Auftrag der Hamburger HOCHBAHN, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauphysik (IfBP), Abteilung Holzbau der Leibniz Universität Hannover, im Jahr 2008 eine umfangreiche Studie an, die sich mit der Beurteilung der zu erwartenden Liegedauer salzimprägnierter Holzschwellen aus Kiefernholz in Tunneln der HOCHBAHN beschäftigte.

Salzdruckimprägnierte Schwellen werden seit Anfang der 90er Jahre im Streckennetz eingebaut und sollen auch weiterhin für den Tunnelbereich verwendet werden. Als Imprägniermittel kommt dabei das chromfreie Holzschutzsalz Wolmanit CX-8, basierend auf anorganischen Kupfer- und Borverbindungen sowie organische Wirkstoffe mit vorbeugender Wirkung gegenüber holzerstörender Pilze und Insekten zur Verwendung. Wolmanit CX-8 besitzt alle Prüfprädikate nach DIN 68800-3 und entspricht somit im vollem Umfang den Anforderungen. Die Verwendung von salzdruckimprägnierter

---

<sup>27</sup> Siehe Bauwerkserhaltung. Vorlesungsskript 2009, Holz I, S. 16 - 20

Holzschwellen im Streckennetz von Verkehrsunternehmen ist eine nicht weit verbreitete Technik. Viele Bahnbetreiber haben in ihren Tunnelstrecken teerölimprägnierte Schwellen liegen und planen bei Umbaumaßnahmen den Einsatz von Betonschwellen. In der Nürnberger U-Bahn sind die Tunnelstrecken in Fester Fahrbahn konzipiert. Auch die DB AG sieht für ihre Holzschwellen ausschließlich Teerölimprägnierungen vor.

Bei der Untersuchung, die unter anderem die Messung der Klima- und Schwellenfeuchte sowie eine Zustandsbeurteilung der verlegten Kiefernholzschwellen beinhaltete, wurde festgestellt, dass keine signifikante Einschränkung der Liegedauern von salzimpregnierten gegenüber teerölimprägnierten Schwellen zu erwarten ist. Weiterhin wurde bereits in einem Bericht des Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „UMWELTFREUNDLICHE HOLZSCHWELLEN“, die Eignung von salzdruckimpregnierten Kiefernholzschwellen als geruchlose Alternative zu Teerölimprägnierten in Tunnellage festgestellt. Die Auswertung der Schwellenfeuchtediagramme in Tunnellein- bzw. Tunnelausfahrten ergab außerdem, dass ab der sechsten Versuchsschwelle, d.h. die 21. Schwelle ab Tunnelmund, Verhältnisse vorliegen, die denen eines Tunnels entsprechen. Das entspricht einem Abstand von ca. 15 m.<sup>28</sup>

Teerölimprägnierte Kiefernholzschwellen haben nach einem früheren Gutachten, unter bestimmten positiven Voraussetzungen wie Radien größer als 500 m und einer konstant geringen Feuchtigkeit, selbst bei einer bereits vorhandenen Liegedauer von 40 Jahren, eine weitere Nutzungsdauer von 20 Jahren.<sup>29</sup>

Für die Herstellung teerölimprägnierter Schwellen der HOCHBAHN, wird aktuell nur noch das Steinkohleteer-Imprägnieröl W.E.I.-Typ C verwendet. Dies ist auch als DB-Standard festgelegt. Weitere Arten sind:

- W.E.I.-Typ B
- W.E.I.-Typ A

Typ B wird lediglich noch bei Schwellen verwendet die für das Ausland produziert werden. Typ A wurde früher ausschließlich für Bahnschwellen verwendet, wird aber aufgrund des hohen BaP-Gehalt über 50 ‰ bis 500 ‰ heute nicht mehr produziert und ist auch nicht

---

<sup>28</sup> siehe Siefer, T.; Fouad, N.A.; Lillie, D.; Peterson, L.-A., Beurteilung der zu erwartenden Liegedauer salzimpregniertes Holzschwellen aus Kiefernholz in Tunneln der HOCHBAHN, S. 40

<sup>29</sup> siehe EI Eisenbahningenieur (57) 2/2006, S. 50

mehr zulässig. Der BaP-Gehalt beschreibt dabei den Anteil von Benzo(a)pyren als Leitsubstanz für kanzerogene polyzyklische Kohlenwasserstoffe.<sup>30</sup>

Bei dem Imprägnieröl W.E.I-Typ C ist die Menge an gesundheitsschädlichen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs) stark eingeschränkt und weist aufgrund eines stark reduzierten Anteils an flüchtigen Komponenten einen geringeren Verdunstungsgrad auf, was sich positiv auf die Geruchsbelästigung durch das Imprägniermittel auswirkt.

### 4.2.1.1 Ergebnisse der Schwellenuntersuchung

Bei den Untersuchungen durch das IVE wurden sowohl Klima- als auch Schwellenfeuchtemessungen im Tunnel durchgeführt. Weiterhin wurden bei der Anamnese, bestehend aus Gleisbegehung und Sichtprüfung, Abklopfen der Oberfläche, Messung der Holzfeuchte und Bohrresistenzprüfung zur Überprüfung der Holzfestigkeit, die Zustände der einzelnen Schwellen erfasst und dokumentiert. Zur weiteren Untersuchung, speziell über die Eindringtiefe des Holzschutzmittels, lieferte die HOCHBAHN sechs Holzschwellen, zwei teerölgetränkte und vier salzimprägnierte (davon zwei troggetränkt und zwei kesseldruckimprägnierte) zur weiteren Untersuchung nach Hannover.

Zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte, wurden drei Messstationen in einem Tunnel der Strecke K zwischen Billstedt und Mümmelmannsberg eingerichtet. Das erste Gerät wurde am Tunneleingang, das zweite in einer Station und das dritte direkt, mittig zwischen zwei Stationen, im Tunnel angebracht. Die Messergebnisse zeigen, dass die Temperaturunterschiede im Tunnel weitaus geringer sind und ein ausreichender Luftwechsel vorhanden ist.

Die Aufnahme der Schwellenfeuchte erfolgte durch Messung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei, in die Schwelle eingeschlagenen Elektroden. Der Widerstand nach Anlegen eines elektrischen Messstroms, ist dabei umgekehrt proportional zum Feuchtegehalt. Dabei ist speziell auf zwei Feuchtigkeitswerte geachtet worden. Wie in 3.2 schon erläutert, ist die Gefahr des Befalls durch Pilze bei einem

---

<sup>30</sup> siehe Informationsdienst Holz, Entsorgung von schutzmittelhaltigen Hölzern und Reststoffen, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., 07/1993, S.11

Feuchtegehalt von <20% im Bauteil unbedeutend (GK 1 der DIN EN 355-2). Der zweite signifikante Wert ist der von 24% Holzfeuchte, bei dem die Hamburg-Consult in dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben UMWELTFREUNDLICHE HOLZSCHWELLE, bei salzimpregnierten Holzschwellen einen Widerstand ermittelte, der über dem von teerölimpregnierten Holzschwellen liegt. Eine erhöhte Leitfähigkeit der Schwelle bewirkt dabei, dass durch auftretenden Streustrom die Schienenbefestigungsmittel durch Fremdstromkorrosion angegriffen werden können und es zu einem vermehrten Materialabtrag kommt.

Die Auswertungen der über ein Jahr dauernden Messungen zeigt, dass in Tunneln der Wert von 24% Holzfeuchte nicht überschritten wird und die Feuchtigkeitswerte größtenteils unter der 20% Marke liegen, sodass keine Einschränkungen der Liegedauer von salzdruckimpregnierten gegenüber den teerölgetränkten Holzschwellen in den Tunneln zu erwarten ist.

