



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

**VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY**

DIPLOMARBEIT

BEURTEILUNG VON GLEISABSCHNITTEN MIT Y-STAHLSCHWELLEN IN ENGEN BÖGEN

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs unter Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann
Dipl.-Ing. Paul Steckler

Institut für Verkehrswissenschaften E230

Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und
Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Bc. Karel Veselý

Matrikelnummer: 0826823

Kuželova 577, Praha 18, PLZ 19900

Wien, am 29.6.2009

.....

EHRENERKLÄRUNG

Ich erkläre, dass ich die Diplomarbeit zum Thema „Beurteilung von Gleisabschnitten mit Y-Stahlschwellen in engen Bögen“ selbstständig unter Benutzung der angeführten Literatur und Quellen bearbeitet habe.

Wien, 29.6.2009

.....

Name

DANKSAGUNG

Ich danke den Betreuern Dipl.-Ing. Paul Steckler und Doc. Ing. Hana Krejčířiková, CSc. für ihre fachliche Führung und nutzbringende Ratschläge bei der Bearbeitung der Diplomarbeit.

**BEURTEILUNG VON GLEISABSCHNITTEN
MIT Y-STAHLSCHWELLEN IN ENGEN BÖGEN**

**EXAMINATION OF Y-SLEEPER CONSTRUCTION
IN CONTINUOUSLY WELDED TRACK**

KURZFASSUNG

Beurteilung von Gleisabschnitten mit Y-Stahlschwellen in engen Bögen

Bc. Karel Veselý

Juni 2009

Betreuer: Dipl.-Ing. Paul Steckler
Doc. Ing. Hana Krejčířiková, CSc.
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann

Schlüsselwörter: - lückenlos verschweißtes Gleis
- Finiteelementeverfahren
- Stabilität
- Y-Schwelle
- Eigenschaften

Der Untersuchungsgegenstand der Diplomarbeit ist eine Zusammenstellung über den derzeitigen Erkenntniszustand und die Benutzung von Y-Schwellen, die Darstellung des mathematischen Konstruktionsmodells und seine Verifikation aufgrund der gemessenen Angaben im Gleis, sowie eine Konstruktionsbeurteilung.

Das Ziel der Arbeit ist aktuelle Erkenntnisse über diese Konstruktion in Erfahrung zu bringen und sie für eine Stabilitätsbeurteilung auszunutzen. Es wird entwickelt und festgestellt, bei welchem Mindestradius des Gleises die Konstruktion noch stabil ist.

Die Diplomarbeit ist in vier Grundteile unterteilt.

Der erste Teil ist eine Beschreibung der Konstruktionseigenschaften und Zulassungsbedingungen in verschiedenen Ländern.

Der zweite Teil ist eine Übersicht über Gleisprüfabschnitte mit Y-Schwellen. Jeder Gleisabschnitt wird nicht nur in einer verbalen Beschreibung dargestellt, sondern auch mit einer Tabelle mit charakteristischen technischen Daten.

Der dritte Teil ist der Entwurf der charakteristischen Querschnitte in drei Grundsituationen, wo sich das Gleis im Einschnitt, auf der Böschung und auf der Brücke befindet. Ein Bestandteil sind Zeichnungen der Querschnitte entsprechend der Anforderung der tschechischen Normen.

Der vierte Teil befasst sich mit der Stabilitätsberechnung. Er besteht aus zwei thematischen Gesamteinheiten. Die erste ist die Stabilitätsermittlung in der Horizontalrichtung, die zweite ist die Stabilitätsermittlung in der Vertikalrichtung. Beide Einheiten bestehen aus grafischen Darstellungen der Ergebnisse aus dem FEM-Programm und ihren Bewertungen.

SUMMARY

Examination of Y-sleeper construction in continuously welded track

Bc. Karel Veselý

June 2009

Supervisor of thesis: Dipl.-Ing. Paul Steckler
Doc. Ing. Hana Krejčířiková, CSc.
Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann

Key words: - continuously welded track
- finite element method
- stability
- Y-sleeper
- properties

The subject of thesis is to create a general report on the current status of knowledge and on use of construction in continuously welded track with Y-sleepers, and then build a mathematical model structure, the verification on the basis of data from measurements of deformation in the track and assess the design.

The purpose of this work is to bring current knowledge about the construction and to use it to assess the structural stability, while it determines the minimum radius track, which is even more stable structure.

Thesis is divided into four basic parts.

The first part provides a description of design features and conditions of approval in each country.

The second part is an overview report on the test sections with Y-sleepers. Each line segment is presented not only by verbal description, but also by the table with characteristic technical data.

The third part is the design characteristic of transverse sections in three basic situations where the track is located in the cutting, on embankments and on the bridge. There are drawings of transverse cut proposal based on the requirements of Czech standards.

The fourth part concerns the calculation of structural stability. It consists from two main thematic units. The first is the solution of structural stability in the horizontal direction, the second one is a solution of structural stability in the vertical direction. There are the graphical outputs of the finite element method and their evaluation.

Inhalt

1	Einleitung.....	9
1.1	Entwicklung.....	9
1.2	Eigenschaften.....	10
1.3	Schwellenform.....	16
2	Systemerfahrungen.....	19
2.1	Transport und Einbau der Schwellen.....	19
2.2	Bogenatmen und Gleislagestabilität.....	21
2.2.1	Gleislagestabilität vertikal.....	21
2.2.2	Horizontalstabilität, Bogenatmung.....	24
2.3	Nutzungsbedingungen und Genehmigung zum Betrieb.....	31
2.4	Anwendungsbedingungen der Y-Schwellen in der Tschechischen Republik.....	36
2.5	Messverfahren auf den Prüfabschnitten.....	37
2.5.1	Messen von Vertikaleinsenkungen der Schienen mit Hilfe von Schublehren.....	37
2.5.2	Komplexes Messverfahren der Gleisverformungen mit Hilfe vom Messwagen KRAB.....	38
3	Versuchsabschnitte mit Y-Stahlschwellen.....	40
3.1	Strecke Nr. 036 Liberec-Tanvald, Bogen im km 1,402- km 1,729.....	40
3.2	Strecke Nr. 210 Veselí n.L. - Horní Cerekev, Abschnitt Popelín – Počátky Žirovnice.....	41
3.3	Strecke Nr. 195 Rybník-Lipno nad Vltavou, Abschnitt Čertova Stěna-Loučovice.....	42
3.4	Strecke Nr. 238 Pardubice-Havlíčkův Brod, Station Rozsochatec.....	42
3.5	Straßenbahn Liberec-Jablonec n. Nisou.....	43
3.6	Strecke Nr. 210 SLB Lamprechtshausen-Trimmelkam.....	43
4	Querschnittentwurf für tschechische Verhältnisse.....	47
5	Berechnung der horizontalen Gleislagestabilität im lückenlos verschweißten Gleis.....	51
5.1	Modellbeschreibung.....	51
5.1.1	Unterstützpunkt in der Radialrichtung.....	53
5.1.2	Unterstützpunkt in der Längsrichtung.....	54
5.1.3	Modellierung des Verdrehwiderstandes.....	55

5.1.4	Schwelle	56
5.1.5	Schienen.....	57
5.1.6	Modellverifikation.....	59
5.2	Auswertung für horizontale Gleisstabilität	59
5.2.1	Lastfall 1	59
5.2.2	Lastfall 2	60
5.3	Schlussfolgerung	65
6	Berechnung der vertikalen Tragfähigkeit des Y-Schwellengleises	66
6.1	Modellbeschreibung	66
6.2	Auswertung	66
6.2.1	Fall 1.....	68
6.2.2	Fall 2	70
6.2.3	Fall 3	72
6.3	Schlussfolgerung	73
7	Zusammenfassung.....	74
8	Literaturquellen	75

1 Einleitung

Im Eisenbahnbauwesen wurden von Anbeginn viele Materialien und Konstruktionsarten der Schienenunterstützung eingesetzt. Ursprünglich gab es Steinblöcke, die danach mit Holz-, Stahl- und Betonschwellen abgewechselt wurden. Zurzeit dominiert der Einsatz der vorgespannten Betonquerswellen, die zum Standard aller Eisenbahngesellschaften wurden, vor allem wegen ihren niedrigeren Herstellungskosten. Neben diesen Schwellen nimmt aber die Stahlschwelle weiterhin ihren Platz ein. Es handelt sich um keine Balkenschwelle mit einem trogförmigen Querschnitt mehr, sondern um eine neue Konstruktion, die im Grundriss an den Buchstaben Y erinnert. Dafür spricht man über sog. Y-Schwellen. Diese Schwellen nutzen alle Möglichkeiten und günstigen Eigenschaften des Stahls, und in den geeigneten Anwendungsfällen weisen sie bessere Parameter als ihre Konkurrenz auf. Y-Stahlschwellen sind eine gute Alternative beim Streckenumbau in engen Verhältnissen, wo sie ihre außerordentlichen Eigenschaften ausnutzen.

Das Ziel der Arbeit ist aktuelle Erkenntnisse über diese Konstruktion zu bringen und sie für die Stabilitätsbeurteilung in engen Bögen auszunutzen. Die Bestimmung des Mindestgleisradius, der unter Temperaturbelastung noch stabil ist, ist gerade zur Zeit die Hauptaufgabe bei der Y-Schwellenerforschung. Auf ihrer Basis wird es möglich, diese Konstruktion besser in der Praxis auszunutzen.

1.1 Entwicklung

Es wurde zunächst im Jahre 1983 nach einem geeigneten Trägerprofil für die neuen Stahlschwellen gesucht. Ausgewählt wurde der Peinerträger IB 100 S-1, denn dieser Träger erfüllt die Anforderungen zur Herstellung von Y-Stahlschwellen. Nach der Wahl des Trägerprofils musste die Formgebung vorgenommen werden. Durch Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Günter Fasterding gelang es im Stahlwerk Peine-Salzgitter AG kalt verformte Schwellenträger zu bekommen, die nebeneinander gelegt die Form des Buchstabens „Y“ bilden. Mit einer geeigneten Schienenauflagerung und -befestigung entstand 1984 das erste Y-Stahlschwellengleis im Stahlwerk Peine-Salzgitter. Dort wurden auch erste Belastungsversuche der Y-Stahlschwellen im Schotterbett und auf Fester Fahrbahn unter Begleitung durch das BZA München durchgeführt. Sie wurden ergänzt durch Entgleisungs- und Reparaturversuche. Neben den Beobachtungen vor Ort wurden auch Untersuchungen von Prof. Dr.-Ing. Führer in der Prüfanstalt der Hochschule für Verkehrswesen (HfV) Dresden durchgeführt und Gutachten von Prof. Dr.-Ing. Eisenmann an der TU München bearbeitet. In den Folgejahren liefen die Produktion von Y-Stahlschwellen und ihr Einsatz im Eisenbahnoberbau allmählich an.

Zu den ersten Einbaustellen gehören:

- 1986 1.000 m Gleis der Deutschen Bundesbahn (DB) auf Schotter- und Asphalttragschichten bei Welsede und Hämelerwald der Strecke Hannover-Braunschweig
- 1987 Strecken- und Bahnhofsgleise der Ost-Hannoverischen Eisenbahnen (OHE), Ausrüstung eines Streckengleises der Ost-West-S-Bahn S 8 der DB mit verzinkten Y-Stahlschwellen auf Asphalttragschichten im Linderhauser Tunnel
- 1989 Weichen mit Y-Stahlschwellen im Hbf. Zürich und Weichen im Bereich der damaligen Deutschen Reichsbahn, 3.000 m Y-Stahlschwellenoberbau bei der AKN Eisenbahn AG
- 1990 1657 m Gleis als BMFT-Forschungsprojekt auf Fester Fahrbahn mit Asphalttragschichten der Ausbaustrecke für 200 km/h Düsseldorf-Köln bei Langenfeld (Rhld.)
- 1991 2100 m Gleis im Schotterbett für den schweren Güterverkehr bei Wülfrath (Rhld.), Wiederherstellung der Schmalspurgleise auf dem Brocken mit Y-Stahlschwellen, 2492 m Gleis im Netz der Bentheimer Eisenbahn AG, Y-Stahlschwellen im Netz der Furka Oberalpbahn und der Rhätischen Bahn in der Schweiz

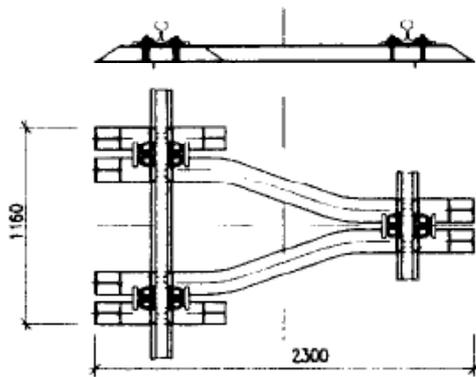
In den folgenden Jahren wurde die Y-Stahlschwelle häufiger auf den Strecken der DB bzw. der DB AG und auf zahlreichen Privatbahnstrecken im Inland und Ausland eingesetzt. Bis 31.12.08 wurden nach Angaben der Firma ThyssenKrupp insgesamt 1100,26 km Strecken gebaut. Daraus der größte Teil befindet sich im Netz der DB AG (613,07 km). Weiter gibt es 363,72 m bei den Privatbahnen in Deutschland. Die Y-Schwellen wurden auch in der Schweiz, Italien, Österreich, Tschechien, Frankreich, Spanien, Ungarn, Bulgarien, Polen, Russland, Georgien, Slowakei und dem Iran benutzt.¹

1.2 Eigenschaften

Die Abmessung und Formgebung einer Y-Stahlschwelle geht aus der Abb. 1.1 hervor. Zum Vergleich sind auch die Abmessungen der Schwellen B 70W (DB) und B 91S/2 (SŽDC) angegeben. (vgl. Tab. 1.1)

¹ Nach „1) Y-Stahlschwellenoberbau, Prof. Dr. Günther Führer, Prof. Dr. Karl Endmann, Prof. Dr. Günter Berg, Hestra-Verlag Darmstadt 1994“