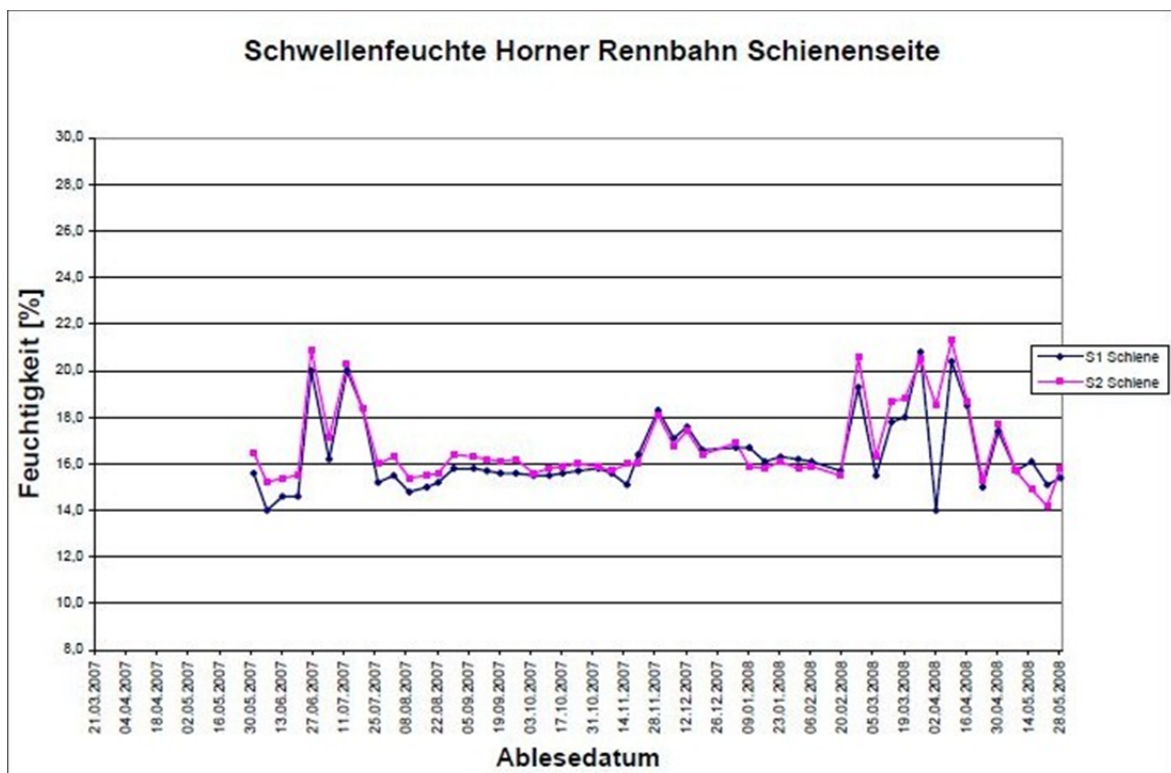


Abbildung 8: Feuchteverteilung der Schwellen der Abstellanlage Horner Rennbahn<sup>31</sup>

<sup>31</sup> siehe IVE, Beurteilung der zu erwartenden Liegedauer von salzimpregnierten Holzschwellen aus Kiefernholz in Tunneln der HOCHBAHN, S. 22

Die Messungen wurden sowohl auf der Schienenseite in 7 cm Holztiefe, als auch auf der Hirnholzseite in 2,5 cm vorgenommen, um ein repräsentatives Ergebnis zu erreichen. Markante Unterschiede in der Holzfeuchte sind dabei nicht aufgetreten. Weitere Messungen wurden in der Station Merkenstraße durchgeführt. Obwohl die Schwellenfeuchte von 24% mehrmals für einen kurzen Zeitraum überschritten wurde, ist ein Einsatz von salzimpregnierten Schwellen in Tunneln ohne Einschränkungen gegenüber teerölgetränkten Holzschwellen möglich. Deswegen wird bei der weiteren Betrachtung nicht mehr explizit zwischen den beiden Imprägnier- bzw. Schwellenarten unterschieden.

Aufgrund der guten klimatischen Bedingungen ist die Liegedauer von Holzschwellen in Tunnelstrecken bei der HOCHBAHN rund doppelt so hoch wie die bei Schwellen auf freibewitterter Strecke. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Schwellenfeuchte in Tunneln in Bereichen liegt, in denen ein hoher Widerstand gegenüber fäulniserregenden Pilzbefalls gewährleistet ist. Der Feuchtegrad steht direkt mit den Werkstoffparametern des Holzes, wie Dichte, Festigkeit oder E-Modul in Verbindung. Je höher die Feuchtigkeit in den Schwellen ist, umso geringer ist die Festigkeit, was sich dadurch widerspiegelt, dass allgemein der Widerstand gegenüber mechanischer Einwirkungen sinkt.

In Tunneln spielt das eine untergeordnete Rolle, so dass die Liegedauer von Holzschwellen in Tunneln hauptsächlich durch die mechanischen Beanspruchungen bestimmt wird. Bei den geringen Radlasten der HOCHBAHN sowie unter normalen Beanspruchungsbedingungen, wie sie auf gerader Strecke, bei guter Gleislage und ebener Schienenfahrfläche vorkommen, ist somit die angestrebte technische Nutzungsdauer von Holzschwellen von mindesten 65 Jahren zu erreichen. Lediglich in Bögen mit engen Radien ist eine kürzere Liegedauer zu erwarten, da bedingt durch die erhöhte mechanische Beanspruchung, speziell durch Flieh- und Führungskräfte, die bogenäußerer Schiene und damit auch die Schwellenschrauben weitaus stärker belastet werden.<sup>32</sup>

Holzschwellen auf frei bewitterter Strecke sind den Einwirkungen aus wechselnden Klimaverhältnissen unmittelbar ausgesetzt. So sind die Schwellen nicht direkt gegen Regen oder Sonneneinstrahlung geschützt, was natürliche Quell- und Schwindvorgänge im Holz hervorruft, wodurch die Rissbildung in der Schwelle begünstigt wird. Die dadurch

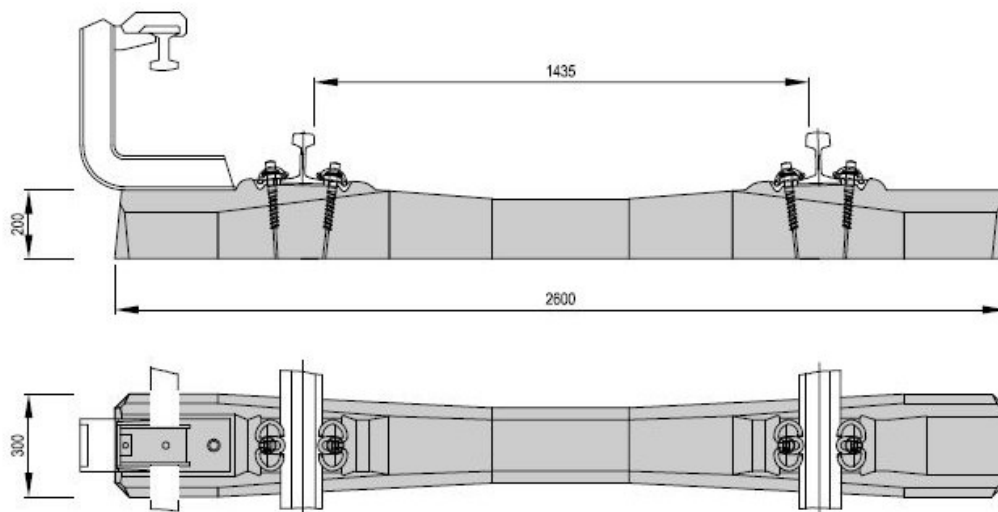
---

<sup>32</sup> siehe EI Eisenbahningenieur (57) 2/2006, S. 50

erhöhte biologische Beanspruchung der Holzschwelle hat zur Folge, dass die Liegedauer auf freier Strecke je nach Holzart und Gleiseinteilung ca. 30 Jahre beträgt. Schwellen aus dem schweren bis mittelharten Buchenholz, welches eine gute Durchtränkbarkeit, allerdings auch ein hohes Quell- und Schwindmaß ausweist, haben dabei eine leicht erhöhte Liegedauer im Vergleich zu Kiefernholzschwellen. Die Schwellen aus dem weichen bis mittelharten Holz weisen durch das geringere Arbeiten und der guten Verzahnung mit dem Schotter eine hohe Lagebeständigkeit auf. Durch den hohen Harzgehalt haben Kiefernholzschwellen auf Nebengleisen zwar eine ähnlich lange Liegedauer als Buchenschwellen (35 Jahre), auf Hauptgleisen liegt sie aber, bedingt durch die erhöhten Einwirkungen, unter der der Buche (siehe auch Kapitel 4.2).

## 5. Betonschwellen bei der HOCHBAHN

Im Netz der HOCHBAHN wurden seit 1996 auf rund 19 Kilometer Betonschwellen eingesetzt. Verwendet wurde dabei in Anlehnung an die DB AG, die Schwelle vom Typ B 70 mit einem Stückgewicht von ca. 280 kg. Als einziger Unterschied zu den Schwellen, die im Streckennetz der Deutschen Bahn liegen, hat die Spannbetonschwelle der HOCHBAHN beidseitig eine Montagemöglichkeit für die Stromschienträger. Die nicht genutzten Löcher, sind mit einer Kunststoffklappe verschlossen. Um einem Verlust der Klappen entgegen zu wirken, ist in den neueren Schwellen ein Gewinde eingearbeitet, sodass die Klappen beim Abkehren der Schwellen nicht aus dem Bohrloch rutschen und sich so Steine und Schmutz in den Dübeln festsetzen können .



**Abbildung 9: Spannbetonschwelle B 70 W mit Stromschienträger<sup>33</sup>**

Bei Schwellen bis zu dem Baujahr 2003 sind Dübel Sdü 9 für Schwellenschrauben Ss8, ab 2004 Dübel Sdü 25 für Schwellenschrauben Ss35 verwendet worden. Für die Bereiche, in denen Führungsschienen genutzt werden sind die Betonschwellen mit zusätzlichen Dübeln im Mittelbereich ausgeführt. <sup>34</sup>

---

<sup>33</sup> siehe [www.moll-betonwerke.de/de/pdf/Produktblatt3.5.pdf](http://www.moll-betonwerke.de/de/pdf/Produktblatt3.5.pdf) Abruf: 18.06.2011

<sup>34</sup> siehe AzRUO – Ausführungsbestimmungen zu den Richtlinien von Planung, Bau und Entwurf von U-Bahn-Anlagen in Hamburg, Teil 3 Oberbau (RUO), Fachbereich Streckenmanagement, Stand 06/2006, Kapitel 1.3.1, Blatt 2

Da die bisherige Liegedauer der Spannbetonschwellen im Netz der HOCHBAHN mit 15 Jahren noch recht gering ist, kann die zu erwartende technische Nutzungsdauer lediglich im Vergleich zu anderen Bahnunternehmen gesehen werden. In der Mittel- und Langfriststrategie für die U-Bahn-Gleisanlagen für die Jahre 2006 – 2020 (siehe Anlage 1), geht die HOCHBAHN selber von einer Liegedauer von mehr als 50 Jahren aus. Durch die geringen Achslasten und niedrigen Geschwindigkeiten, im Verhältnis zu den mechanischen Beanspruchungen der Betonschwellen beispielsweise im Netz der DB AG, kann jedoch von einer deutlich höheren Liegedauer von ca. 80 Jahren ausgegangen werden.

### **5.1 Herstellung von Spannbetonschwellen**

Da die bei der HOCHBAHN eingesetzten Spannbetonschwellen nach DB Standard konzipiert werden, unterliegen sie auch den Normen und Richtlinien der Deutschen Bahn, wie die DIN 13230 Teil I-III Bahnanwendungen - Oberbau - Gleis- und Weichenschwellen aus Beton und den Technischen Lieferbedingungen der DB AG für Gleis- und Weichenschwellen aus Beton für Schotteroberbau (Scho) und Feste Fahrbahn (FF), die DBS 918 143. Spannbetonschwellen für die HOCHBAHN werden als Sofortausschaler produziert, wodurch nur eine begrenzte Anzahl von Schalungen verwendet werden muss. Am Anfang des Fertigungsprozess steht die Mischung der Grundstoffe.

Für die Herstellung der Schwellen wird empfohlen, lediglich Portlandzement Typ CEM 1 zu verwenden, dessen Mindestfestigkeit in Übereinstimmung mit EN 197-1, der Klasse 42,5 entsprechen soll. Der Beton muss im Allgemeinen mit der EN 206-1 übereinstimmen und eine Mindestdruckfestigkeit von wenigstens C45/55 MPa aufweisen. Das Verhältnis Wasser/Zement muss unter 0,45 liegen und der minimale Zementgehalt soll 300 kg/m<sup>3</sup> betragen.<sup>35</sup>

Die Zuschlagsstoffe bzw. Gesteinskörnung müssen, neben den Anforderungen aus der DIN EN 12620 und der DIN V 20000-103, noch weitere Kriterien erfüllen. Ab 8 mm muss in der gröberen Körnung die natürliche Gesteinskörnung überwiegend gebrochen sein

---

<sup>35</sup> siehe Bahnanwendung – Oberbau – Gleis- und Weichenschwellen aus Beton – Teil I: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13230-1:2009, S. 14

und der Kategorie C<sub>90/1</sub> gemäß TL Gestein-StB 2004 entsprechen. Ein Frost- und Tauwiderstand von F<sub>1</sub> und MS<sub>18</sub> für grobe Gesteinskörnung sowie ein Gehalt an wasserlöslichen Chlorid-Ionen von  $\leq 0,02$  M.% ist einzuhalten. Weiterhin ist der Prozentsatz leichtgewichtiger organischer Anteile stark beschränkt und die Einhaltung der Gesamtmasse an reaktiven Alkalien im Beton von  $\leq 3,5$  kg/m<sup>3</sup> ist nachzuweisen. Rezyklierte Gesteinskörnung darf nicht verwendet werden.<sup>36</sup>

Das exakte Mischungsverhältnis ist speziell bei dem Verfahren der Spätausschalung sehr wichtig, da sich die Schwellen ansonsten nicht ausschalen lassen oder aber sofort nach der Entschalung zerfließen. Während alle Grundstoffe in einem Mischer gelangen, wird die Schalung mit einem Betonentschalungsöl behandelt und Matrizen eingezogen, um den später notwendigen Hohlraum für die Spannstäbe herzustellen. Der Beton wird nun in die Schalung gegossen, verdichtet und gelangt dann weiter in die Ausschalungsmaschine, in der die Schalung mit einem Deckel verschlossen und die Form gedreht wird. Für rund zwei Minuten verbleibt der Beton in der Schalung.

Nachdem die Betonschwelle aus der Form entfernt wurde, wird sie durch Mitarbeiter auf Sollmaß gebracht, die Hohlräume für die Spannstäbe werden überprüft und die Oberfläche noch kurz nachbehandelt. Daraufhin werden die Schwellen bei 80 % Luftfeuchtigkeit für 24 Stunden gelagert, ehe im Montagebereiche die gewünschten Befestigungen aufgebracht werden sowie der Spannstahl gegen den bereits erhärteten Beton nachträglich verspannt und die Löcher mit Zementleim verschlossen werden. Die Betonschwellen lagern danach im Außenlager bis zur endgültigen Verladung. In einer durchschnittlichen Schicht können so rund 450-500 Schwellen hergestellt werden.

---

<sup>36</sup> siehe DB Standard, Technische Lieferbedingungen, Gleis- und Weichenschwellen für Schotteroberbau (Scho) und Feste Fahrbahn (FF), DBS 918 143, September 2010, S. 8

Neben den B 70 W Standardbetonschwelle werden in Zusammenarbeit mit den Moll Betonwerken auch Sonderschwellen geplant und hergestellt. Seit 2000 wurden die Leitschienen als Anprallschutz in Radien  $\leq 300$  m bei der HOCHBAHN ausgebaut und durch eine Führungsschiene ersetzt. Um auch in diesen Bereichen ohne große Probleme Spannbetonschwellen verlegen zu können, ist die Betonschwelle FS 150 konstruiert worden, die sowohl für den ein- als auch beidseitigen Einsatz von Führungsschienen geeignet ist und komplett aufgeplattet mit vormontierten Schienenbefestigungsmitteln geliefert wird.



**Abbildung 10: Spanntonschwelle für Führungsschiene**

Da die Schwelle in den Abmessungen her kürzer ist (250 cm), ist auch ein Einbau in beengten Bereichen, z.B. in Stationen denkbar, wo das Verlegen der 260 cm Schwelle nicht möglich ist.

## **6. Life Cycle Kosten von Holz- und Betonschwellen**

Die Hamburger HOCHBAHN hat eine stetig steigende Anzahl an Fahrgästen. Immer mehr Menschen nutzen das Angebot des größten Verkehrsunternehmens in Hamburg, täglich sind es über eine Million. Dadurch bedingt erweitert die HOCHBAHN ihr Angebot ständig und mit der neuen U4 wird die Mobilität in Hamburg weiter gesteigert.

Um den immer höheren Ansprüchen gerecht zu werden, verbucht die HOCHBAHN seit 2000 ca. 38 % mehr Fahrten. Der Fahrplan wurde verdichtet und die U-Bahnen fahren am Wochenende in der Nacht durch. Im Vergleich zu den Anfangsjahren ist zudem die maximale Geschwindigkeit und die Wagonanzahl immer weiter erhöht worden. Daraus resultieren erhöhte Beanspruchungen des Fahrwegs, denen dieser gerecht und gegebenenfalls angepasst werden muss. Die ökonomische Betrachtung, d.h. die Berücksichtigung aller anfallenden Kosten des Fahrwegs, spielt bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und einer kostenoptimierten sowie angepassten Materialwahl eine wichtige Rolle.

### **6.1 Lebenszykluskosten**

Die Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost – LCC) sind die Summe aller anfallender Kosten einer Anlage, die im Laufe des Lebenszyklus auftreten. Diese sind im Allgemeinen:

- die Anschaffungskosten
- die Betriebs- und Instandhaltungskosten
- die Entsorgungskosten

Die Betrachtung der LCC von baulichen Anlagen ist dabei sehr komplex, da sie meist eine hohe Lebensdauer haben, abhängig von Umweltbedingungen sind und die Preisentwicklungen von verschiedensten Faktoren abhängt und somit nur unsicher bestimmt werden kann. Daraus ergeben sich speziell im Bauwesen viele Unsicherheitsfaktoren, die die Lebenszykluskosten beeinflussen. Der Vergleich von LCC verschiedener Produkte ist jedoch für die Optimierung der Anlagen von großer Bedeutung. Ein Ziel ist es dabei, durch die ganzheitliche Betrachtung der Produkte gute Vergleichsmöglichkeiten zu haben und verschiedene Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Dabei steht die Minimierung aller während der Lebensdauer anfallenden

Kosten sowie die Bewertung und Verbesserung der Instandhaltungsstrategien primär im Vordergrund.