Oberbau YS 15

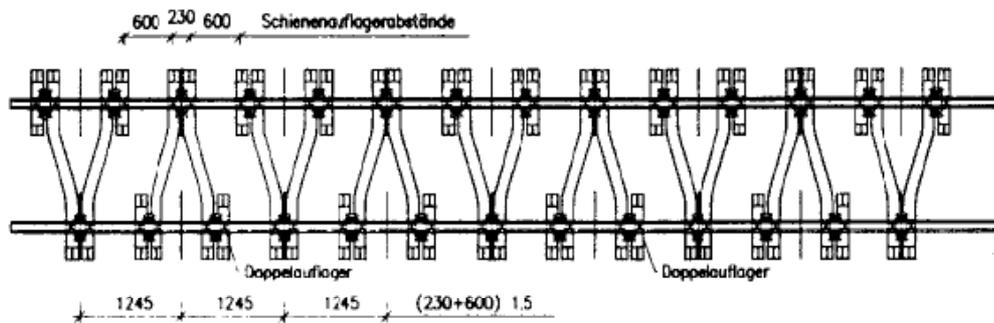


143 kg/Schwelle

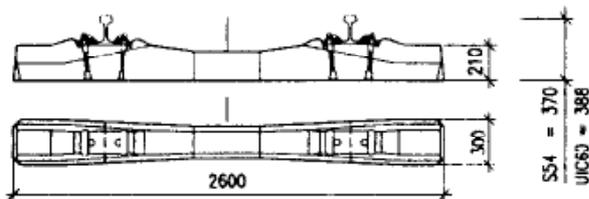
Y-Stahlschwelle
Typ Y-SW 515

Bedarf pro km Gleis

$$\frac{1\,000\,000}{1\,245} = \sim 803 \text{ Stück}$$



Oberbau B 70 W



293 kg/Schwelle

Betonschwelle
Typ B 70 - W

Bedarf pro km Gleis

$$\frac{1\,000\,000}{600} = \sim 1667 \text{ Stück}$$

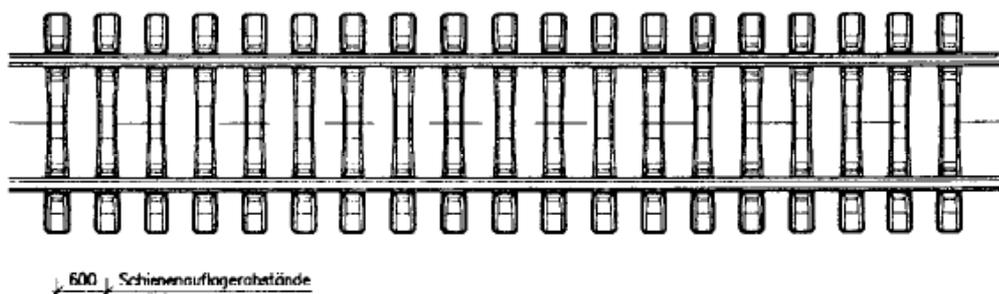
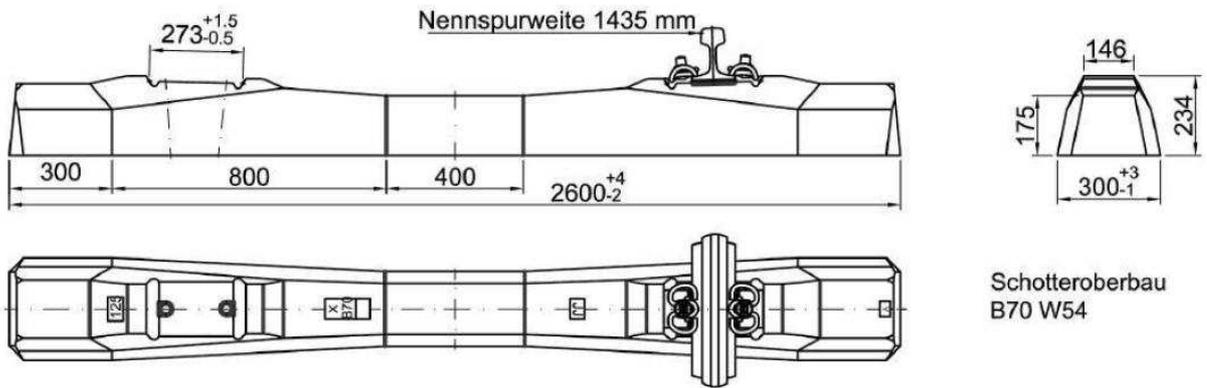
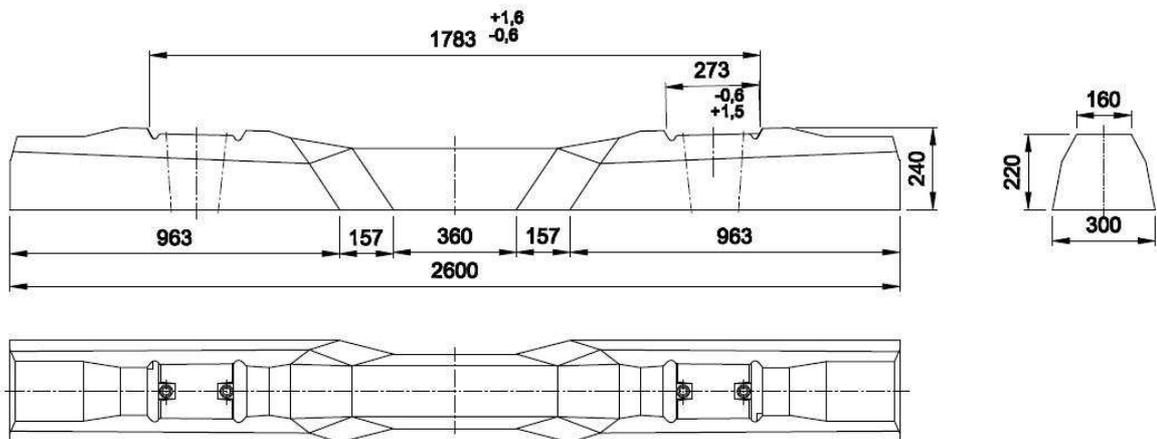


Abb. 1.1 Vergleich der Y-Stahlschwellen und Spannbetonschwellen

Betonschwelle B 70 W



Betonschwelle B 91 S/2



	Schwellenvergleich	
	B 70 W	B 91 S/2
Schwellenlänge	2600 mm	2600 mm
Schwellenkopfbreite	300 mm	300 mm
Gewicht mit Befestigung	287 kg	312 kg
Schienenneigung	1:40	1:40
Schiene	S 54	S 49
Auflagerfläche	570000 mm ²	738640 mm ²

Tab. 1.1 Vergleich von Schwellen B 70 W benutzt bei DB und B 91 S/2 benutzt bei SŽDC

Die Y-Stahlschwelle ist im Vergleich zur Betonschwelle kürzer, niedriger und leichter. Wegen des Baustoffes Stahl ist sie elastischer und als flächiger Baukörper ist die Konstruktion auch steifer. Aus der Formgebung und den Abmessungen einer Y-Stahlschwelle erwächst eine Reihe von Vorteilen:

- Dreiecksverband
- Doppelaufleger
- hoher Quer- und Längsverschiebewiderstand
- geringe Bauhöhe, die Höhe des Sonderprofils IB 100 S-1 ist 95 mm

- gute Isoliereigenschaften von Schiene zu Schiene
- geringeres Gewicht
- hohe Torsions- und Rahmensteifigkeit
- gute Recyclingeigenschaften²

Die Schwellen eignen sich bei eingeschränkten Bedingungen in der Konstruktionshöhe, Baubreite sowie im Profil durch, oder in kleinen Radien im verschweißten Gleis. Folgende Beispiele sind zu nennen:

- Fehlender Abstand zu festen Gegenständen neben oder auf Ingenieurbauwerken
- Ein zu kleiner lichter Raum bei Vergrößern der Gleisabstände
- Elektrifizierung im Tunnel (Abb. 1.2) oder Wiederherstellen eines untergegangenen Randweges durch Verringern der Oberbauhöhe. Z.B. (Feste Fahrbahn Bauart SATO/FFYS)³

Die Y-Schwellen weisen einige Nachteile gegen die anderen Querschwellenarten auf. Die wichtigste sind:

- Spezialmaschinen zum Unterstopfen notwendig
- aufwendigere Instandhaltung
- bei grösseren Fehllagen in seitlicher Richtung ist wegen des hohen Widerstandes gegen das Richten nur schwer eine maschinelle Berichtigung möglich⁴

² Nach „15) Handbuch Gleis, Dr. Bernhard Lichtberger, Tetzlaff Verlag 2003 Hamburg, Seite 156-157“

³ Nach „15) Handbuch Gleis, Dr. Bernhard Lichtberger, Tetzlaff Verlag 2003 Hamburg, Seite 300-301“

⁴ Nach „15) Handbuch Gleis, Dr. Bernhard Lichtberger, Tetzlaff Verlag 2003 Hamburg, Seite 157“

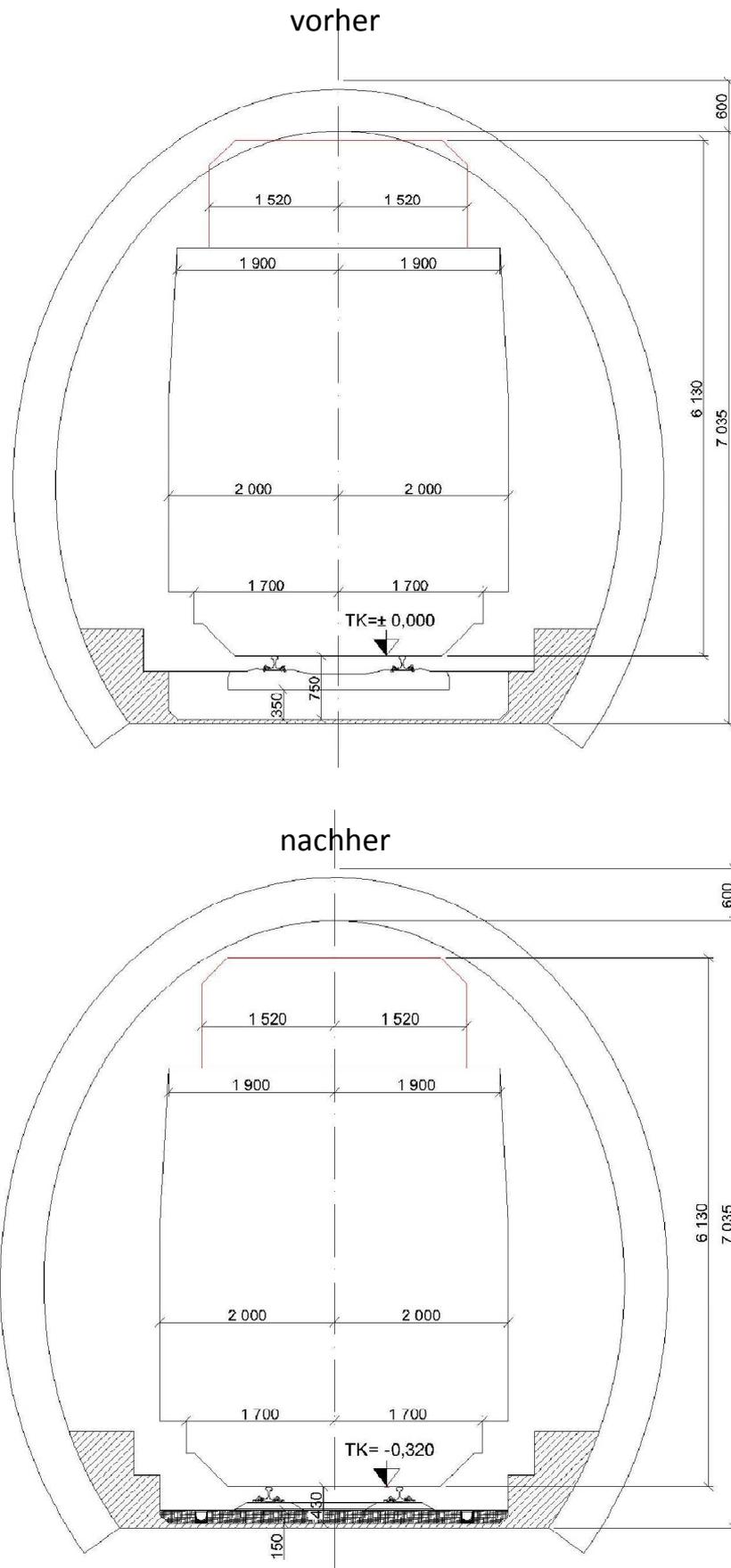


Abb. 1.2 Reduktion der Oberbaukonstruktionshöhe um ca. 300 mm bei der Elektrifizierung im Tunnel. Verwendet wird das Lichtraumprofil Z-GC.

Wo im Gleisfeld von Bahnhöfen die 2,60 m langen Betonschwellen nicht untergebracht werden können, wären die nur 2,30 m langen Y-Stahlschwellen vorteilhaft. Beim Aufzählen von Vorteilen der Y-Stahlschwelle ist nicht zuletzt ihr geringes Gewicht von 143 kg je Schwelle einschließlich der Schienenbefestigung zu erwähnen, das sich günstig auf das Transportieren und den Einbau der Y-Stahlschwellen auswirkt. Wie Abb. 1.1 zeigt, verteilen sich 803 Y-Stahlschwellen auf einen Kilometer Gleis. Beim Einsatz von Y-Stahlschwellen kommen weitere Vorteile zum Tragen, wie die Doppelauflagerung der Schiene mit zentrischer Verspannung an drei Punkten. In Folge der Doppelauflagerung gibt es sechs Auflager je Y-Stahlschwelle. Somit entstehen 4818 Schienenauflagerpunkte je km Y-Stahlschwellengleis, die Schienenunterstützung ist also bei der Y-Stahlschwelle höher. Die Gleispflege hinsichtlich des Aufwands beim Stopfen ist beim Y-Stahlschwellengleis vergleichsweise einfacher. Die kürzeren und niedrigeren Y-Stahlschwellen führen zu einem geringeren Querschnitt des Schotterbetts, so dass der Verbrauch an Schotter je Kilometer Gleis entsprechend niedriger ausfällt. Mitunter wird darauf hingewiesen, dass der Rostansatz zu einer Querschnittsschwächung des Schwellenkörpers führt. Das mag in sehr langen Zeiträumen der Fall sein. Trotzdem hat die Y-Stahlschwelle eine lange Nutzungsdauer, wie die alten Trogswellen beweisen. Heute noch befinden sich Trogswellen in Betriebsgleisen mit einer Nutzungsdauer von 70 Jahren oder länger. Dem Verschleiß von Y-Stahlschwellen kann durch Verzinken der Schwellen vorgebeugt werden, wie es in manchen Tunnellagen geschieht. Die Y-Stahlschwellen sind elektrisch isolierfähig und genügen den elektrotechnischen Anforderungen der Bahnverwaltungen. Nach Ablauf der Nutzungszeit von Y-Stahlschwellen lassen sich beim Rückbau Einnahmen durch das Recyceln erzielen, dank des umweltfreundlichen Rohstoffs Stahl.⁵

⁵ Nach „2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann, Seite 20-21“

1.3 Schwellenform

„Die Form einer Y-Stahlschwelle kann leicht verändert und den Bedürfnissen des Gleisbaus und der Gleiskonstruktion angepasst werden. Ihre Y-Form wird durch Biegen von Peiner Trägern IB 100 S-1 mit Hilfe schwerer hydraulischer Pressen gewonnen. Bei den Trägerelementen handelt es sich um ein Profil mit geneigten Flanschen, so dass kaum Wasser in den Kehlen der Trägerelemente stehen bleibt. Mit Stahlträgern lassen sich leicht alle möglichen Sonderformen für Normal-, Schmal oder Breitspurgleise herstellen. Die Y-Stahlschwelle ist schweißbar, so dass Stahlbauteile verschiedener Art an oder aufgeschweißt werden können. Das geschieht zum Beispiel mit weiteren Schienenstützpunkten für ein Drei- oder Vierschienengleis oder Zahnstangen für Zahnradbahnen.“⁶

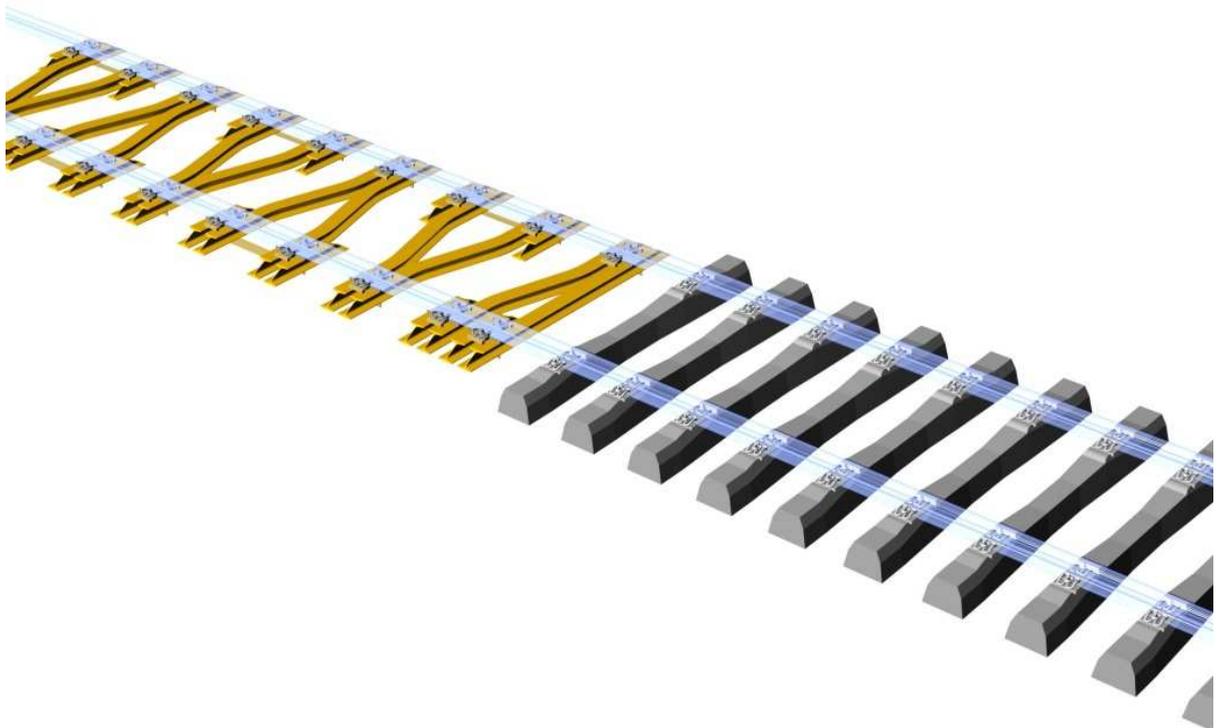


Abb. 1.3 Einbindung des Y-Schwellenabschnittes in einen Querschwellenabschnitt durch die Übergangschwelle