Grundsätzlich können die LCC auf drei Arten günstig beeinflusst werden. Zum einen können die Investitionskosten gesenkt werden wodurch bei gleichbleibender Qualität in der Summe die Kosten des Produkts niedriger ausfallen. Weiterhin kann die Lebensdauer verlängert oder aber auch die jährlichen Betriebs- und Instandhaltungskosten reduziert werden. Um eine verbesserte Wirtschaftlichkeit des Produktes zu erreichen, gilt es den relevanten Faktor zu bestimmen und ihn so günstig zu beeinflussen, dass die anderen beiden Faktoren darunter nicht leiden. Speziell bei der Optimierung der gesamten Infrastruktur ist es manchmal notwendig, sich mit der zweitbesten Lösung in Projektierung, Beschaffung und Bau oder im Unterhalt zu Gunsten des jeweils anderen Parts zu begnügen. Für einzelne Anlagen ist es teilweise nötig, auf die beste Lösung zu verzichten, um im Gegenzug den gesamten Anlagenbestand im Netz optimieren zu können.<sup>37</sup>

### **6.1.1 Rahmenbedingungen bei der LCC-Betrachtung**

In dieser Untersuchung geht es direkt um den Vergleich von Holz und Betonschwellen im Einsatz bei der HOCHBAHN. Das Ziel ist es, den ganzheitlichen Lebenszyklus beider Produkte zu betrachten und dabei einen optimalen Vergleich zu erreichen. Aus der Analyse können dann verschiedene Entscheidungskriterien speziell auf die Materialwahl bereitgestellt werden, treibenden Kosten festgestellt und Alternativen aufgezeigt werden, um die Kosten die während der gesamten Lebensdauer anfallen möglichst zu minimieren.

Ein Vergleich von Holz- und Betonschwellen ist jedoch nicht in dem gesamten Streckennetz machbar. So gibt es Bereiche, in denen der Einsatz von Betonschwellen nicht möglich ist und sie deswegen in der LCC Gegenüberstellung nicht mit aufgeführt sind:

- Tunnelstrecken
- Brücken- und Viaduktstrecken

---

<sup>37</sup> siehe SBB CFF FFS, Lebens-Zyklus-Kosten für bahntechnisches Produkte-Management bei der SBB Infrastruktur, Version 1.2, September 2005 S. 1

- Allgemein Bauwerke, die dem erhöhten Gewicht durch Betonschwellen nicht standhalten

Eine Betrachtung der Lebenszykluskosten und die Auswirkungen der verlängerten Liegedauer von Holzschwellen in Tunneln ist beispielhaft in 6.2 festgehalten.

Um einen repräsentativen Vergleich zu erreichen sind beide Produkte unter gleichen Rahmenbedingungen zu betrachten. Die LCC sind dabei nur rein qualitativ zu sehen und können unter realen Bedingungen deutlichen Schwankungen unterliegen. Die Berechnungen erfolgen pro laufenden Meter, da die zu bearbeitenden Streckenabschnitte immer wieder variieren. Eine derartige Berechnung pro laufenden Meter ist am effektivsten, da eine Kostenabschätzung jeweils in Bezug auf die gewünschte Länge so am einfachsten ist. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Gesamtkosten im Verhältnis sinken, je länger der zu erneuernde Abschnitt ist und sie lediglich als Abschätzung dienen. Deutlich wird das bei der Berechnung der Gleisentspannung, die für jede Baustelle 60 m vor und nach dem erneuerten Bereich anfällt. Somit erklären sich die hohen Kosten für die beispielhafte Berechnung pro laufenden Meter.

In der Analyse sind die Betriebserschwerungskosten nicht explizit mit aufgelistet. Bei einer Gleiserneuerung werden Langsamfahrstellen eingerichtet, die eine vernachlässigbare Einwirkung auf die Jahreskosten des Schwellenmaterials haben. Unabhängig von der Schwellenart ist die Betrachtung unter guten Rahmenbedingungen durchgeführt worden. Die Anlieferung der Arbeitsmaterialien erfolgt direkt über einen Arbeitszug (Az), es liegen keine beengten Platzverhältnisse vor und der Einsatz eines Zweibegebaggers ist möglich. Je nach örtlichen Verhältnissen können diese Annahmen variieren, was wiederum zu veränderten Kosten führt. Die Kosten für eine Gleiserneuerung pro Meter dürften so unter realen Bedingungen etwas höher sein.

Als Umrechnungsfaktor beim Schotter [ $\text{m}^3/\text{t}$ ] wird als Richtwert 1,6 angenommen und der Schwellenbedarf beträgt (gemäß RUO) in der 65er-Teilung 1,53 Schwellen pro Meter, in der 70er Teilung 1,4 (siehe Anlage 2). Die verwendeten Kalkulationsdaten basieren größtenteils auf Erfahrungswerten der HOCHBAHN oder aber auf direkten Angaben der Schwellenhersteller

## 6.1.2 Kalkulation der LCC

### 6.1.2.1 Kalkulationsdaten

<b>Annahmen zur Schwelle</b>	<b>Buchenholz</b>	<b>Beton</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten [€/St]</li> <li>• Liegedauer 65er &amp; 70er Teilung LD<sub>BHS</sub> [a]</li> <li>• Schotterbedarf [m<sup>3</sup>/m]</li> </ul>	105,00 35 0,45	75,00 50 0,45
<b>Annahmen zum Einbau inkl. Personal, Gerät &amp; Material</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten Schotter [€/t]</li> <li>• Schotter ausbauen &amp; aufladen [€/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Schotter einbauen [€/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Planum herstellen [€/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Schwellenerneuerung Holz direkt von Az [€/St]</li> <li>• Stromschiene ausbauen und aufladen [€/m]</li> <li>• Stromschiene aufbauen [€/m]</li> <li>• Gleis entspannen [€/m]</li> <li>• 1. Stopfgang [€/m]</li> <li>• 2. Stopfgang [€/m]</li> </ul>	25,00 68,00 60,00 3,00 125,00 25,00 34,00 4,20 38,00 28,00	25,00 68,00 60,00 3,00 132,00 25,00 34,00 4,20 38,00 28,00
<b>Annahmen zur Unterhaltung inkl. Personal, Gerät &amp; Material</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instandhaltungszyklus [a]</li> <li>• Nachstopfung [€/m]</li> <li>• Kleineisendurcharbeitung [€/m]</li> </ul>	4 – 7 28,00 24,90	∞ 28,00 24,90
<b>Annahmen zur Entsorgung inkl. Geräte und Transport</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entsorgungskosten [€/t]</li> </ul>	35,00	17,90

Tabelle 3: Kalkulationsdaten

### 6.1.2.2 Buchenholzschwelle in der 70er Teilung

#### 1. Investitionskosten (inkl. Transport) [€/m]

1.1 Schwelle, inkl. Befestigungsmittel (1,4 Schwellen/m * 105 €/St)	147,00
1.2 Schotter (1,6 * 0,45 m³/m * 25 €/t)	18,00
<hr/>	
Summe 1.1 – 1.2	<u>165,00</u>

#### 2. Einbaukosten (inkl. Personal, Gerät und Transport) [€/m]

2.1 Schotter ausbauen und aufladen (1,4 * 0,45 m³/m * 68 €)	42,84
2.2 Planum herstellen (3,0 m * 1 m * 3 €/m²)	9,00
2.3 Stromschiene ausbauen & aufladen (1 m * 25 €/m)	25,00
2.4 Schwellenerneuerung vom Az. (1,4 Schwellen/m * 125 €/St.)	175,00
2.5 Schotter einbauen (1,4 * 0,45 m³/m * 60 €/m³)	37,80
2.6 Stromschiene aufbauen (1 m * 34 €/m)	34,00
2.7 Gleis entspannen ((120 m + 1m) * 4,20 €/m)	508,20
2.8 1. Stopfgang (1 m * 38 €/m)	38,00
2.9 2. Stopfgang nach 6 Wochen (1 m * 28 €/m)	28,00
<hr/>	
Summe 2.1 – 2.9	<u>897,84</u>

#### 3. Instandhaltungskosten [€/m]

3.1 Nachstopfung (35 / 7 * 28 €/m)	140,00
3.2 Kleineisendurcharbeitung (35 / 5 * 24,90 €/m)	174,30
<hr/>	
Summe 3.1 – 3.2	<u>314,30</u>

Schwellenvergleich bei der HOCHBAHN

---

4. Entsorgungskosten [€/m]

4.1 Entsorgung (0.1 t/St. \* 35 €/t \* 1,4 Schwellen/m) 4,90

---

Summe 4.1 4,90

**Gesamtkosten [€/m] 1382,04**

**Jahreskosten ( $\Sigma_{\text{ges}} / L_{\text{BHS}}$ ) [€/m] 39,49**

### 6.1.2.3 Spannbetonschwelle in der 70er Teilung

#### 1. Investitionskosten (inkl. Transport) [€/m]

1.1 Schwelle, inkl. Befestigungsmittel (1,4 Schwellen/m * 75€/St.)	105,00
1.2 Schotter (1,6 * 0,45 m³/m * 25 €/t)	18,00

---

Summe 1.1 – 1.2	<u>123,00</u>
-----------------	---------------

#### 2. Einbaukosten (inkl. Personal, Gerät und Transport) [€/m]

2.1 Schotter ausbauen & aufladen (1,4 * 0,45 m³/m * 68 €)	42,84
2.2 Planum herstellen (3,0 m * 1 m * 3 €/m²)	9,00
2.3 Stromschiene ausbauen & aufladen (1 m * 25 €/m)	25,00
2.4 Schwellenerneuerung vom Az. (1,4 Schwellen/m * 132 €/St.)	184,80
2.5 Schotter einbauen (1,4 * 0,45 m³/m * 60 €/m³)	37,80
2.6 Stromschiene aufbauen (1 m * 34 €/m)	34,00
2.7 Gleis entspannen ((120 m + 1m) * 4,20 €/m)	508,20
2.8 1. Stopfgang (1 m * 38 €/m)	38,00
2.9 2. Stopfgang (1 m * 28 €/m)	28,00