Stahl für die Herstellung der Y-Schwellen hat nach EN 10025 die Materialgüte S235JRG2. Es handelt sich um nicht legierten Stahl. Was die Schwellenbezeichnung betrifft, wird das Bezeichnungssystem vom Hersteller eingeführt:

⁶ Nach „2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann, Seite 21“

Zum Beispiel: Y-SW-S 15 No-650-60

Y-Schwelle		Befestigung	Schwellenart	Auflagerabstand A	Schienenart
Y	SW	S15	No-normal	650 (mm)	60 - UIC 60
			Üre- Übergangsschwelle rechtseitig	600 (mm)	54 - UIC 54
			Üli- Übergangsschwelle linksseitig	210 (mm) 185 (mm)	49 - S 49

Tab. 1.2 System der Schwellenbezeichnung

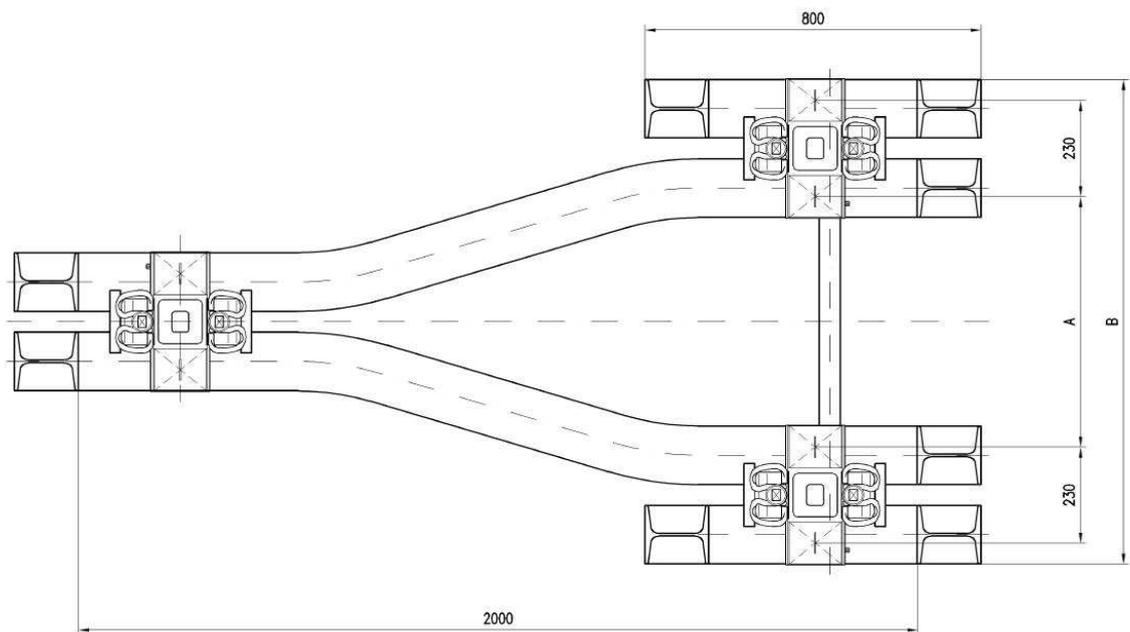


Abb. 1.4 Auflagerabstände und Abmessungen der üblichen Schwelle

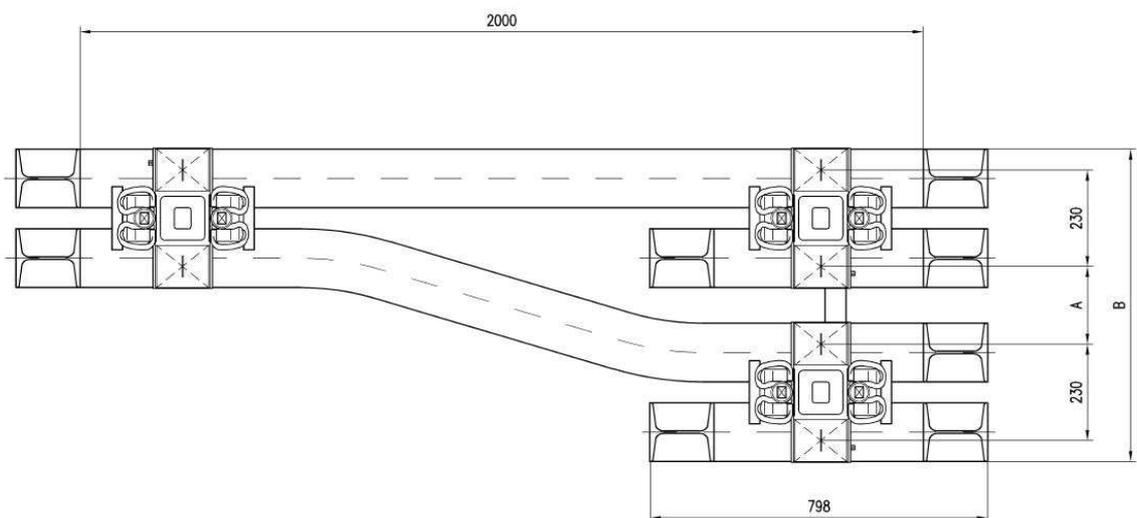


Abb. 1.5 Auflagerabstände und Abmessungen der Übergangsschwelle

Als Schienenbefestigung wird am häufigsten der Typ S 15 benutzt. Diese Befestigung wird vom deutschen EBA für die Schienenneigung 1:40 zugelassen. Es ist kein Problem, diesen Typ auch für die Neigung 1:20 oder 1:8 anzupassen. Bei der Nachspannung der Schrauben wird ein Anziehmoment von 200 Nm verlangt. Außerdem wurde das Befestigungssystem Y-FCH entwickelt, bei dem das System Fastclip von der Firma Pandrol verwendet wird.⁷

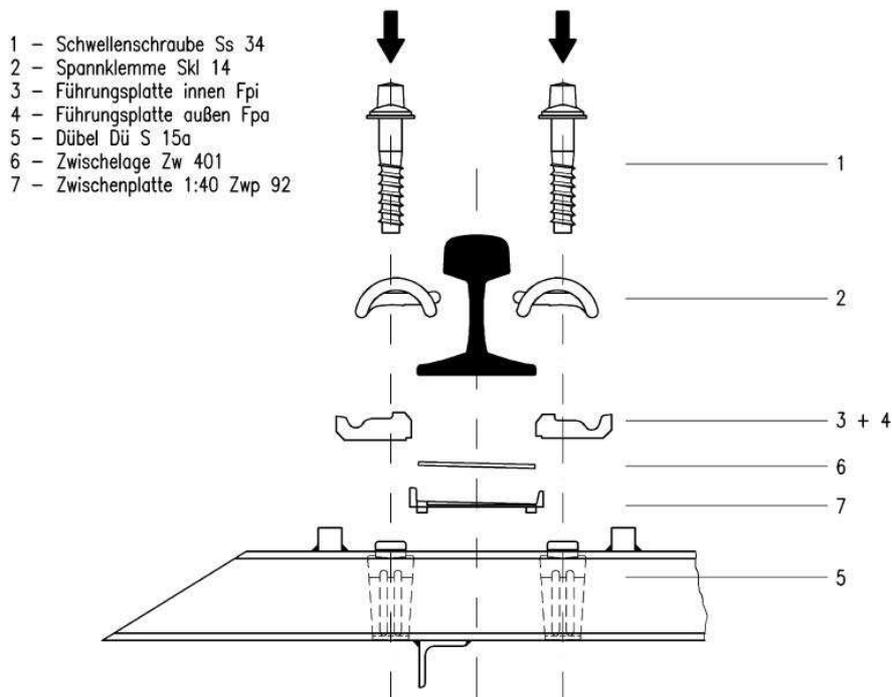


Abb. 1.6 Teile der Schienenbefestigung S 15

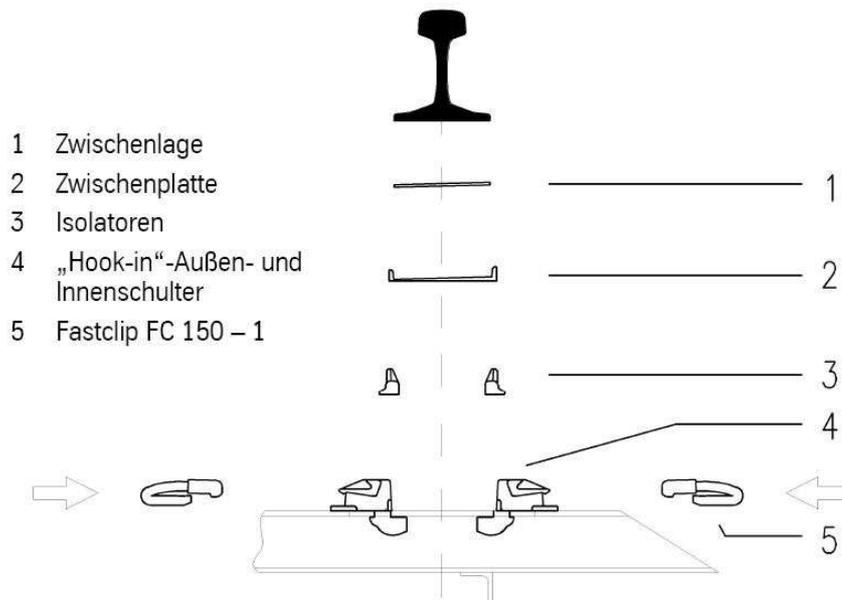


Abb. 1.7 Teile der Schienenbefestigung Pandrol Fastclip Y-FCH

⁷ Nach dem Firmenmaterial ThyssenKrupp GfT „10) www.oberbauhandbuch.de“

2 Systemerfahrungen

2.1 Transport und Einbau der Schwellen

Auf Grund der geometrischen Abmessungen und des niedrigen Gewichts der Y-Stahlschwelle gibt es beachtenswerte Erleichterungen beim Transport und Einbau im Gleis, so dass neben Umbauzügen für ein kontinuierliches oder jochweises Ein- oder Umbauverfahren auch leichte gleis- und straßenfahrbare Geräte, wie Zweiwegebagger, eingesetzt werden können. Neben dem Umbau der Gleise im Jochverfahren, bei dem ein anschließender Schienenwechsel erforderlich ist, findet meist das Einzelschwellen-Verlegeverfahren seine Anwendung. Im Vorlauf der Umbaumaßnahmen erfolgt das Abladen der Neuschienen und Schwellenpakete längs des Gleises. Nach dem Ausbau der alten Schienen und Schwellen wird das Schotterplanum hergestellt. Der nächste Schritt ist das Ausrichten der Neuschiene als Lehrschiene. Mittels Bagger werden die Schwellen ausgelegt und exakt ausgerichtet. Danach werden die Neuschienen mit Hilfe eines Schienenhebergerätes aufgesetzt und das Gleis montiert. Oft ergeben sich Schwierigkeiten durch kurze Wochenend-Sperrpausen oder durch eingeschränkte Platzverhältnisse, wodurch diese Umbauverfahren nur bedingt anwendbar sind. Dies veranlaßte eine Bauunternehmung, ein geeignetes maschinelles Verlegeverfahren zu entwickeln. Durch die Form und Konstruktion der Y-Stahlschwelle ist ein exaktes Verlegen der Y-Stahlschwellen erforderlich, um die Anforderungen der gültigen Richtlinien zu erfüllen. Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass ein nachträgliches Richten und Ziehen der Schwellen im Schotterbett mit Hilfe eines Verlegefingers, wie z.B. bei Betonschwellen, nicht möglich ist. Im patentierten Leonhard Weiss Y-Stahlschwellen-Verlegeverfahren werden die Y-Stahlschwellen jeweils nacheinander um 180° gedreht mit der Verlegegruppe aufgenommen und aufs verdichtete Schotterplanum abgelegt. Mittlerweile wurden mit dem Umbauzug Matisa UM1 ca. 50 km Y-Stahlschwellengleis umgebaut. Das Verlegen von Y-Stahlschwellen im Fließbandverfahren zeichnet sich durch hohe Verlegeleistung gepaart mit exakter Qualität der Gleisverlegung aus. Nachfolgende Arbeiten wie zum Beispiel Kleisenmontage, Stopfen, Planieren und Schweißen sind unmittelbar hinter dem Umbauzug möglich, da die komplette Stofflogistik nach vorne erfolgt. Die Benutzung des Fließbandverfahrens ist günstig im kurzen Zeitfenster, weil Nacharbeiten in darauffolgenden Arbeitsschichten entfallen. Aber auch in beengten Verhältnissen, wie zum Beispiel in Tunneln und auf Brücken setzt sich diese Methode durch.⁸

⁸ Nach „3) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 4/2002, Y-Stahlschwellen-Verlegung im Fließbandverfahren, Ulrich Bareiß“

Außer der Maschine Matisa UM-1 gibt es auch die Maschine SUZ-500 für die Y-Schwellenverlegung im Betrieb bei der DB.