---

Summe 2.1 – 2.9	<u>907,64</u>
-----------------	---------------

#### 3. Entsorgungskosten [€/m]

3.1 Entsorgung (0,28 t/St. * 17,90 €/t * 1,4 Schwellen/m)	7,02
---	------

---

Summe 3.1	<u>7,02</u>
-----------	-------------

<b>Gesamtkosten [€/m]</b>	<b>1037,66</b>
---------------------------	----------------

<b>Jahreskosten (<math>\sum_{\text{ges}} / L_{\text{BS}}</math>) [€/m]</b>	<b><u>20,75</u></b>
--	---------------------

#### 6.1.2.4 Buchenholzschwellen in der 65er Teilung

##### 1. Investitionskosten (inkl. Transport) [€/m]

1.1 Schwelle, inkl. Befestigungsmittel (1,53 Schwellen/m * 105€/St.)	160,65
1.2 Schotter (1,6 * 0,45 m³/m * 25 €/t)	18,00

---

Summe 1.1 – 1.2 178,65

##### 2. Einbaukosten (inkl. Personal, Gerät und Transport) [€/m]

2.1 Schotter ausbauen & aufladen (1,53 * 0,45 m³/m * 68 €)	46,82
2.2 Planum herstellen (3,0 m * 1 m * 3 €/m²)	9,00
2.3 Stromschiene ausbauen & aufladen (1 m * 25 €/m)	25,00
2.4 Schwellenerneuerung vom Az. (1,53 Schwellen/m * 125 €/St.)	191,25
2.5 Schotter einbauen (1,53 * 0,45 m³/m * 60 €/m³)	41,31
2.6 Stromschiene aufbauen (1 m * 34 €/m)	34,00
2.7 Gleis entspannen ((120 m + 1m) * 4,20 €/m)	508,20
2.8 1. Stopfgang (1 m * 38 €/m)	38,00
2.9 2. Stopfgang (1 m * 28 €/m)	28,00

---

Summe 2.1 – 2.9 921,58

##### 3. Instandhaltungskosten [€/m]

3.1 Nachstopfung (35 / 7 * 28 €/m)	140,00
3.2 Kleineisendurcharbeitung (35 / 4 * 24,90 €/m)	217,88

---

Summe 3.1 – 3.2 357,88

Schwellenvergleich bei der HOCHBAHN

---

4. Entsorgungskosten [€/m]

4.1 Entsorgung (0.1 t/St. \* 35 €/t \* 1,53 Schwellen/m) 5,34

---

Summe 4.1 5,34

**Gesamtkosten [€/m]**

**1463,45**

**Jahreskosten ( $\sum_{\text{ges}} / L_{\text{BHS}}$ ) [€/m]**

**41,81**

### 6.1.2.5 Spannbetonschwelle in der 65er Teilung

#### 1. Investitionskosten (inkl. Transport) [€/m]

1.1 Schwelle, inkl. Befestigungsmittel (1,53 Schwellen/m * 75€/St.)	114,75
1.2 Schotter (1,6 * 0,45 m³/m * 25 €/t)	18,00

---

Summe 1.1 – 1.2	<u>132,75</u>
-----------------	---------------

#### 2. Einbaukosten (inkl. Personal, Gerät und Transport) [€/m]

2.1 Schotter ausbauen & aufladen (1,53 * 0,45 m³/m * 68 €)	46,82
2.2 Planum herstellen (3,0 m * 1 m * 3 €/m²)	9,00
2.3 Stromschiene ausbauen & aufladen (1 m * 25 €/m)	25,00
2.4 Schwellenerneuerung vom Az. (1,53 Schwellen/m * 132 €/St.)	201,96
2.5 Schotter einbauen (1,53 * 0,45 m³/m * 60 €/m³)	41,31
2.6 Stromschiene aufbauen (1 m * 34 €/m)	34,00
2.7 Gleis entspannen ((120 m + 1m) * 4,20 €/m)	508,20
2.8 1. Stopfgang (1 m * 38 €/m)	38,00
2.9 2. Stopfgang (1 m * 28 €/m)	28,00

---

Summe 2.1 – 2.9	<u>932,29</u>
-----------------	---------------

#### 3. Entsorgungskosten [€/m]

3.1 Entsorgung (0,28 t/St. * 17,90 €/t * 1,53 Schwellen/m)	7,67
--	------

---

Summe 3.1	<u>7,67</u>
-----------	-------------

<b>Gesamtkosten [€/m]</b>	<b>1072,71</b>
---------------------------	----------------

<b>Jahreskosten (<math>\Sigma_{\text{ges}} / L_{\text{BHS}}</math>) [€/m]</b>	<b><u>21,45</u></b>
---	---------------------

### 6.1.3 Interpretation und Fazit der LCC Analyse

Kosten [€/m]	Buchenholzschwellen		Spannbetonschwellen	
	65er Teilung	70er Teilung	65er Teilung	70er Teilung
Investitionskosten	178,65	165,00	132,75	123,00
Einbaukosten	921,58	897,84	932,29	907,64
Instandhaltungskosten	357,88	314,30	0,00	0,00
Entsorgungskosten	5,34	4,90	7,67	7,02
Gesamtkosten	1463,45	1382,04	1072,71	1037,66
Jahreskosten	41,81	39,49	21,45	20,75

**Tabelle 4: Vergleich der Kosten**

Aus der Gegenüberstellung der Kosten in Tabelle 4 wird ersichtlich, dass die Betonschwelle in den Jahreskosten, unabhängig von der Teilung, deutlich günstiger ist. In der 65er Teilung ist die Buchenholzschwelle in den Jahreskosten 89 %, in der 70er Teilung 85,5 % teurer. Diese Unterschiede sind auf die deutlich längere Liegedauer und die vernachlässigbare Instandhaltung der Betonschwellen zurückzuführen.

Die Investitionskosten der Holzschwellen sind im Allgemeinen 40 % höher als die der Standardbetonschwelle. Geringfügige Unterschiede im Schotterbedarf sind dabei zu vernachlässigen. Die Einbaukosten sind bei der Holzschwelle günstiger. Dies liegt daran, dass die Betonschwellen durch ihr Gewicht von rund 280 kg höhere Transportkosten aufweisen. Sie sind schwerer im Handling, für den Einbau mit dem Zweibegebagger ist dieser Unterschied allerdings nicht relevant. Die weiteren Annahmen zum Einbau zeigen keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Schwellenmaterials auf und haben somit weder einen kostentreibenden noch einen kostensenkenden Einfluss auf die Jahreskosten.

Ein wesentlicher Unterschied besteht bei der Instandhaltung. Laut § 57 der BOStrab sind Inspektionen der Gleisanlagen, planmäßig wiederkehrend innerhalb von fünf Jahren durchzuführen. Speziell stark beanspruchte Holzschwellen müssen regelmäßig, bis zu alle zwei Jahre gewartet werden und eine Kleiseisendurcharbeitung ist, durch die höheren Einwirkungen, unumgänglich. Die Rippenplatten können sich unter den Belastungen in die Holzschwelle einarbeiten, wodurch Nachbesserung zur Sicherung der Sollage

durchgeführt werden müssen. Durch das Einsparen der Leitschiene ergeben sich erhöhte Belastungen der Kleineisen und dadurch auch höhere Kosten für die Schraubenlochanierungen der Holzschwellen. Bei den Betonschwellen der HOCHBAHN sind bisher noch keine Instandhaltungsmaßnahmen notwendig gewesen und die Schwellen werden als nahezu wartungsfrei angenommen. Durch die angestrebte lange Liegedauer kann eine nachträgliche Schraubenlochanierung jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Weiterhin geht die HOCHBAHN davon aus, dass bei der Betonschwelle aufgrund der hohen Lagestabilität im Gleis keine weiteren Nachstopfungen notwendig sind. Auch bei dieser Annahme kann lediglich von Erkenntnissen der letzten 13 Jahre ausgegangen werden. Mögliche Nachstopfungen bei den Betonschwellen gehen somit nicht in die LCC Betrachtung ein. Nachstopfungen sind stark von den Untergrundverhältnissen abhängig und variieren daher in der Strecke sehr. So gibt es Abschnitte im Netz, in denen bei Holzschwellen schon nach sieben Jahren nachgestopft werden musste, aber auch welche, in denen die Schwellen nach 15 Jahren noch in Sollhöhe liegen. Ein erheblich verlängerter Zyklus zeichnet sich bei den Betonschwellen aber ab, auch wenn eine Nachstopfung, beispielsweise durch höhere Schotterpressung, hervorgerufen durch das rund drei-fache Gewicht gegenüber der Holzschwelle nicht ganz auszuschließen ist.