Abb. 2.1 Y-Schwellenverlegung mit Hilfe des Umbauzuges UM-1

Jahr	Baustelle	Durch. Leistung St98Y	Max. Leistung St.98Y	Max. Leistung B70W
UM-1 (Leonhard Weiss)				
1999	Amberg-Schnaittenbach	150 m/h	190 m/h	
2005	Flensburg-Husby	250 m/h	360 m/h	
2005	Betriebsangaben			360 m/h
SUZ 500 (DGT, DB AG)				
2004	Wasserburg	90 m/h	350 m/h	
2005	Hechingen-Tübingen	170 m/h	350 m/h	
2005	Betriebsangaben			450 m/h

Tab. 2.1 Leistungsentwicklung der Umbauzügen

Typ der Stopfmaschine	Betonschwellen	Y-Schwellen
09-32	700 m/h	750 m/h
08-275	400 m/h	330 m/h

Tab. 2.2 Leistung der Stopfmaschinen⁹

⁹ Nach „11) Präsentation Einsatz von Y-Stahlschwellen bei der DB AG, ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2005“

2.2 Bogenatmen und Gleislagestabilität

2.2.1 Gleislagestabilität vertikal

„Während eine Querschwelle beim Überrollvorgang an den Auflagerpunkten der Schienen links und rechts gleichzeitig belastet wird, tritt die Belastung der Y-Stahlschwelle durch die geometrisch gesehene Drei-Punkt-Lagerung der Schienen wechselseitig zeitverzögert auf. Die jeweils um eine halbe Schwellenlänge versetzte wechselseitige Belastung der Y-Stahlschwelle ist ein grundlegender Unterschied zur Querschwelle. Diese Belastung hat zur Folge, dass sich die statische Last in der Fläche des Schotterbetts und im Untergrund anders verteilt als bei der Querschwelle. Die Bodenpressung unter der Y-Stahlschwelle ist etwa um 18 Prozent geringer. Unter dem rollenden Rad werden die Lasten über die Schienen auf die Schwellen abgetragen. Dabei entstehen Biegelinien der Schienen, mit beeinflusst durch die elastische Lagerung im Schotter. Die Biegelinien treten bei Querschwellengleisen symmetrisch auf. Beim Y-Stahlschwellenoberbau sind sie um eine halbe Wellenlänge versetzt.“¹⁰

2.2.1.1 Verdrehung der Schwellen

„Durch die wechselseitige Belastung der Y-Stahlschwelle und ihre Gabelform ist eine biegeinienbedingte Verdrehung der Schwelle nur bei Überwinden der Torsionssteifigkeit an den Gabelarmen möglich. Hierbei wird ein Verkanten der Y-Stahlschwelle federnd abgeschwächt. Die Radlast wird nicht nur durch die Biegesteifigkeit der Schiene, sondern auch durch die Schwellenform an die benachbarten Auflager weitergeleitet. Beim Kippen der Schwelle entsteht eine Kantenpressung am Rande der Auflagerfläche, sie beträgt etwa 25 % jener von Querschwellen. Die Bodenpressungen unter den Schwellen sind wegen der Doppelauflagerung der Schiene gleichmäßiger verteilt.“¹¹

2.2.1.2 Lastverteilung im Untergrund

Die wirksame Auflagerfläche unter einem Schienenstützpunkt beträgt bei der Spannbetonschwelle B70 2850 cm², bei der Y-Stahlschwelle 3000 cm²; gleichwohl ist bei der Spannbetonschwelle die Summe der Auflagerflächen je Kilometer Gleis unter Berücksichtigung der Auflagerabstände im Verhältnis von 65 cm zu 83 cm 1,2-fach größer. Allein daraus abzuleiten, dass beim Y-Stahlschwellengleis raschere Lageverschlechterungen entstehen, hieße, die völlig unterschiedliche Wirkung der Unterschwellung ohne Betracht zu lassen. Die Lastverteilung im Untergrund ist auch im Zusammenhang mit der Verdrehung der verschiedenen Schwellen zu sehen, wie oben

¹⁰ Nach „ 2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann, Seite 22“

¹¹ Nach „ 2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann, Seite 22“

beschrieben. Bei der Wirkung des Oberbaus ist die Pressung auf den Unterbau um 18 % geringer als bei den Querschwellen.¹²

Biegelinienausbildung; Berechnung nach dem klassischen Verfahren von Zimmermann

Pressung Schwelle-Schotter $P = C \cdot y \text{ (N/cm}^2\text{)}$

Langträgerbeiwert $L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{B_L \cdot C}} \text{ (cm)}$

Einsenkung der Schiene $y = \frac{Q}{2 \cdot B_L \cdot C \cdot L} \text{ (cm)}$

Berechnungsbeispiel:

$Q = 150 \text{ kN (Radlast)}$

$C = 100 \text{ N/cm}^3 \text{ (Bettungszahl)}$

Schwellenabstand: Y-Schwelle
Holzschwelle

$a = 83 \text{ cm}$

$a = 60 \text{ cm}$

für Y-Schwelle:

Wirkende Lagerfläche

$$F = 14 \cdot 80 \cdot 6 + 14 \cdot 10 \cdot 4 + 50 \cdot 14 + 5 \cdot 14 \cdot 3 = 8190 \text{ cm}^2$$

Breite des gedachten Langträgers

$$B_L = \frac{1}{3} \cdot \frac{F}{a} = \frac{8190}{3 \cdot 83}$$

$$B_L = 32,9 \text{ cm}$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 3055}{32,9 \cdot 100}} = 93,98 \text{ cm}$$

$$y = \frac{150 \cdot 10^3}{2 \cdot 32,9 \cdot 100 \cdot 93,98} = 0,24 \text{ cm}$$

$$P = 100 \cdot 0,24 = 24 \text{ N/cm}^2$$

¹² Bearbeitet nach „2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann“

für Holzschwellen:

$$F = 26 \cdot 10,5 \cdot 2 = 5460 \text{ cm}^2$$

$$B_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{a} = \frac{5460}{2 \cdot 60}$$

$$B_L = 45,5 \text{ cm}$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 3055}{45,5 \cdot 100}} = 86,7 \text{ cm}$$

$$y = \frac{150 \cdot 10^3}{2 \cdot 45,5 \cdot 100 \cdot 86,7} = 0,19 \text{ cm}$$

$$P = 100 \cdot 0,18 = 19 \text{ N/cm}^2$$

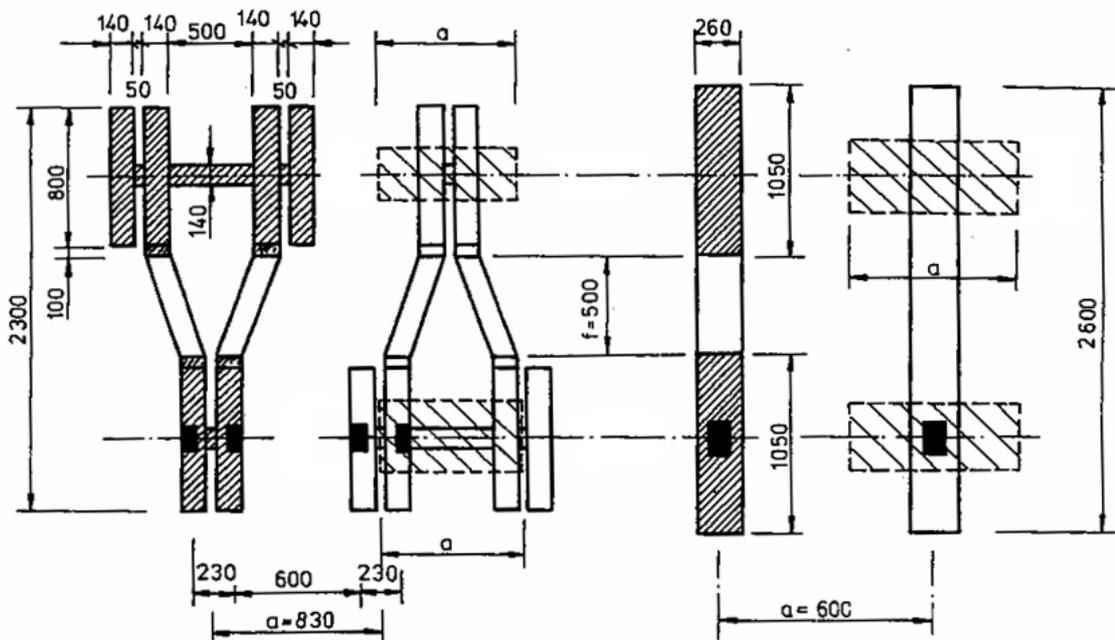


Abb. 2.2 Wirkende Schwellenlagerfläche und Werte von den Schwellenabständen¹³

Die Schlussfolgerung daraus: das Y-Stahlschwellengleis ist weicher. Nach der Zimmermannbeziehung wäre damit eine höhere Pressung der Schwellen-Bettung verbunden, eine Ursache für zunehmende Fehler in der vertikalen Gleislage. Unter den Y-Schwellen ist die gleichmäßige Pressung höher, aber die maßgebende Kantenpressung, die mit dem Verdrehen der Querschwellen um ihre Längsachse in verschiedenen Phasen der Biegelinie entsteht, liegt hier bei nur 25%. Die Ergebnisse weisen aus, dass das Y-Stahlschwellengleis nur bedingt nach dem Verfahren

¹³ Berechnung und Abbildung nach „1 Y-Stahlschwellenoberbau, Prof. Dr. Günther Führer, Prof. Dr. Karl Endmann, Prof. Dr. Günter Berg, Hestra-Verlag Darmstadt 1994“

von Zimmermann berechnet werden kann. Das war der Anlass zur Schaffung einer auf die Y-Schwelle zugeschnittenen Berechnung mittels modifizierter Trägerrostmethode.

Gründe:

- Die Y-Schwelle wird nicht beidseitig gleichzeitig von einer Achse überrollt.
- Durch die wechselseitige Dreipunktlagerung werden die Lasten zeitverzögert übernommen und so auch abgegeben.
- Infolge der Gabelform entsteht mit der Biegelinienausbildung eine elastische Torsionswirkung in den Gabelarmen.
- Die Dreipunktlagerung bewirkt eine Gitterwirkung im Normalgleis, die in Weichen und Kreuzungen noch ausgeprägter vorliegt.

Mit der erarbeiteten FEM-Programmlösung ist es nunmehr möglich, Oberbaukonstruktionen mit komplizierten Unterschwellungen als elastisch gelagerten Trägerrost zu berechnen. Die Lage der Stabelemente kann entsprechend der geometrischen Verhältnisse festgelegt werden, d. h. es ist nicht erforderlich, die rechtwinklige Lage der Stützelemente einzuhalten. Als Ergebnisgrößen werden nicht nur Verschiebungen, sondern auch Schnittkräfte eines jeden Stabelementes ermittelt.¹⁴

2.2.2 Horizontalstabilität, Bogenatmung

2.2.2.1 Querverschiebewiderstand

In Gleisen mit kleinen Halbmessern entstehen größere Horizontalkomponenten der Schienenaxialkraft, die im Gleis bei Temperaturanstieg den Querverschiebewiderstand überwinden und den Bogen nach außen verschieben (Bogenatmung). Dabei kommt es so lange zu einer Verringerung der Schienenaxialkräfte, bis deren Horizontalkomponenten wieder im Gleichgewicht mit dem Querverschiebewiderstand sind. Für den Zustand der Bogenatmung darf es dabei nicht zu einem instabilen Gleichgewichtszustand kommen, der zum örtlichen Ausbrechen des Bogens führt. Arbeitslinien des Querverschiebewiderstandes, die bei größeren Verschiebungen noch ansteigen und nicht in einen horizontalen Verlauf übergehen, sind günstig für Bogenatmung und Gleislagestabilität. Bei den Querswellen entsteht ein stabiler Widerstand nach der Überschreitung der Limitkraft eines gewissen Niveaus, aber bei den Y-Schwellen zeigt sich ein positiver Einfluss der Verkeilung ins Schotterbett. Dieser Effekt verursacht das weitere Widerstandsanwachsen, siehe Abb. 2.4.

¹⁴ Bearbeitet nach „1) Y-Stahlschwellenoberbau, Prof. Dr. Günther Führer, Prof. Dr. Karl Endmann, Prof. Dr. Günter Berg, Hestra-Verlag Darmstadt 1994“

Schwellenart	Verschiebung (mm)	Schotterbett nicht stabilisiert		Schotterbett voll stabilisiert	
		Widerstand pro Gleismeter (kN/m)	Widerstand je Schwelle (kN)	Widerstand pro Gleismeter (kN/m)	Widerstand je Schwelle (kN)
Holzschwelle	2	5	3	10	6
Betonschwelle l < 2,6 m	2	7,5	4,5	13	7,8
Betonschwelle l ≥ 2,6 m	2	10	6	17	10,2
Y-Schwelle	8	12,6	13,3	22,7	18,8

Tab. 2.3 Querverschiebewiderstände von Schwellen nach Art und Stabilisierung bei der bestimmten Verschiebung¹⁵

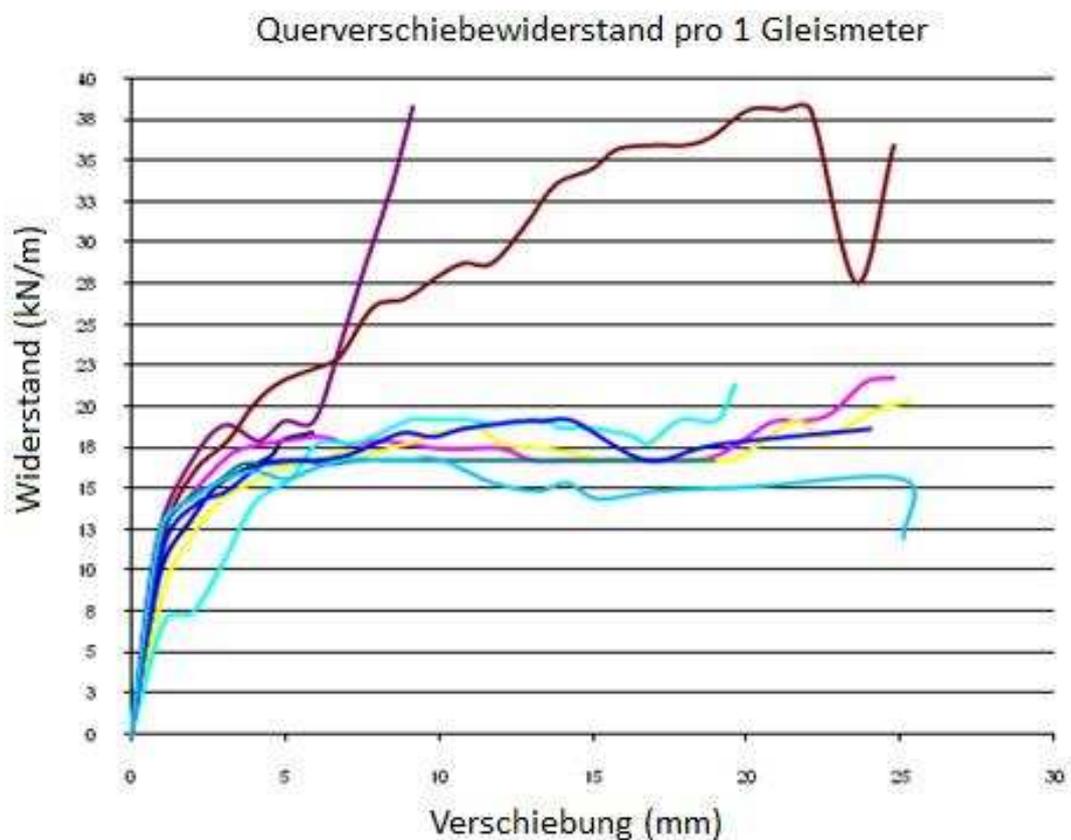


Abb. 2.3 Querverschiebewiderstand pro 1 Gleismeter für einzelne Prüfungen, die auf dem Gleisabschnitt Popelín-Počátky durchgeführt wurden.¹⁶

¹⁵ Nach „14) Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Lothar Fendrich, Springer 2006“

¹⁶ Nach „12) Doktorarbeit – Untersuchung der Y-Schwellen im Oberbau auf der Haupt- und Regionalstrecken in der Tschechischen Republik, Ing. Aleš Suchánek, Praha 2008“

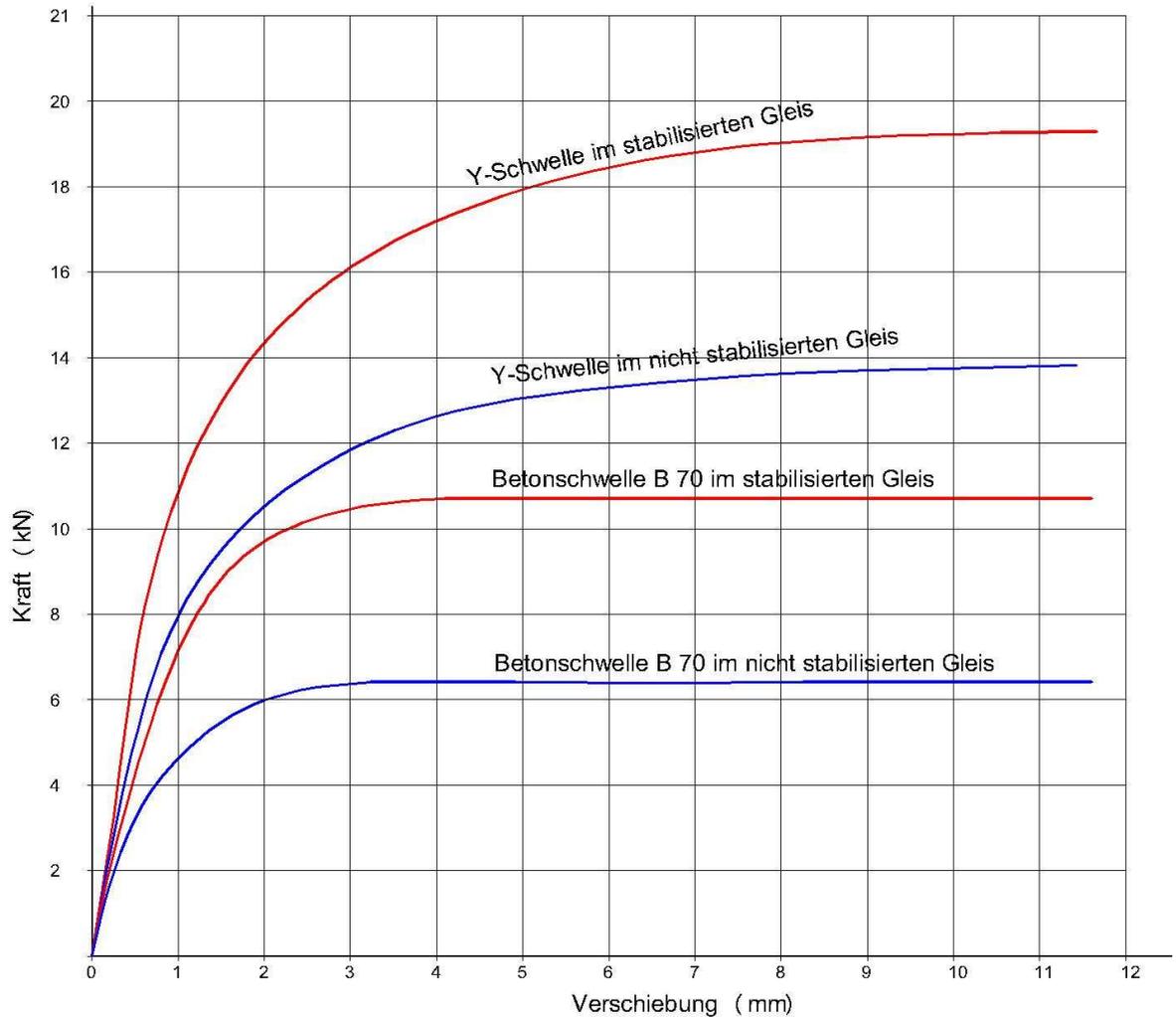


Abb. 2.4 Vergleich des Querverschiebewiderstandes zwischen Y-Schwelle und Spannbetonschwelle B 70¹⁷

2.2.2.2 Längsverschiebewiderstand

Der Längsverschiebewiderstand der Schwelle hat andere Eigenschaften. Bei den Querschwellen ist sein Verlauf fast linear, während er bei den Y-Schwellen ähnlich dem Querverschiebewiderstand ist, siehe Abb. 2.5.

¹⁷ Nach „6) Projektbericht zu Berechnung von horizontalen Gleisverschiebungen bei Gleisverläufen mit engen Bögen, TÜV Automotive GmbH, München 2003“

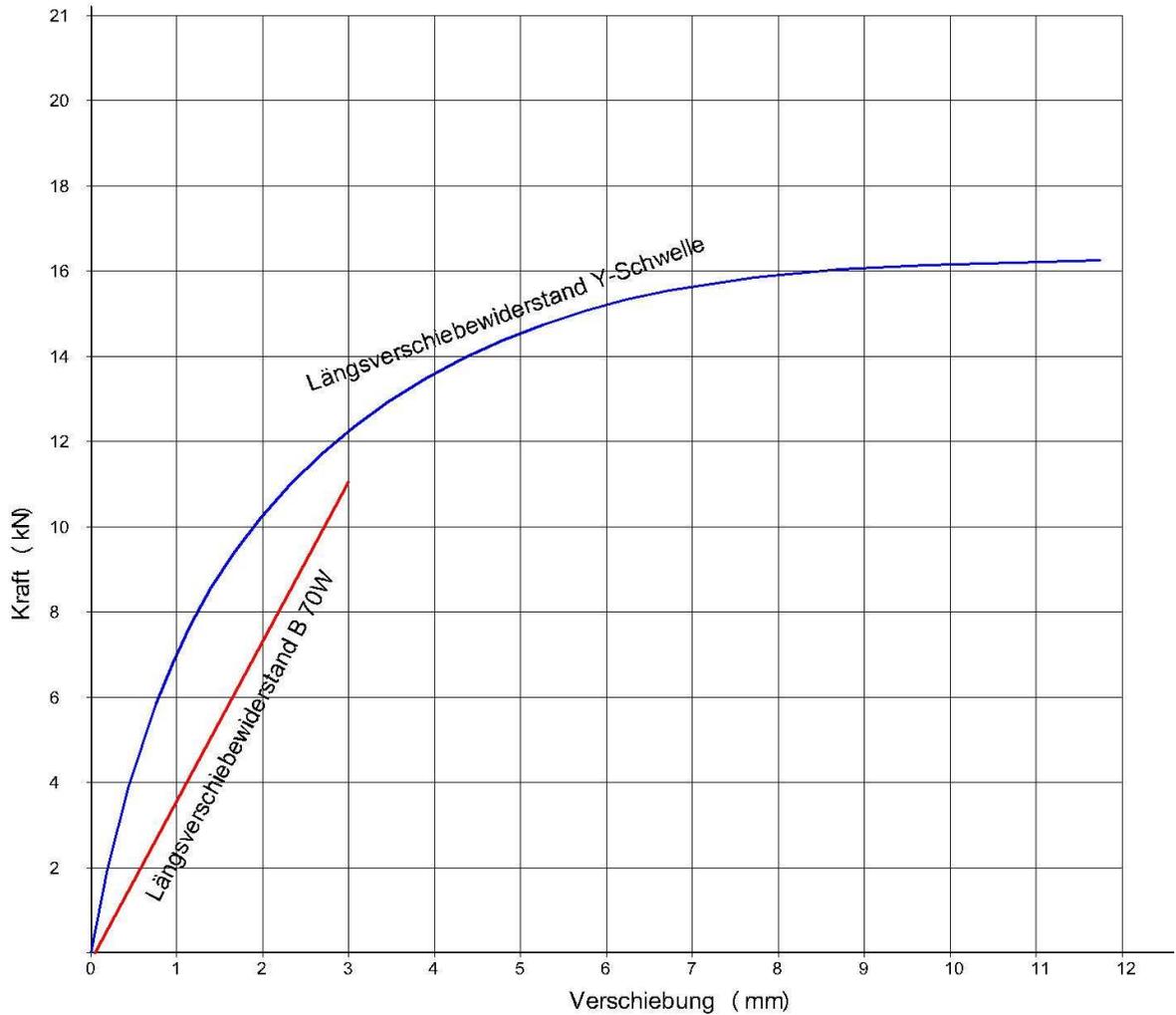


Abb. 2.5 Vergleich des Längsverschiebewiderstandes zwischen Y-Schwelle und Spannbetonschwelle B 70¹⁸

2.2.2.3 Verdrehwiderstand

Der Verdrehwiderstand weist höhere Werte für Y-Schwellen im Vergleich zur klassischen Befestigung auf, siehe Abb. 2.6.

¹⁸ Nach „6) Projektbericht zu Berechnung von horizontalen Gleisverschiebungen bei Gleisverläufen mit engen Bögen, TÜV Automotive GmbH, München 2003“

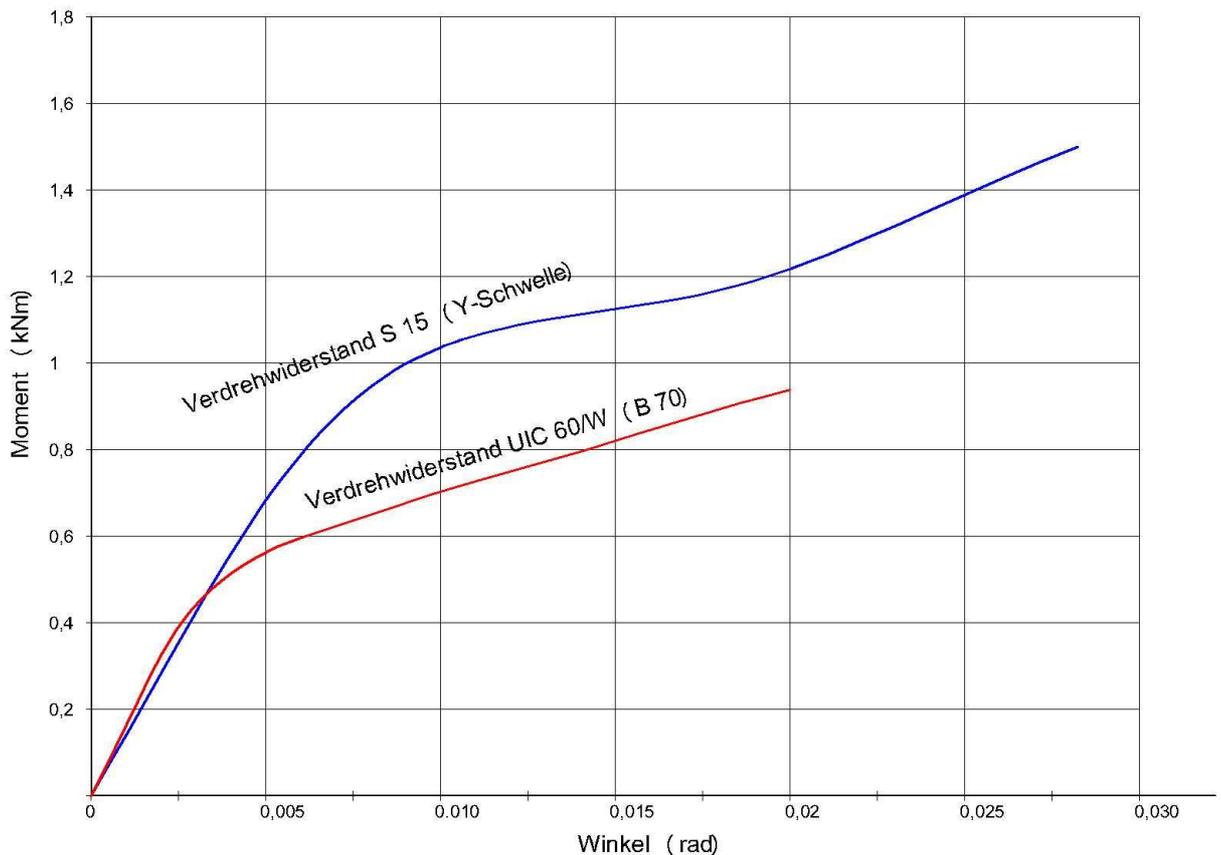


Abb. 2.6 Vergleich des Verdrehwiderstandes zwischen Y-Schwelle und Betonschwelle B 70¹⁹

2.2.2.4 Maßgebender Temperaturanstieg

Der maßgebende Temperaturanstieg für die durchzuführenden Untersuchungen wird aus folgenden Größen berechnet:

Fall 1 (Regelfall):

- Untere Verspanntemperatur 20 °C
- Höchste witterungsbedingte Schienentemperatur 65 °C
- Fehler der Verspanntemperatur $\Delta t = 5 \text{ K}$
- Erforderliche Sicherheit für $V \leq 80 \text{ km/h}$ $\Delta t = 10 \text{ K}$

Fall 2 (Ausnahmefall):

- Obere Verspanntemperatur 26 °C
- Höchste witterungsbedingte Schienentemperatur 65 °C
- Fehler der Verspanntemperatur $\Delta t = 5 \text{ K}$
- Erforderliche Sicherheit für $V \leq 80 \text{ km/h}$ $\Delta t = 10 \text{ K}$

¹⁹ Nach „6) Projektbericht zu Berechnung von horizontalen Gleisverschiebungen bei Gleisverläufen mit engen Bögen, TÜV Automotive GmbH, München 2003“

Fall 3 (Durcharbeitungsfall):

- Untere Verspanntemperatur 20 °C
- höchste, bei Durcharbeitungen und Einzelfehlerbeseitigungen zulässige witterungsbedingte Schienentemperatur 35 °C
- erforderliche Sicherheit bei Temperaturanstieg $\Delta t = 10$ K

Der maßgebende Temperaturanstieg errechnet sich daraus für:

Fall 1: $\Delta t = 65 - 20 + 5 + 10 = 60$ K

Fall 2: $\Delta t = 65 - 26 + 5 + 10 = 54$ K ~ 55 K

Fall 3: $\Delta t = 35 - 20 + 10 = 25$ K

Der Fehler der Verspanntemperatur entsteht aus stets vorhandenen Reibungen und Klemmungen sowie aus dem Rücklaufen der Schienen zwischen Anwärmen und Verspannen. Der Bezug auf die obere Verspanntemperatur im Ausnahmefall ist durch DB Ril 824.50 10, Abschnitt 5 (6) gerechtfertigt. Nach dieser Regelung sollen Bogen mit Halbmessern $r < 1000$ m vorzugsweise im oberen Verspanntemperaturbereich verspannt werden. Für den Durcharbeitungsfall führt die kleinste bei Durcharbeitungen und Einzelfehlerbeseitigungen zulässige witterungsbedingte Schienentemperatur von 3 °C in Bogen mit engen Halbmessern zu größeren Verschiebungen als die höchste von 35 °C. Während der Zeit nach der Herstellung des lückenlosen Gleises kann sich der Fehler der Verspanntemperatur durch plastisch zurückgebliebene Quer- und Längsverschiebungen des Gleises vergrößert haben. Es wird deshalb auch für den Durcharbeitungsfall eine Sicherheit von $\Delta t = 10$ K berücksichtigt.

2.2.2.5 Gleichung für die Entspannung der Schienenaxialkraft im Gleisbogen

Ein lückenlos verschweißtes Bogengleis mit engen Halbmessern verschiebt sich beim Auftreten von Schienenaxialkräften quer im Schotter. Sind die Axialkräfte Druckkräfte, dann hat die Querverschiebung eine Verlängerung der Schienen und eine Verringerung (Entspannung) der Axialkraft, das Bogenatmen zur Folge. In Abb. 2.7 ist Δr die Querverschiebung (Bogenatmung) des Gleises, der die folgende Entspannung der Axialkraft entspricht:

$$\Delta F = \frac{\Delta r}{r} \cdot E \cdot A$$

Wird die Axialkraft für den Zustand bei Beginn der Bogenatmung (Verschiebung Null)

$$F_0 = \alpha \cdot E \cdot A \cdot \Delta t$$

eingeführt, so gilt allgemein für die Größe der Schienenaxialkraft

$$F = F_0 - \Delta F$$

$$F = E \cdot A \cdot \left(\alpha \cdot \Delta t - \frac{\Delta r}{r} \right)$$

Die Querverschiebung resultiert dabei immer aus den Axialkräften beider Schienen eines Gleises, d. h. für A ist der doppelte Schienenquerschnitt in die Gleichungen einzusetzen.

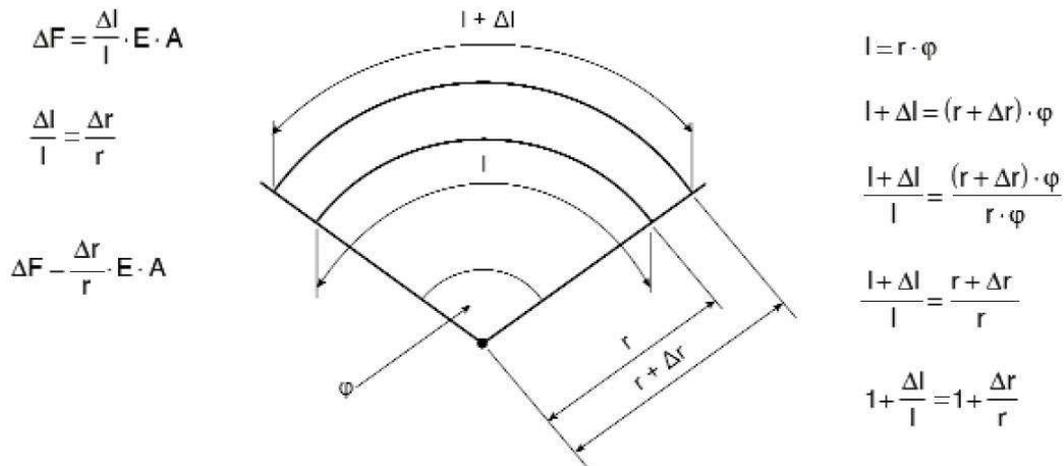


Abb. 2.7 Zusammenhang zur Berechnung der Entspannung der Schienenaxialkraft

Um den Gleichgewichtszustand zu beschreiben, ist es erforderlich, die Normalkomponente der Schienenaxialkraft wie den Querverschiebewiderstand als Linienlast anzugeben. Es gilt

$$w = \frac{F}{r}$$

wo w Querlinienlast ist. Die resultierende Überleitung der Achsenkraft auf Linienform ist

$$w = \frac{1}{r} \cdot E \cdot A \cdot \left(\alpha \cdot \Delta t - \frac{\Delta r}{r} \right)$$

Nun ist es möglich, die Größe der Schienenaxialkraft mit dem Querverschiebewiderstand zu vergleichen.