Es wird aber deutlich, dass die Betonschwelle günstiger in der Instandhaltung ist als die Holzschwelle. Selbst wenn lediglich von einem verlängerten Instandhaltungszyklus bei Betonschwellen ausgegangen wird, sind die Jahreskosten unter denen von Holzschwellen und wirken sich somit kostensenkend auf die LCC aus.

Die Entsorgungskosten der Holzschwelle pro laufenden Meter sind geringer als die der Betonschwelle und das, obwohl die Kosten pro Tonne rund 95 % höher sind, was an dem höheren Gewicht der Betonschwelle liegt. So liegen in der 65er Teilung pro laufenden Meter rund 428,4 kg Betonschwelle, im Verhältnis zu ca. 153 kg Holzschwelle. Durch die deutlich höhere Liegedauer der Spannbetonschwelle gegenüber der betrachteten Buchenholzschwelle fallen die jährlich aufkommenden Kosten aber schon bei der angenommenen Lebensdauer von 35 bzw. 50 Jahren nahezu identisch aus. Da die mögliche technische Nutzungsdauer von Betonschwellen im Netz der HOCHBAHN mehr als 50 Jahre beträgt, kann davon ausgegangen werden, dass die Entsorgungskosten der

Betonschwellen, betrachtet auf den ganzen Lebenszyklus, unter denen der Holzschwellen liegen.

Bei dem Vergleich wird deutlich, dass die Instandhaltungskosten die Kosten sind, die die Holzschwelle in den Gesamtkosten teuer als die Betonschwelle erscheinen lässt. Die Instandhaltung der Betonschwelle wurde bei dieser Betrachtung jedoch auch vernachlässigt. Um die Auswirkungen dieser Kosten genauer zu bewerten, werden im Folgenden ebenfalls für die Betonschwellen in der 70er Teilung Instandhaltungskosten angesetzt. Dabei wird exemplarisch von den gleichen Zyklen von fünf Jahren bei der Kleineisendurcharbeitung und sieben Jahre für die Nachstopfungen sowie den gleichen Kosten wie bei Holzschwellen ausgegangen.

<b>Kosten [€/m]</b>	<b>Betonschwelle</b>	<b>Buchenholzschwelle</b>
Gesamtkosten 70er Teilung ohne angesetzte Instandhaltung	1037,66	1067,74
Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen	$(50 / 7) * 28€/m +$ $(50 / 5) * 24,90 €/m$ = 449,0	314,3
Gesamtkosten 70er Teilung inkl. Instandhaltung	1486,66	1382,04
Jahreskosten	29,73	39,49

**Tabelle 5: Betonschwelle inklusive Instandhaltungskosten**

Ein Vergleich mit den Buchenholzschwellen zeigt, dass die Gesamtkosten der Betonschwellen mit den angesetzten Instandhaltungskosten lediglich rund 7 % teurer sind. Dabei ist zu beachten, dass die angesetzten Zyklen für die Nachstopfung und die Kleineisendurcharbeitung unter realen Bedingungen länger und die Kosten nicht so hoch sein dürften. Unter Berücksichtigung der Liegedauer der Betonschwelle, sind die jährlich anfallenden Kosten ca. 33 % günstiger gegenüber denen der Holzschwelle. Dieser Vergleich zeigt deutlich, dass selbst unter schlechten Bedingungen die Betonschwelle in den Jahreskosten unter denen der Holzschwellen liegt.

Diese LCC Analyse bezieht sich auf den Vergleich von Standardspannbetonschwellen und Holzschwellen. Durch den Einbau von Speziaischwellen, beispielsweise beim Einsatz von Führungsschienen oder aber beengten Bereichen wie Stationen, können sich die Investitionskosten erhöhen, wodurch die LCC ebenfalls steigen. Diese Betrachtung ist

allerdings explizit unter den realen Bedingungen zu führen, da der Einbau der Schwellen stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig ist. Die Jahreskosten werden aber weiterhin unter denen der Holzschwelle liegen. In der 70er Teilung müssten die Investitionskosten pro laufenden Meter um über 912 % steigen, damit die Jahreskosten über denen der Holzschwelle liegen, bei einer Annahme von 300 € pro Sonderschwelle, würde dieser Wert nicht erreicht werden. Dazu kommt, dass die Instandhaltungskosten in stark beanspruchten Bereichen weiterhin unter denen der Holzschwelle liegen, somit ebenfalls eine kostensenkende Funktion haben.

Grundsätzlich kann unter den verwendeten Rahmenbedingungen die Annahme getroffen werden, dass der Einsatz von Spannbetonschwellen im Netz der HOCHBAHN, bedingt durch die geringen bis gar nicht vorhandenen Instandhaltungskosten sowie der deutlich längeren Liegezeit, erheblich wirtschaftlicher ist.

### **6.2 LCC von Holzschwellen im Tunnel**

Der Einsatz von Holzschwellen in den Tunneln der HOCHBAHN ist aufgrund des engen Lichtraumprofils nahezu alternativlos. Weiterhin sind einige Tunneldecken durch Pfeiler abgestützt die, um eine möglichst großflächige Verteilung der anstehenden Lasten in das Erdreich zu erreichen, in einem nach unten hin breiter zulaufenden Fundament verankert sind. Dadurch ist es teilweise notwendig, dass Schwellen gekürzt werden müssen, um einen Einbau zu realisieren. Bei Betonschwellen ist dies nicht möglich. Desweiteren sind die verwendeten Schwellen aufgrund der hohen Liegedauer (siehe 4.2.1.1) sehr wirtschaftlich. Da keine Betonschwellen in den Tunneln verlegt sind, ist ein Vergleich beider Schwellenarten im Tunnel nicht möglich. Die Berechnung der LCC von Holzschwellen im Tunnel hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Gerade der Einbau ist deutlich teurer, da keine Großgeräte zum Einsatz kommen können und die Schwellen per Hand verlegt werden müssen.

Speziell in Tübbing-Tunneln, entstehen durch die beengten Platzverhältnisse weitere Problematiken, da die Lagerung und Anlieferung des Arbeitsmaterials mittels Versorgungszüge deutlich aufwendiger ist. Durch die Lagerung des Materials fernab der Baustelle, ergeben sich erhöhte Transportkosten, die jedoch je nach Einbausituation stark variieren können. Das Ablegen des Schotters in Big Bags auf dem Kabelkanal ist möglich,

aber auch das verursacht Mehrkosten gegenüber der Anlieferung durch einen Arbeitszug. Weiterhin ist in den nächtlichen Betriebspausen lediglich ein Schwellenaustausch auf ca. 30 m (Erfahrungswert der HOCHBAHN) möglich, was ebenfalls eine Erhöhung der Einbaukosten zur Folge hat. Durch Teilsperrungen oder komplette Sperrungen eines Abschnittes für eine zusammenhängende Erneuerung, steigen die Betriebserschwerungskosten, so dass diese nun in den LCC beachtet werden müssen. Diese variieren ebenfalls je nach Verfahren und zu bearbeitenden Abschnitt.

Die lange Liegedauer von Kiefernholzschnellen in Tunneln von über 65 Jahren wirkt sich stark kostensenkend auf die LCC aus. Erhöhen sich die Einbaukosten in der 70er Teilung beispielhaft durch die oben genannten Faktoren um 100 % gegenüber den Kosten für Holzschwellen auf freier Strecke (unter gleichbleibenden Investitions-, Instandhaltungs- und Entsorgungskosten) so liegen die Jahreskosten der Schnellen, bei einem betrachteten Zeitraum von 65 Jahren bei 35,08 € und damit noch ca. 12 % unter denen von Buchenholzschnellen auf Freistrecken. Unter der Annahme, dass der betrachtete Tunnel gut durchlüftet und abgedichtet ist, verringern sich die Instandhaltungskosten noch, was sich ebenfalls kostensenkend auf die LCC auswirkt. Ähnlich wie bei dem Vergleich von Holz- und Betonschnellen zeigt sich, dass die stark verlängerte Liegedauer von Holzschwellen im Tunnel, trotz erhöhter Einbaukosten, erheblich positiv auf die Jahreskosten wirkt und zu der Wirtschaftlichkeit von Holzschwellen in nicht bewitterten Bereichen beiträgt.

## 7. Bestandsaufnahme des Schwellenmaterials

Im Folgenden werden speziell drei Streckenabschnitte im Netz der HOCHBAHN betrachtet. Zwei der Abschnitte liegen dabei in der Innenstadt auf der Strecke A, bei dem anderen handelt es sich um den mit Betonschwellen versehenen Abschnitt der Strecke C (siehe Anlage 3).

- |   |           |
|---|-----------|
| 1. Tunnelstrecke Rödingsmarkt – Rathaus | Strecke A |
| 2. Viaduktstrecke Rödingsmarkt          | Strecke A |
| 3. Freistrecke Ohlsdorf                 | Strecke C |

Anhand der Bestandsaufnahme wird, unter Berücksichtigung der örtlichen Bedingungen, eine Prognose der Instandhaltungskosten gestellt und im Weiteren eine Empfehlung einer kostenoptimierten Materialwahl gegeben.