2.2.2.6 Verwendete Arbeitslinien für den Querverschiebewiderstand

Die grafische Auswertung erfordert möglichst genaue Arbeitslinien für den Querverschiebewiderstand des nicht stabilisierten und des stabilisierten Gleises. Die größten Bogenatmungen sind im nicht stabilisierten Gleis zu erwarten, z. B. nach einer Durcharbeitung oder einer Einzelfehlerbeseitigung mit schweren Stopfmaschinen. Bei Halbmessern $190 \text{ m} \geq r \geq 170 \text{ m}$ können sie erfahrungsgemäß durch Sicherungskapfen (Sik) an den Betonschwellen B 70 den Querverschiebewiderstand vergrößern (nach DB Ril 820 01 42). Bei Y-Stahlschwellen werden Schwellenanker bisher noch nicht benutzt.

Messungen für den nicht stabilisierten Gleiszustand werden mit Verschieben eines Gleisrostes durchgeführt, d. h. mit den Schienen als Auflast auf den Schwellen. Diese Messungen entsprechen den Verhältnissen im Gleis am besten. Bei Messungen im Gleis werden die Schwellen am häufigsten einzeln und ohne Auflast der Schienen verschoben. Dabei reicht bei den Y-Stahlschwellen die geringe Masse der Schwellen nicht aus, ihr Abheben vom Schotter zu verhindern. Dadurch wird wegen der von den tatsächlichen Verhältnissen abweichenden Versuchsbedingungen ein zu kleiner Querverschiebewiderstand erhalten. Um zu verlässlichen Arbeitslinien für den stabilisierten Gleiszustand zu gelangen, werden für die Y-Stahlschwellen und die Betonschwellen B 70 mit Sicherungskappen die Arbeitslinien für den nicht stabilisierten Gleiszustand um den Faktor 1,8 vergrößert. Dieser Faktor ist charakteristisch für das Verhältnis zwischen stabilisiertem und nicht stabilisiertem Gleiszustand. Für den stabilisierten Zustand bei den Y-Schwellen ist diese Proportion konstant für Verschiebungen > 2 mm. Das gilt ungefähr auch für Betonschwellen mit Sicherungskappen an jeder Schwelle.²⁰

2.3 Nutzungsbedingungen und Genehmigung zum Betrieb

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse der Versuche und Forschungen im Labor und in Betriebsgleisen von der in Schottergleisen einbaubaren Y-Stahlschwellen mit Schienenbefestigung S 15 sowie die Ergebnisse der theoretischen Berechnungen zusammengefasst. Die Arbeiten wurden durch folgende Gesellschaften durchgeführt.

- Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Bau von Landverkehrswegen
- TÜV Automotive GmbH Geschäftseinheit Rail
- Ingenieurbüro D. Uderstädt + Partner GbR
- Dipl. - Ing. M. Jaschke beratender Ingenieur, Ingenieurbüro für Bauwesen, Baustatik
- Deutsche Bahn AG. Zentralbereich Forschung und Versuche, Forschungs- und Versuchszentrum

Das Ersatzträgheitsmoment am Y-Stahlschwellengleis „Y-SW-S 15 No-650-54“ wurde bestimmt. Der Gleisrost aus 5 Schwellen mit zwei Schienen S 54 wurde in der horizontalen Ebene als Balken auf zwei Stützpunkten betrachtet, auf den mittig eine Einzellast wirkte. Das Ersatzträgheitsmoments wurde mit Hilfe der Biegetheorie aus der ermittelten Durchbiegung bestimmt. Es hat sich $I_h = 7165 \text{ cm}^4$ ergeben, das etwa fünfmal so hoch ist, wie beim Betonschwellengleis B 70 W.

²⁰ Nach „4) Zeitschrift EI– Eisenbahningenieur (55) 12/2004, Bogenatmung und Gleislagestabilität des Y-Stahlschwellengleises in kleinen Halbmessern, Johannes Franz“

Zur Ermittlung des Querverschiebewiderstandes der einzelnen Y-Stahlschwellen „Y SW- S 15 No-650-54“ im Gleis, wurden die Schwellenschrauben und die inneren und äußeren Führungsplatten, sowie die Zwischenlagen und Zwischenplatten entfernt. Die einzelnen Y-Stahlschwellen wurden mit Hilfe hydraulischer Presse im Schotterbett verschoben. Der Mittelwert des Querverschiebewiderstandes über alle Schwellen betrug 7,0 N/mm.

Die Ermittlung des Querverschiebewiderstandes des Gleisrostes mit Y-Stahlschwellen „Y-SW-S 15 No-650-54“ mit angeschweißten Querriegeln und Schienen S 54 wurde durchgeführt. Ein Gleisrost von 4,3 m Länge bestehend aus 4 Y-Stahlschwellen und Schienen S 54 wurde eingeschottert und verdichtet. In den Gleisrost wurde die notwendige Kraft mit Hilfe hydraulischer Pressen an zwei Stellen eingeleitet und durch die Schienen auf den Gleisrost verteilt. Die Kraft ist angewachsen, bis sie eine Verschiebung des Gleisrostes erreicht hat. Für eine Einflußlänge des Gleisrostes von 4268 mm, entsprechend dem 5,5-fachen Stützpunkt Abstand erhält man pro mm Gleislänge einen Querverschiebewiderstand von 9,2 N/mm.

Die Stabilität des Gleises mit Y-Stahlschwellen gegen Verwerfung wurde mit einem FEM Programm untersucht. Zwei Kreisbögen mit Radius von 179 m und Länge von 289 m und die drei daran anschließenden Übergangsbögen wurden simuliert. Die elastische seitliche Atmung bei einem Anwachsen der Temperatur von 46 K betrug 3,7 bis 3,9 mm in den Kreisbögen. Das Gleis mit Y-Stahlschwellen kann nicht auswerfen, sondern es atmet elastisch.

Der Scherenhebelschwingversuch der Schienenbefestigung S 15 wurde in drei verschiedenen Versuchsphasen durchgeführt. In den Versuchsphasen waren die Werte der Last 75 kN/Schiene und 100 kN/Schiene vertikal, sowie 46 kN/Schiene, und 61 kN/Schiene horizontal. Die Prüffrequenz war 3 Hz, und insgesamt wurden 3,5 Mio Schwingspiele in den drei verschiedenen Versuchsphasen erzeugt. Während des Scherenhebelschwingversuchs sind Verformungen entstanden, die in der gleichen Größe liegen wie bei den Standard-Befestigungen der DB. Nach dem Versuch waren alle Einzelteile der Schienenbefestigung schadensfrei. Lediglich die linke Zwischenlage wies geringfügige Abriebserscheinungen auf, an den äußeren Führungsplatten wurden leichte Druckstellen festgestellt. Die Schienenbefestigung ist demnach für die in Betriebsgleisen der DB maximal vorkommenden Achslasten und Gleisradien geeignet.

Die Federziffer der Zwischenlage ZW S15/4-1:40 betrug 360 kN/mm am Doppelstützpunkt.

Der Durchschubwiderstand der Schienenbefestigung S 15 wurde sowohl statisch als auch dynamisch bei einer Prüffrequenz von zwischen 30 Hz und 120 Hz und Schwingkraftamplituden $\pm 0,8$ kN bestimmt. Bei statischer Belastung ergibt sich ein Durchschubwiderstandswert von 9,4 kN bei einer elastischen Verschiebung von 0,6 mm.

Bei dynamischer Belastung ergibt sich ein Durchschubwiderstandswert von 9,5 kN bei einer elastischen Verschiebung von 0,7 mm.

Bei dem Ausziehversuch der modifizierten Dübel Dü S 15 zwischen den Trägern, versagten die Flansche der Träger bei einer Kraft von 45 kN durch Aufbiegung. In site üben jedoch die Winkelführungsplatten einen Gegendruck aus, was höhere Bruchlasten erwarten läßt.

Ein kompletter, mit zwei Schienenstützpunkten montierter Schwellenkörper wurde unter Wasser gelagert und anschließend an der Luft zum abtrocknen aufgebockt. Dann wurde eine Spannung von 10 V zwischen beiden Schienen angelegt. Der elektrische Widerstand ergab sich im tropfnassen Zustand unmittelbar nach Herausnahme aus dem Wasser $R = 270 \text{ k}\Omega$, nach 120 Minuten Abtrockenzeit stieg der Widerstand auf $R = 3600 \text{ k}\Omega$. Demnach erfüllt die Schienenbefestigung die Anforderungen an den Isolierzustand.

Gemäß dem Standsicherheitsnachweis ist das Trägerprofil der Y-Stahlschwelle Typ YSW- S15-No-650-54 für die auftretenden Lasten von 225 kN Achslast und $V = 160 \text{ km/h}$ ausreichend dimensioniert.

Die Bettungs- und Erdungswiderstandsmessungen der Gleise (elektrifiziert, eingleisig) mit Y-Stahlschwellen wurden durchgeführt im Zeitraum von Juli bis Oktober. Der Maximalwert bei Trockenheit betrug dabei $73 \text{ }\Omega\text{km}$, der Mindestwert betrug $6 \text{ }\Omega\text{km}$ bei einer maximalen Niederschlagsmenge von 5 mm/h . Der Minimalwert des Erdungswiderstandes war $8,5 \text{ }\Omega\text{km}$ bei leichtem Regen, und der Maximalwert liegt bei $70 \text{ }\Omega\text{km}$ bei Trockenheit.

Aufgrund von Luftschallemissionsmessungen kann festgestellt werden, dass die Y-Stahlschwellen geringere Luftschallemissionen bewirken, als die Betonschwellen. Im Mittel über alle Zugklassen ergäbe sich somit eine Minderung des Mittelungspegels von 1,5 dB.²¹

Die Geschwindigkeit der Züge und die Zuglasten, gemessen in Leistungstonnen (Lt bzw. t/Tag), sind entscheidende Kriterien für die Belastung des Oberbaus. Für die Anwendung im Schotteroberbau ist die Y-Stahlschwelle vom Deutschen Eisenbahn Bundesamt (EBA) wie folgt zugelassen:

- Bei Zuggeschwindigkeiten $\leq 120 \text{ km/h}$ und Zuglasten $\leq 20 \text{ 000t /Tag}$ für „Streckenkategorien“ G 50, R 80, G 120, R 120 und übrige Gleise
- Bei Zuggeschwindigkeiten $\leq 120 \text{ km/h}$ und Zuglasten $\leq 30 \text{ 000t/Tag}$ für „Streckenkategorien“ übrige Gleise

²¹ Nach „5) Technischer Zulassungsbericht für die in Eisenbahnschottergleisen einbaubaren Y-Stahlschwellen mit Schienenbefestigung S 15, T. U. W. B. Lehrstuhl für Straßen- und Eisenbahnbau, Budapest 2003“

- Bei Zuggeschwindigkeiten ≤ 160 km/h nach Einzelfall bezogener Zustimmung für Schienenauflegerabstand 230/600/230 mm

Im letztgenannten Fall werden 50 cm Schottervorkopf, in den anderen Fällen 30 cm verlangt. Wie weiter unten erläutert wird, ist das Schotterband vor dem Schwellenkopf der Y-Stahlschwellen rechnerisch unwirksam, gleichwohl dient es beim Stopfen des Gleises gewissermaßen als „Widerlager“. Grundsätzlich gilt die Zulassung für Radsatzlasten (auch „Achslasten“ genannt) bis 225 kN (in Ausnahmefällen bis 250 kN). Die Zulassung enthält den Hinweis, dass grundsätzlich alle Gleise mit Y-Stahlschwellen lückenlos bis zu einem Radius von ≥ 190 m verschweißt werden dürfen. Am Rande sei erwähnt, dass bei Fester Fahrbahn mit Asphalttragschichten eine Zulassung der Y-Stahlschwellen für Geschwindigkeiten bis 200 km/h vorliegt. Die nicht bundeseigenen Eisenbahnen in Deutschland stützen sich auf die bewährte Anwendung der Y-Stahlschwelle bei der Deutschen Bahn AG, ebenso viele ausländische Bahnverwaltungen. Die Russische Staatsbahn hat auf ihrem Versuchsgelände bei Moskau eigene Versuche mit Y-Stahlschwellen unternommen.²²

Das Schweizer Bundesamt für Verkehr (BAV) hat die Zulassung der Y-Stahlschwelle für die Schweizer Bundesbahnen im Jahre 2000 erteilt. Gemäß der Vorschrift gilt für Normalspur:

- Für lückenlos verschweißtes Gleis sind Schienen SBB I oder SBB IV (UIC 54E) verwendbar
- Maximale Gleisbelastung $\leq 20\,000$ t/Tag
- Maximale Zuggeschwindigkeit ≤ 120 km/h
- Gleise der Streckenklasse D3 und D4 nur mit dem Raster 230/600/230 mm
- Mindestradius beim Einsatz der Schiene SBB I ≥ 350 m
- Mindestradius beim Einsatz der Schiene UIC 54E ≥ 130 m
- Stabiles Schotterbett mit Schotterflanken mit Breite von 30 cm vor Schwellenköpfen, mindestens auf Niveau der Schwellenoberkante (empfohlen überhöht)
- Schotterbettdicke ab Schwellenunterkante ≥ 30 cm

Für Schmalspur gilt:

- Für lückenlos verschweißtes Gleis sind Schienen SBB I verwendbar
- Mindestradius beim Einsatz der Schiene SBB I ≥ 35 m
- Mindestradius beim Einsatz der Schiene SBB I in den Zahnradbahnen ≥ 70 m
- Raster 230/650/230 mm nur bei schwacher Belastung
- Andere Bedingungen gelten wie für Normalspur²³

²² Nach „2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann“

²³ Nach „7) Zulassung 201215 betreffend der Y-Stahlschwellen mit Schienenbefestigung S 15 in Schottergleisen, Bundesamt für Verkehr (BAV), Bern 2000

An der Technischen Universität in Budapest wurden Anwendungsbedingungen der Y-Stahlschwellen in normalspurigen Schottergleisen im Streckennetz von Ungarn festgestellt.

Für Y-Stahlschwellen mit Länge von 2000 mm gilt:

- Schienenauflegerabstand: 230/600/230 mm
230/650/230 mm
- Abstand zwischen der Symmetrieachse der Schwellen:
 - a) beim System von 230/600/230: 1245 mm
 - b) beim System von 230/650/230: 1320 mm
- Typ der Schienenbefestigung: S 15
- Maximale zugelassene Geschwindigkeit: 120 km/h
- Maximale zugelassene Achslast: 225 kN
- Maximale Gleisbelastung: 30000 t/Tag
- Verwendbare Schientypen: UIC 60, UIC 54, UNI 50, S 49, MÁV 48
- Kleinster Kreisbogenradius, der in dem lückenlos verschweißten Gleis gebaut werden kann:
 - 1) bei normalen Eisenbahnen und allen Schientypen: 190 m
 - 2) bei Straßenbahnen, Stadtbahnen und Vorortbahnen:
 - a) mit Schienen MÁV 48: 160 m
 - b) mit Schienen UIC 54 und UIC 60: 190 m
- Minimale Vorkopfeinschotterung: 30 cm
- Minimale Schotterdicke unter Schwellenunterkante: 30 cm
- Neigung der Strecke: keine Begrenzung

Für Y-Stahlschwellen mit Länge von 2200 mm gilt:

- Schienenauflegerabstand: 230/550/230 mm
- Abstand zwischen der Symmetrieachse der Schwellen: 1170 mm
- Typ der Schienenbefestigung: S 15
- Maximale zugelassene Geschwindigkeit:
 - a) Schwerlastverkehr (max. 25 t Achslast): 80 km/h
 - b) Regelgüterverkehr (max. 22,5 t Achslast): 120 km/h
 - c) Reisezugverkehr: 160 km/h
- Maximale zugelassene Achslast: 250 kN
- Maximale Gleisbelastung: 120000 t/Tag

- Verwendbare Schientypen: UIC 60, UIC 54,
UNI 50, S 49,
MÁV 48
- Kleinster Kreisbogenradius, der in dem lückenlos verschweißten Gleis gebaut werden kann:
 - 1) bei normalen Eisenbahnen und allen Schientypen: 190 m
 - 2) bei Straßenbahnen, Stadtbahnen und Vorortbahnen:
 - a) mit Schienen MÁV 48: 160 m
 - b) mit Schienen UIC 54 und UIC 60: 190 m
- Minimale Vorkopfeinschotterung:
 - a) im Falle von $V \leq 120$ km/h: 30 cm
 - b) im Falle von $V > 120$ km/h: 40 cm
- Minimale Schotterdicke unter Schwellenunterkante: 30 cm
- Neigung der Strecke: keine Begrenzung

2.4 Anwendungsbedingungen der Y-Schwellen in der Tschechischen Republik

Y-Stahlschwellen sind in den Gleisen auf den Staats- und Regionalstrecken zu benutzen, wo es aus baulich technischen Gründen notwendig ist, das Schotterbett mit reduziertem Profil oder lückenloses Gleis in engen Verhältnissen zu errichten. Maximale zugelassene Achslast ist 22,5 t. Y-Schwellen dürfen in den Gleisklassen 5 und 6 mit Höchstgeschwindigkeit $V \leq 80$ km/h benutzt werden. Bei den Geschwindigkeiten $80 < V \leq 120$ km/h ist ihre Benutzung nur mit der Genehmigung von SŽDC OTH möglich.