### 7.1 Betrachtung und Analyse der Streckenabschnitte

#### 7.1.1 Tunnelstrecke Rödingsmarkt - Rathaus

Der betrachtete Tunnelabschnitt liegt zwischen den Haltestellen Rödingsmarkt und Rathaus in der Strecke A. In Tunnelmund der Haltestelle Rathaus liegen Holzschwellen, die 1990 eingebaut wurden, die Holzschwellen im Tunnel wurden 1976 verlegt. Alle Schwellen sind in einem äußerlich guten Zustand, ein Verschleiß ist nicht erkennbar.

Die beispielhafte LCC Vergleich in 6.1.4 zeigt bereits, dass die Holzschwellen in Tunneln sehr wirtschaftlich sind und ein Verbau von anderen Materialien nicht in Betracht gezogen wird. Um die Instandhaltungskosten so gering wie möglich zu halten, ist darauf zu achten, dass ein dauerhafter Luftaustausch möglich ist und der Eintritt von Feuchtigkeit minimiert wird, um bestenfalls eine Schwellenfeuchte unter den signifikanten Werten aus 4.2.1.1 zu erreichen. Durch die hohe Taktfrequenz im Netz und der damit verbundenen hohen Anzahl an Zugdurchfahrten, ist größtenteils für ausreichend Durchlüftung gesorgt. In einigen Bereichen sind zudem Lüftungsschächte eingebaut. Um Feuchteinträge von außen zu verhindern ist, speziell in Tunneln mit offener Sohle, eine ausreichend dimensionierte Drainage anzuordnen. Ältere Tunnelanlagen sind früher mit Blei

abgedichtet wurden. Ergeben sich hierbei Undichtigkeitsstellen, sind diese beispielsweise mit Kunstharz zu verpressen, um dadurch wieder eine ausreichende Abdichtung zu erlangen.

In dem betrachteten Tunnelabschnitt sind derartige Schwachstellen nicht auszumachen. Da die Schwellen nach einer Liegedauer von 35 Jahren noch in einem oberflächlich guten Zustand sind und kein Verschleiß erkennbar ist, sollten bei einer Schwellenerneuerung ebenfalls wieder Holzschwellen eingebaut werden. Wie die Studie des IVEs bereits feststellte, haben salzdruckimprägnierte Kiefernholzschwellen keine Nachteile gegenüber Schwellen aus Teeröltränkung und da die Geruchsbelästigung und die Ausdünstung von Schadstoffen deutlich geringer ist, sollten diese auch verbaut werden. Die Instandhaltungskosten werden, ebenfalls bedingt durch die guten klimatischen Verhältnisse, gering sein. Gerade bei Schwellen mit einer höheren Liegedauer sind jedoch regelmäßige Wartungen und Auswertungen der Inspektionsergebnisse wichtig, um eine möglichst genaue Bestimmung der technischen Nutzungsdauer zu erlangen, eintretende Schäden frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls zu beheben.

Eine mögliche Alternative, Betonschwellen mit kleinerem Profil nach dem Vorbild der Berliner U-Bahn zu verbauen, ist meiner Meinung nach nicht wirtschaftlich und auch aufgrund der in 6.1.4 erläuterten Schwierigkeiten beim Verlegen von Betonschwellen im Tunnel, nur schwer zu realisieren. Durch den geringen Bedarf an diesen Sonderschwellen, würden die Produktionskosten des Schwellenherstellers und damit auch die Investitionskosten für die HOCHBAHN deutlich steigen und aufgrund der langen Liegedauer der Holzschwellen in Tunneln, in keiner Relation zu einander stehen.

### **7.1.2 Viaduktstrecke Rödingsmarkt**

Von der Haltestelle Rödingsmarkt ausgehend, verläuft die Strecke weiter über Stein- und Stahlviadukte in einer engen Rechtskurve und mündet dann in den in 7.1.1 betrachteten Tunnel mit Anschluss an die Haltestelle Rathaus. In dem hier betrachteten Abschnitt liegen Holzschwellen aus dem Jahr 2008 und 2010. Da die HOCHBAHN aus funktionalen sowie statischen Gründen für Brücken- und Viaduktstrecken weiterhin Holzschwellen vorsieht (siehe 6.1.), wurden in diesem Abschnitt ebenfalls teerölimprägnierte Buchenholzschwellen eingebaut. Die Strecke verläuft durch den Innenstadtbereich und

mehrere Hotels befinden sich in direkter Umgebung. Daher bestehen erhebliche Anforderungen an den Lärmschutz und die U-Bahnen passieren den engen Radius nur mit reduzierter Geschwindigkeit. Zudem wird die bogenäußere Schiene durch eine automatische Sprinkleranlage bei einer Zugdurchfahrt bewässert, um durch das Feuchthalten der Schiene das aufkommende Quietschen zu verringern und die Geräuschbelästigung zu minimieren.

Der erhöhte Feuchteintrag sowie die Fahrt durch den engen Radius wirken sich direkt in einer Erhöhung der Instandhaltungskosten aus. Die Schienen sind alle drei Jahre zu tauschen und durch die stärkere Rostbildung verschleifen die Kleineisen schneller. Auch die Schwellen zeigen teilweise oberflächlich leichte Grünablagerungen.



**Abbildung 11: Schwelle mit Sprinkleranlage**

Abbildung 10 zeigt eine deutliche Abnutzung am Schienenkopf nach bereits einem Jahr Liegedauer. Die Ablagerung von Mosen und Algen sind nicht an jeder Schwelle vorzufinden. So ist auch hier eine regelmäßige Wartung unumgänglich, um auftretende Schäden, die die Lagesicherheit des Gleises negativ beeinflussen, schnell zu erkennen und instandzusetzen. Ein möglicher Einzelschwelenaustausch ist aufgrund der vorhandenen Holzschwellen möglich. Die Holzschwellen haben den weiteren Vorteil, dass

sie ein gutes Dämpfungsverhalten und ein damit hohen Erschütterungsschutz aufweisen. Speziell für die historischen Viadukte ist das ein wesentlicher Punkt.

Alternativ zu den verwendeten Holzschwellen könnten auch Betonschwellen in Betracht gezogen werden. Ob dies aus statischen Gründen überhaupt möglich ist gilt aber zu prüfen. Eine weitere Möglichkeit, die Betonschwellen an die Achslasten der HOCHBAHN von 10 t anzupassen und kleiner zu dimensionieren oder bei der Herstellung der Schwellen Porenbeton zu verarbeiten, um das Gewicht auf rund 180 – 190 kg zu verringern, halte ich aufgrund der hohen Produktionskosten für nicht wirtschaftlich. Alternativ zu Betonschwellen könnte auch ein Einsatz von, den bereits in einer Weiche erprobten, FFU Schwellen in Frage kommen. Ob die höheren Anschaffungskosten durch die geringeren Lebenszyklus- und Wartungskosten ausgeglichen werden, ist aber fraglich. Zudem würden durch die Sprinkleranlage weiterhin die Kleiseisen infolge erhöhter Rostbildung angegriffen werden.

Die Betrachtung zeigt, dass die Sprinkleranlagen die Abnutzung begünstigen. Eine alternative stationäre Schmieranlage, die das Schmiermittel gezielt auf die Schiene aufbringt, könnte die Instandhaltungskosten der Gleisanlage verringern. Bei der HOCHBAHN wurden früher ebenfalls Schmierstoffe verwendet, die durch einen Schmierzug eingebracht wurden. Aus umweltschutztechnischen Gründen ist dies jetzt nicht mehr erlaubt. Eine Möglichkeit des Einsatzes einer stationären Schienenschmierung (z.B. das System von Lincoln)<sup>38</sup> mit einem gut biologisch abbaubaren Schmierstoff und deren Wirtschaftlichkeit, ist daher vor Ort zu prüfen.

Sollte es im Laufe der Jahre zu einem Umbau der Viadukte kommen, könnte auch eine Vergrößerung des Radius, nach dem Vorbild des weiterführenden Viaduktes Richtung Landungsbrücken, die Belastung für Schiene und Schwelle verringern. Durch die engen Platzverhältnisse in dem dicht bebauten Gebiet und der vorhandenen Fundamente würde dies aber zu sehr hohen Kosten führen.

Durch die Probleme und Fragestellungen infolge eines Einsatzes von Beton- bzw. FFU-Schwellen auf dieser Viaduktstrecke zur möglichen Reduzierung der Instandhaltungskosten sehe ich die Holzschwelle auf dieser Strecke als am besten geeignet an. Alternative Varianten zu den Sprinkleranlagen wie stationäre

---

<sup>38</sup> siehe [www.lincolnindustrial.de](http://www.lincolnindustrial.de)

Schmiersysteme, könnten die Kosten durch eine längere Liegedauer der Schwellen und einen geringeren Instandhaltungsbedarf senken, müssten jedoch explizit betrachtet werden.