Nach der Richtlinie SŽDC S3 wird für Y-Schwellengleis eine minimale Schotterdicke unter Schwellenunterkante von 300 mm verlangt. Im Gleis mit Schienenüberhöhung wird unter der nicht überhöhten Schiene gemessen. Die Schotterbettbreite von 2600 mm in der Schotterbettkrone ist nur im Fall der Streckenklasse 6 zulässig. Diese Breite geht aus der Schwellenlänge von 2300 mm hervor. Streckenklasse 6 gilt für Gleis mit Betriebsbelastung unter 1,825 Mio. BRT/Tag. Bei der Y-Schwellenverwendung werden keine Erhöhung und Verbreiterung des Schotterbettes durchgeführt. Ein Stoßgleis mit Y-Schwellen wird üblicherweise nicht errichtet, aber trotzdem erlaubt die Vorschrift S3 ihre Benutzung im Stoßgleis in den Gleisfeldern von 25 m Länge. Bei Stoßerrichtung sind die Vollprofilverbindungsstücke der Schienen zu verwenden. Nähere Bedingungen von Y-Schwellen zeigt die Tabelle 2.4.

Schiene	Schwellenverteilung	Schwellenanzahl	
		Im Gleisfeld	Pro 1 km Gleis
UIC 60, S 49 -25 m	l	19+2*	760+80*
UIC 60, S 49 -25 m	k	17+2*	680+80*
UIC 60, S 49 lückenloses Gleis	l	-	803
UIC 60, S 49 lückenloses Gleis	k	-	757

* Übergangsschwelle Typ „Y“

Tab. 2.4 Y-Schwellenverteilung

Bemerkung: Schwellenverteilung „l“ ist gültig für Schwellen „Y“ in der Grundform mit Schienenauflagerabstand 230/600/230 mm und zulässig in den Haupt-, Vorfahr- und Stationsgleisen.

Schwellenverteilung „k“ ist gültig für Schwellen „Y“ in der Grundform mit Schienenauflagerabstand 230/650/230 mm und zulässig für Streckenklasse 6.²⁴

2.5 Messverfahren auf den Prüfabschnitten

2.5.1 Messen von Vertikaleinsenkungen der Schienen mit Hilfe von Schublehren

Das Messprinzip besteht darin, dass ein Armträger ins Erdplanum verankert wird. Auf seinem Ende wird eine Schublehre befestigt. Die Schublehre wird in der Vertikallage so eingestellt, um den beweglichen Teil der Schienenunterkante zu berühren. Die Messstelle wird grundsätzlich zwischen zwei Schwellen gewählt. Am Anfang wird die Lage der Schublehre bei der „Nullbelastung“ notiert. Nach der Durchfahrt des Zuges, dessen Achslast bekannt ist, wird die maximale Einsenkung der Schienenunterkante notiert. Dieser Vorgang kann beliebig wiederholt werden.²⁵

²⁴ Nach „8) Vorschrift SŽDC S3 Eisenbahnoberbau, Správa železniční dopravní cesty, Staatliche Gesellschaft, Praha 2008“

²⁵ Nach „12) Doktorarbeit – Untersuchung der Y-Schwellen im Oberbau auf der Haupt- und Regionalstrecken in der Tschechischen Republik, Ing. Aleš Suchánek, Praha 2008“



Abb. 2.7 Messen von vertikalen Schieneneinsenkung mit Hilfe von Schublehre

2.5.2 Komplexes Messverfahren der Gleisverformungen mit Hilfe vom Messwagen KRAB

Das KRAB-System ist zum Messen der geometrischen Größen auf den Strecken mit beliebiger Spur vorgesehen. Es hat sich bei den Bauabnahmen von Korridor- und Regionalstrecken, Stationsgleisen, Anschlussgleisen, Straßenbahnstrecken usw. bewährt. Es ist auch als Leitwagen von Stopfmaschinen zu benutzen. Die Messgeschwindigkeit wird bei der Grundauführung auf bis zu 8 km/h begrenzt. Die TOP-Ausführung ermöglicht Messgeschwindigkeiten bis zu 15 km/h. Das Gewicht des Wagens ist 65 kg, Betreuung machen zwei Personen. Batterien des elektronischen Leitsystems ermöglichen kontinuierliche Arbeit bis zu 8 Stunden. In den PC-Speicher kann man Daten von 2000 km Strecke einlesen. Hersteller ist Gesellschaft KŽV s.r.o. Praha. Der Messwagen hat die Zulassung bei SŽDC, DB, RENFE.

Der Messwagen ist fähig folgende geometrischen Größen zu messen:

- Gleisnivellette
- Gleisrichtung
- Spurweite
- Spurveränderung pro 1 m
- Überhöhung

- Gleisverwerfung
- Zurückgelegte Fahrstrecke²⁶

Auf dem Abschnitt mit Y-Schwellen in Liberec wurde der KRAB-Wagen in der Kombination mit einer Rahmensonderkonstruktion benutzt, wo die Messpunkte für die Bemessung der Einsenkungswelle platziert wurden. Als Trieb- und Lastfahrzeug wurde ein multifunktionseller Triebwagen MUV 69 verwendet. Die vorgeschriebene Last wurde mit Betonplatten im Güterraum erzielt. Die Achslast wurde auf der Gleiswaage in der Station Liberec überprüft. Messfahrten wurden mehrmals im Laufe des Tages in Abhängigkeit von der Temperatur durchgeführt.

Auf den Prüfabschnitten wurden noch weitere Messungen durchgeführt.

- Messung der Vertikaleinsenkungen von Y-Schwellen im Gleisbett
- Messung der Y-Schwellendurchbiegung im Gleisbett
- Stabilitäts- und Lagemessung in der Abhängigkeit von Temperatur und Durchfahrt der Schienenfahrzeuge
- Messung des Querverschiebewiderstandes von Y-Schwellen



Abb. 2.8 Messwagen KRAB eingelegt in der Rahmenkonstruktion

²⁶ Nach Firmenmaterial der Gesellschaft Komerční železniční výzkum, s.r.o. „13) www.kzc.cz“



Abb. 2.9 Messfahrt

3 Versuchsabschnitte mit Y-Stahlschwellen

3.1 Strecke Nr. 036 Liberec-Tanvald, Bogen im km 1,402- km 1,729

Im Jahre 2007 wurde ein Abschnitt mit Y-Schwellen in der Nähe vom Bahnhof Liberec im Rahmen der Mittelinstandsetzung errichtet. Es handelt sich um einen Bogen mit Halbmesser 150,5 m. Ungefähr in der Mitte des Bogens befindet sich eine Brücke mit durchlaufendem Schotterbett. Zum ersten mal in der Tschechischen Republik wurde eine Spurverbreiterung im Bogen mit der Hilfe von Führungsplatten benutzt. Die Verbreiterung erfolgt schrittweise um 2 mm bis zur maximalen Verbreiterung von 16 mm. Auf diesem Abschnitt, aber auch auf weiteren Abschnitten mit Y-Schwellen wurden Bahnübergangskonstruktionen vom Typ BODAN realisiert. Diese Polymerbetonplatten zum Zudecken des Bahnoberbaus sind für Y-Schwellen angepasst und der Übergang wird mit der gleichen Geometrie wie bei Querschwellen errichtet.

Strecke Nr. 036, Bogen v km 1,402- km 1,729	
Abschnittlänge	0,327 km
Bogenhalbmesser	150,5 m
Schiene	S 49
Entwurfsgeschwindigkeit	50 km/h
Schienenüberhöhung	110 mm
Überhöhungsmangel	100 mm
Y-Schwellenlänge	2000 mm
Auflagerabstand von Schienen	230/650/230 mm
Schwellenabstand	1320 mm
Traktion	Diesel
Achslast	20 t

3.2 Strecke Nr. 210 Veselí n.L. - Horní Cerekev, Abschnitt Popelín – Počátky Žirovnice

Der Abschnitt wurde wie der erste in der Tschechischen Republik im Jahre 2003 errichtet und befindet sich von km 45,002 bis km 47,074. Der Aufbau wurde in zwei Etappen durchgeführt. Die erste Etappe (beendet im Oktober 2003) umfasst Rekonstruktionen von 548 m Abschnittslänge. Der Bau wurde von der Firma GJW a.s. realisiert. Die zweite Etappe setzt mit der Rekonstruktion von 1524 m fort. Der Ersteller war Skanska ŽS a.s.

Strecke Nr. 210 Popelín – Počátky Žirovnice	
Abschnittlänge	2,072 km
Bogenhalbmesser	392, 285, 278 m
Schiene	UIC 60
Entwurfsgeschwindigkeit	70 km/h
Schienenüberhöhung	140 mm
Überhöhungsmangel	68 mm
Y-Schwellenlänge	2000 mm
Auflagerabstand von Schienen	230/600/230 mm
Schwellenabstand	1245 mm
Traktion	25 kV 50 Hz
Achslast	22,5 t
Gleisbelastung	9 mil. BRT/Jahr

3.3 Strecke Nr. 195 Rybník-Lipno nad Vltavou, Abschnitt Čertova Stěna-Loučovice

Diese Strecke ist historisch eine der ersten elektrifizierten Strecken in Tschechien. Ursprünglich handelt es sich um Gleichstrom 1500 V aus dem Jahr 1911, der im Jahre 2005 auf 25 kV 50 Hz verändert wurde. Im Rahmen dieser Veränderung wurde eine neue Stromleitung und eine Gleisrekonstruktion durchgeführt. Im Streckenabschnitt von km 16,624 bis km 18,361 wurde im Jahre 2008 entschieden, lückenloses Gleis mit Y-Schwellen zu errichten. Dieser Abschnitt kennzeichnet sich durch enge Bogenradien.

Strecke Nr. 195 Čertova Stěna-Loučovice	
Abschnittlänge	1,737 km
Bogenhalbmesser	345, 470, 150, 150, 2000, 410, 360, 220, 200, 330 m
Max. Streckenneigung	32 ‰
Schiene	S 49
Entwurfsgeschwindigkeit	50 km/h
Schienenüberhöhung	80 mm
Überhöhungsmangel	117 mm
Y-Schwellenlänge	2000 mm
Auflagerabstand von Schienen	230/650/230 mm
Schwellenabstand	1320 mm
Traktion	25 kV 50 Hz
Achslast	18 t
Gleisbelastung	0,7 mil. BRT/Jahr

3.4 Strecke Nr. 238 Pardubice-Havlíčkův Brod, Station Rozsochatec

Im Jahr 2007 wurde der Einbau der Weiche Nr. 4 auf Y-Schwellen am Bahnhof Rozsochatec von km 10,417 bis km 10,547 realisiert. Die Weiche hat die Firma DT Prostějov hergestellt und die Schwellen haben eine eigene Konstruktion. Der Hauptunterschied gegenüber Thyssen Krupp-Schwellen ist die Schwellenhöhe, die den Wert von 140 mm hat. An die Weiche knüpft ein Streckenabschnitt mit einem Übergangsbogen bis Radius 320 m an.

Strecke Nr. 238, Station Rozsochatec	
Abschnittlänge	0,130 km
Bogenhalbmesser	320 m
Max. Streckenneigung	10,3 ‰
Schiene	S 49
Entwurfsgeschwindigkeit	50 km/h
Schienenüberhöhung	80 mm
Y-Schwellenlänge	2000 mm
Auflagerabstand von Schienen	230/650/230 mm
Schwellenabstand	1320 mm
Traktion	Diesel
Achslast	20 t

3.5 Straßenbahn Liberec-Jablonec n. Nisou

Auf der Straßenbahn von Liberec nach Jablonec nad Nisou wurden im Jahre 2006 zwei Abschnitte von 342 m und 365 m Länge realisiert. Hier werden Schwellen für zwei Spurweiten (1000 mm, 1435 mm) verwendet. Auf einem Abschnitt wurden Vignolschienen S 49 benutzt, auf dem anderen Rillenschienen NT1. Zur Zeit ist nur 1000 mm Spur im Betrieb. In der Zukunft ist eine Veränderung auf 1435 mm Spurweite zu überlegen.

Straßenbahn Libetec-Jablonec n. Nisou	
Abschnittlänge	0,707 km
Schiene	S 49, NT 1
Y-Schwellenlänge	2000 mm
Auflagerabstand von Schienen	230/650/230 mm
Schwellenabstand	1320 mm
Traktion	750 V

3.6 Strecke Nr. 210 SLB Lamprechtshausen-Trimmelkam

Salzburger Lokalbahn (SLB) ist ein Tochterbetrieb der Salzburg AG für Energie Verkehr und Telekommunikation. Sie ist eine der Österreichischen Privatbahnen und wird unabhängig von den Österreichischen Bundesbahnen betrieben. Sie betreibt mit der S 1 die am meisten frequentierte Linie des Salzburger S-Bahnsystems sowie deren Zweiglinie S 11. Unter SLB-Verwaltung gibt es auch eine anschließende Regionalbahn nach Trimmelkam. Im Jahre 2007 wurde ein Gleisabschnitt mit Y-Schwellen zwischen Lamprechtshausen und Trimmelkam im Rahmen der umfangreichen Unterbauumbaumaßnahmen errichtet. Die Gleisverlegung wurde im Jochverfahren durchgeführt.

Strecke Nr. 210 SLB Lamprechtshausen-Trimmelkam	
Abschnittlänge	1,230 km
Bogenhalbmesser	200-300 m
Max. Streckenneigung	8,4 ‰
Schienenform	S 49
Entwurfsgeschwindigkeit	60 km/h
Schienenüberhöhung	max. 120 mm
Überhöhungsfehlbetrag	92 mm
Y-Schwellenlänge	2000 mm
Auflagerabstand der Schienen	230/600/230 mm
Schwellenabstand	1245 mm
Traktion/Netz	DC 1000V
Achslast	22,5 t
Gleisbelastung	4 mil. BRT/Jahr



Abb. 3.1 Baustelle für Herstellung der Gleisjoche



Abb. 3.2 Gleisbau im Gebiet Fürwaag



Abb. 3.3 Gleisjoche nach dem Einbau ins Gleisbett



Abb. 3.4 Verlegung der vormontierten Joche mit der Hilfe vom Gleiskran

4 Querschnittentwurf für tschechische Verhältnisse

Der Querschnittsentwurf der Gleiskonstruktion hält sich an die zuständigen Gesetze und Richtlinien. In der Tschechischen Republik handelt es sich vor allem um Kundmachung des Ministeriums für Verkehr Nr. 177/1995 und Richtlinien der Bahnverwaltungsgesellschaft (SŽDC) S3 und S4. Die wichtigsten Bedingungen betreffend der Y-Schwellen wurden in Kapitel 2.4 zusammengefasst.