### 7.1.3 Freistrecke Ohlsdorf

Der hier betrachtete Abschnitt befindet sich im Bereich der Strecke C in der Nähe der Haltestelle Ohlsdorf. In der Station liegen Holzschwellen, auf der Freistrecke sind seit 1998 Betonschwellen verlegt wurden. Äußerlich sind die Betonschwellen alle in einem guten Zustand und bisher sind noch keine Instandhaltungsmaßnahmen angefallen.



**Abbildung 12: Betonschwellen im Netz der HOCHBAHN**

Die Betonschwellen weisen eine hohe Lagestabilität auf. Bereits nach dem 1. Stopfgang lagen die Schwellen in Solllage und somit wurde beim Einbau von später verlegten Betonschwellen auf den 2. Stopfgang verzichtet. Inspektionen der Kleineisen ergaben,

dass die Verspannkraft weiterhin gut ist und sich dort kein Verschleiß abzeichnet. Die Betonschwelle gilt als nahezu wartungsfrei, wobei durch die lange Liegedauer oder aber vereinzelnde Schwachstellen in der Verdübelung bzw. den Schraubensätzen Instandhaltungsmaßnahmen nicht ganz auszuschließen sind (siehe 6.1.3). Vergleiche mit anderen Bahnunternehmen, die bisherige Betrachtung der HOCHBAHN sowie die Prognosen des Schwellenherstellers zeigen aber, dass diese möglichen Kosten sehr gering sind. Eine weitere Kosteneinsparung der Betonschwelle gegenüber der Holzschwelle ergibt sich durch die nach BOStrab verordneten planmäßigen Inspektionen, da die verwendete Anzahl der Schrauben zur Befestigung der Schiene bei den Betonschwellen geringer ist und daraus ein Mehraufwand bei der Wartung der Holzschwellen resultiert. Die LCC Analyse spiegelte bereits wieder, dass Betonschwellen im Vergleich zu Holzschwellen deutlich wirtschaftlicher sind und deswegen auf Freistrecken im Netz der HOCHBAHN eine erhebliche Kostenoptimierung darstellen.

Probleme ergeben sich lediglich in einigen Bereichen, beispielsweise in älteren Haltestellen. Durch die beengten Platzverhältnisse ist es nicht möglich die geforderte Schotterbreite vor Kopf der Schwellen einzuhalten. Da in den Stationen das Schotterbett von einer festen Kante begrenzt wird, kann der geforderte Wert von 40 cm Vorkopfschotter aber unterschritten werden.<sup>39</sup> Kann trotzdem kein geeigneter Querverschiebewiderstand durch zu geringe Schotterbreite erlangt werden, könnten dort Betonschwellen mit einem kleineren Profil (250 cm) eingebaut werden oder alternativ wieder 2,5 m lange Holzschwellen, was direkt vor Ort zu prüfen ist.

Der betrachtete Abschnitt und die LCC Analyse zeigen die hohe Wirtschaftlichkeit der Betonschwelle auf und somit sollten auch künftig auf freier Strecke diese verbaut werden um einen weiterhin hohen Kostendeckungsgrad zu erreichen.

---

<sup>39</sup> siehe AzRUO, 1.2.1, Blatt 1

## **8. Zusammenfassung und Ausblick**

Betonschwellen werden im Netz der Hamburger HOCHBAHN seit 1998 eingebaut. Die bisher gewonnenen Erfahrung und Analysen zeigen bereits die hohe Wirtschaftlichkeit und Kostenoptimierung durch den Einsatz der nahezu wartungsfreien und sehr langlebigen Spannbetonschwellen sowie der salzdruckimprägnierten Kiefernholzschwelle in Tunnelstrecken.

Durch die hohe angestrebte technische Nutzungsdauer der Betonschwellen und die geringen Instandhaltungskosten ergeben sich bereits in dem betrachteten Zeitraum von 50 Jahren Einsparungen in den Jahreskosten von knapp 50 % im Vergleich zu Holzschwellen auf Freistrecken. Bedingt durch wahrscheinlich längere Liegedauer werden die Betonschwellen einen noch höheren Kostendeckungsgrad aufweisen.

Ähnlich verhalten sich die Holzschwellen in Tunnelstrecken. Aufgrund der erhöhten Liegedauer durch die positiven klimatischen Verhältnisse in nicht bewitterter Lage und die niedrigen Instandhaltungskosten sind die verlegten Holzschwellen in Tunneln eine wirtschaftliche Variante und somit ist eine kostenoptimierte Materialwahl in diesen Bereichen nicht notwendig.

Durch die oben genannten Punkte, die teilweise beengten Platzverhältnisse in bestimmten Streckenabschnitten oder aufgrund von statischen und funktionalen Aspekten auf Viadukten und Brücken ist ein Einsatz von Holzschwellen im Netz der HOCHBAHN aber auch weiterhin unumgänglich, da der Verbau von alternativen Materialien nicht zu vergleichbaren Kosten auszuführen ist.

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Bahn AG  
Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus  
DB-Fachbuch Band 8/13, Mainz 1995
  
- [2] Deutsche Bahn AG  
Gleis- und Weichenschwellen aus Beton für Schotteroberbau (Scho) und Feste  
Fahrbahn (FF), DBS 918 143, September 2010
  
- [3] DIN EN 13230 – 1 (2009-10), „Bahnanwendungen – Oberbau – Gleis- und  
Weichenschwellen aus Beton – Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Deutsche  
Fassung EN 13230-1:2009
  
- [4] Hamburger HOCHBAHN AG  
Ausführungsbestimmungen zu den Richtlinien für Planung, Entwurf und Bau von  
U-Bahn-Anlagen in Hamburg,  
Teil 3 Oberbau (RUO), Hamburg 2006
  
- [5] Hamburger HOCHBAHN  
Mittel- und Langfriststrategie für die U-Bahn-Gleisanlagen 2006 – 2020, Oktober  
2005
  
- [6] Hamburger HOCHBAHN AG  
Richtlinien für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg,  
Teil 3 Oberbau (RUO), Hamburg 2004
  
- [7] Hempe, T.; Lillie, D.; Lepke, D.; Peterson, L.-A.  
Liegedauer von Tunneln der Hamburger Hochbahn AG.  
Der Eisenbahningenieur 57 (2006), Heft 2, S. 46 – 50
  
- [8] Informationsdienst Holz – Entsorgung von schutzmittelhaltigen Hölzern und  
Reststoffen  
Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V., München Juli 1993

- [9] Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH  
Beurteilung der zu erwartenden Liegedauern von salzimpregnierten Holzschwellen  
aus Kiefernholz in Tunneln der HOCHBAHN  
Hannover, Juli 1998
- [10] Jochim, H., Lademann F.  
Planung von Bahnanlagen, Grundlagen – Planung – Berechnung  
Carl Hanser Verlag, München 2009
- [11] König, Dipl.-Ing. Chr.  
Bauwerkserhaltung, Vorlesungsumdruck 2009  
Technische Universität Braunschweig
- [12] Lewark, S.  
Die Holzschwelle im Wettbewerb  
Forst und Holz 46 (1991), Heft 2, S. 27 – 30
- [13] Lichtberg, Dr. B.  
Handbuch Gleis – Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit.  
Tetzlaff Verlag GmbH & Co. KG, Hamburg 2004
- [14] Matthews, V.  
Bahnbau  
Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007
- [15] Parzefall, B.  
Die Spannbetonschwellen B 55 und B 70 – Eine kritische Wertung der  
Belastungsannahmen, der Schwellenbemessung und der Schwellenprüfung  
Heft 51, 1986, Mitteilung des Prüfamtes für Bau und Landverkehrswegen der  
Technischen Universität München  
herausgegeben von Eisenmann, Prof. Dr.-Ing. J.
- [16] SBB CFF FFS  
Lebens-Zyklus-Kosten für bahntechnisches Produkte-Management bei der SBB  
Infrastruktur, Version 1.2, September 2005

- [17] Siefer, Prof. Dr.-Ing. Th.  
Bauen im Betrieb, Vorlesungsumdruck 2011  
Technische Universität Braunschweig
- [18] ThyssenKrupp GfT Gleistechnik  
Top of the class. Y-Steel Sleeper, September 2010

Internetquellen:

- [19] Bundesministerium der Justiz  
Internetquelle: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de)  
Stand Juni 2011
- [20] Hamburger HOCHBAHN AG  
Internetquelle: [www.100-jahre-hochbahn.de](http://www.100-jahre-hochbahn.de)  
Stand Juni 2011
- [21] Leonhard Moll Betonwerke  
Internetquelle: [www.moll-betonwerke.de](http://www.moll-betonwerke.de)  
Stand Juni 2011
- [22] Lincoln GmbH Zentralschmiersysteme  
Internetquelle: [www.lincolnindustrial.de](http://www.lincolnindustrial.de)
- [21] Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e. V.  
Internetquelle: [www.holzschwellenoberbau.de](http://www.holzschwellenoberbau.de)  
Stand Juni 2011

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorstehende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt und die benutzten Hilfsmittel sowie die befragten Personen und Institutionen vollständig angegeben habe.

Braunschweig, den 25.07.11

-----

(Unterschrift)