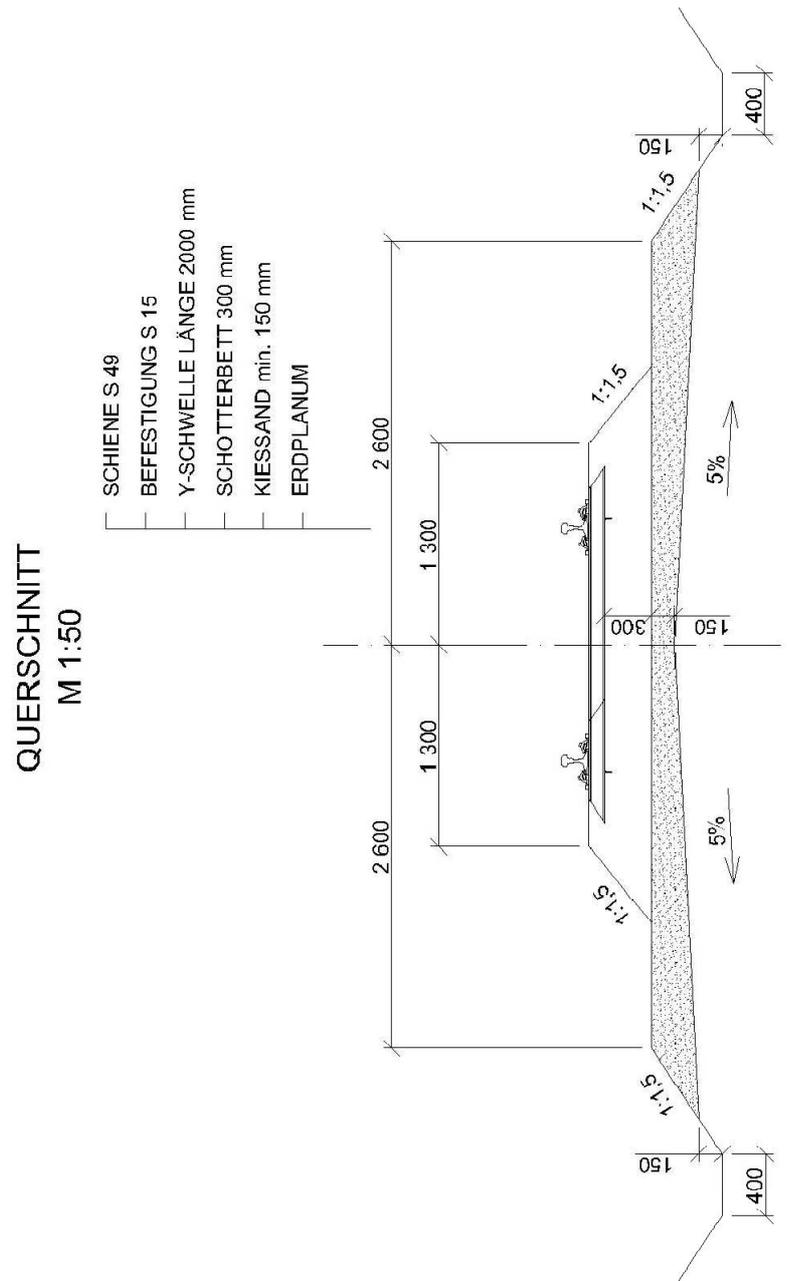


Abb. 4.1 Querschnitt im geraden Gleis der 6. Streckenklasse. Neubau mit minimalem Raumerfordernis nach S3. Als Schutzschicht wurde 150 mm Kiessand benutzt. Diese Schicht ist minimal und ist abhängig von den Gutachten auf Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit.

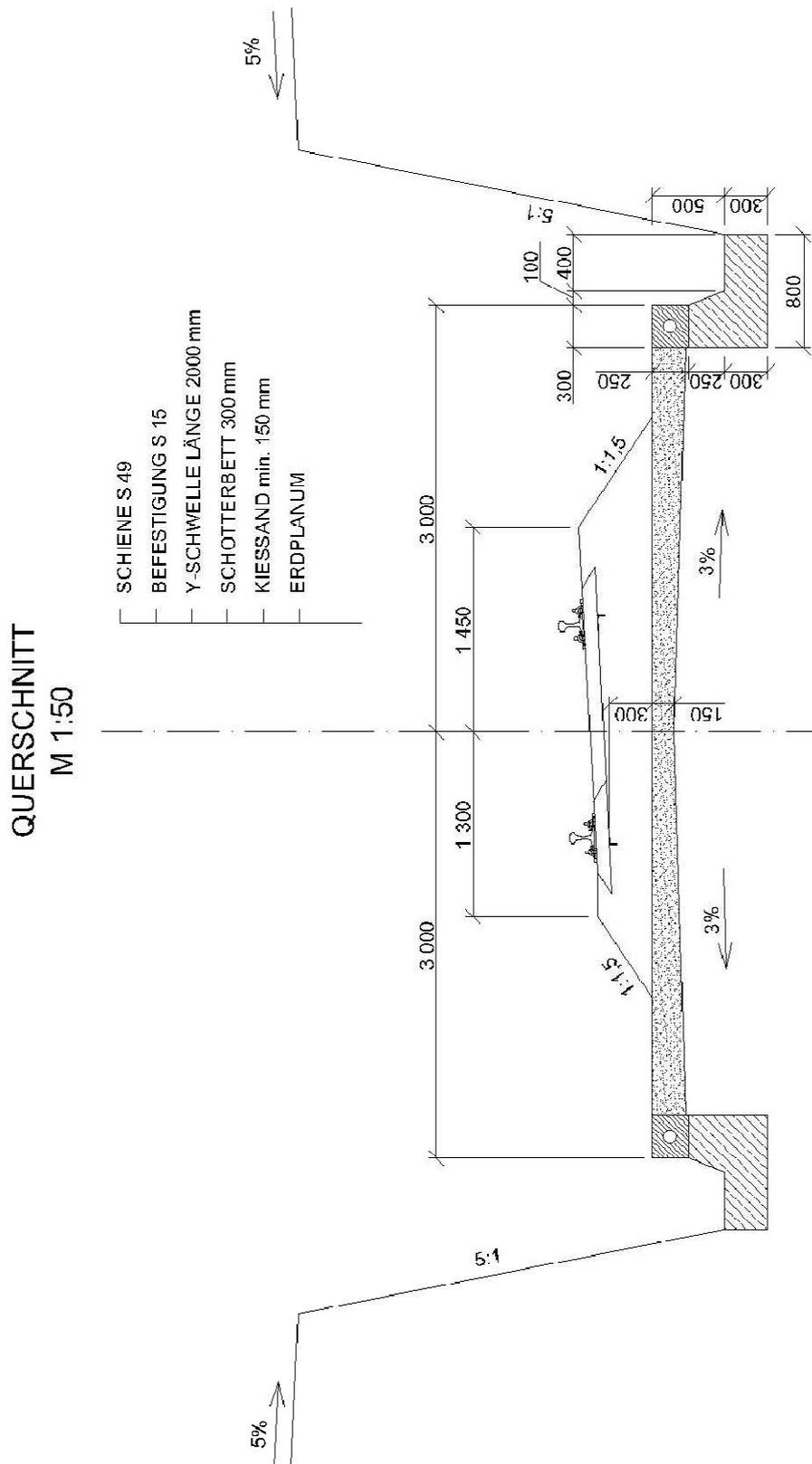


Abb. 4.2 Querschnitt im Bogen, Gleis der 6. Streckenklasse mit Überhöhung $p=80$ mm in einem wiederhergestellten Einschnitt. Als Schutzschicht wurde 150 mm Kiessand benutzt. Die Grabenumgrenzung wird aus dem Gussbeton gebaut.

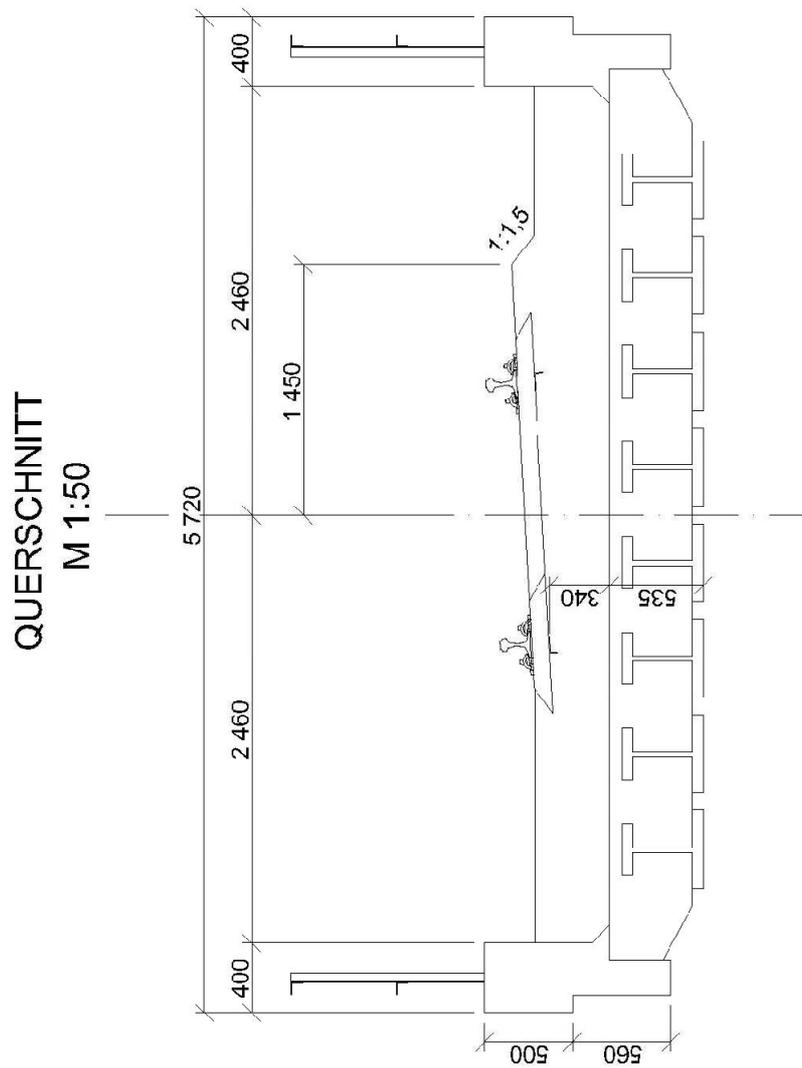


Abb. 4.4 Querschnitt einer eingleisigen Strecke auf der Brücke mit Schienenüberhöhung $p=80$ mm. Die Brückenkonstruktion besteht aus einer Betonplatte mit eingebauten Stahlprofilen. Die Schotterdicke unter der Schwellenunterkante wird um eine Reserve von 40 mm gegen die Beschädigung der Brückenisolation bei der mechanisierten Schotterreinigung erhöht.

5 Berechnung der horizontalen Gleislagestabilität im lückenlos verschweißten Gleis

In Hinsicht auf den höheren Querverschiebewiderstand sind Y-Schwellen für lückenlos verschweißtes Gleis in engen Bögen gut geeignet. Die gegenwärtigen Normen legen einen Mindestradius für Y-Schwellen mit erheblicher Reserve fest, so dass ihre vollen Möglichkeiten nicht ausgenutzt werden. Zum Beispiel gibt die Richtlinie S3 der Radius 200 m für Gleis mit offenem Schotterbett an. Im Streckennetz kommen oft Radien bis zu 150 m vor. Ob es möglich ist die Konstruktion mit Y-Schwellen auch in diesen Radien zuzulassen, ist Forschungsgegenstand mit Hilfe von Bemessungen auf den Prüfabschnitten und mathematischen Berechnungen. Das mathematische Modell und seine Verformungscharakteristik müssen der realen Konstruktion entsprechen. Für die Bewertung von lückenlos verschweißten Gleisen werden bisher verschiedene mathematische Modelle für die Berechnung der Gleislagestabilität in Abhängigkeit von der Gleistemperatur angewandt. Diese Verfahren basieren meist auf der Energiemethode nach Meier. In vielen Vergleichen mit praktischen Versuchsergebnissen hat dieses Verfahren seine Anwendbarkeit für gerade Gleisverläufe und Radien bis herab zu 250 m bewiesen. Bei Streckenverläufen mit engen Bogenradien von $r=200$ m und darunter liefert diese Methode nur mit Einschränkung realitätsnahe Ergebnisse. Hier verlieren die mathematischen Ansätze erster Ordnung zunehmend an Genauigkeit, da ein „Entspannen“ der Gleise aufgrund einer ungehinderten Bogenatmung nicht berücksichtigt wird. Zusätzlich wird als charakteristische Größe der Querverschiebewiderstand bei einer Querverschiebung von 2 mm festgelegt. Bei dieser Vorgehensweise wird der positive Effekt des „Verkeilens“ besonders bei Y-Stahlschwellen nicht berücksichtigt. Bei großen Verschiebungen werden systembedingte, zusätzliche Sicherheitsreserven somit nicht berücksichtigt. Für die Stabilitätsberechnung des lückenlosen Gleises wurde das FEM-Programm SCIA Engineer Version 2008.1 benutzt. Das Programm ermöglicht die Lösung mit der Hilfe der Finite Element Methode, und zwar nach der Theorie der ersten und zweiten Ordnung, das heißt nicht lineare Berechnungen. Die Bogenatmungslösung ist eine nicht lineare Berechnung, wo sich mit steigender Verformung die Schienenaxialkraft verringert.

5.1 Modellbeschreibung

Das Finite Element Model des Gleisrostes besteht aus einer Fachwerkstruktur. An den Koppelpunkten von Gleis und Schwelle werden Schnittknoten definiert und durch Balkenelemente verbunden. Diese Elemente beschreiben durch die Vorgabe von Materialeigenschaften in Verbindung mit Querschnitt, Flächenträgheits- und Torsionsmomenten das mechanische Verhalten des Gleisrostes. Es werden die Biege- und Torsionssteifigkeiten entsprechend den Herstellerangaben berücksichtigt. Die Balkenelemente der Schienen sind an deren Endknoten fest verbunden. Dadurch können

Kräfte und Momente an jeder Position und in allen räumlichen Richtungen übertragen werden. Die Verbindung von Schiene und Schwelle erfolgt mit Hilfe von Kopplungsgleichungen an den benachbarten Knoten. Hier werden die Verschiebungen von Schiene und Schwelle über deren Schnittpunkte gekoppelt. Ein Übertrag von Drehmomenten um die beiden horizontalen Achsen erfolgt ebenfalls. Die vertikale Drehsteifigkeit wird mit kontinuierlichen Schienen berücksichtigt. Die räumliche Anordnung der Knoten legt neben der Gleistrassierung auch die Spurweite und den Schwellenabstand fest. Die Schienen werden mit einem kontinuierlichen Stück modelliert. Die Schwellen werden, abhängig von deren Geometrie, durch mehrere Elemente modelliert. Die Knoten des Modells besitzen jeweils fünf Freiheitsgrade - Bewegung in zwei horizontalen und Rotation um alle drei Hauptachsen. Dadurch kann jede Verformungsfigur in der Gleisebene abgebildet werden. Eine horizontale Fixierung des gesamten Gleisrostes erfolgt ausschließlich durch Federn in Längs- und Querrichtung. Diese Federn stützen die Endpunkte der Schwellen und repräsentieren mit ihrem nicht linearen Verlauf die Eigenschaften des Schotteroberbaus. Die Simulation wurde für die drei meistgebrauchten Schienen in Europa durchgeführt. Das sind S 49, S 54, UIC 60. Der Auflagerabstand war 230/650/230 mm und das Schotterbett im stabilisierten Zustand. Die nicht lineare Berechnung ist aufgrund des Newton-Rhapson Verfahrens verlaufen. In Bezug auf Zeit, die für die Berechnung notwendig ist, wurde das Modell in fünf Schritten belastet. In jedem Schritt wurde 20 Iterationen durchgeführt. Diese Programmeinstellung hat ausreichend genaue Ergebnisse für alle Fälle ergeben.

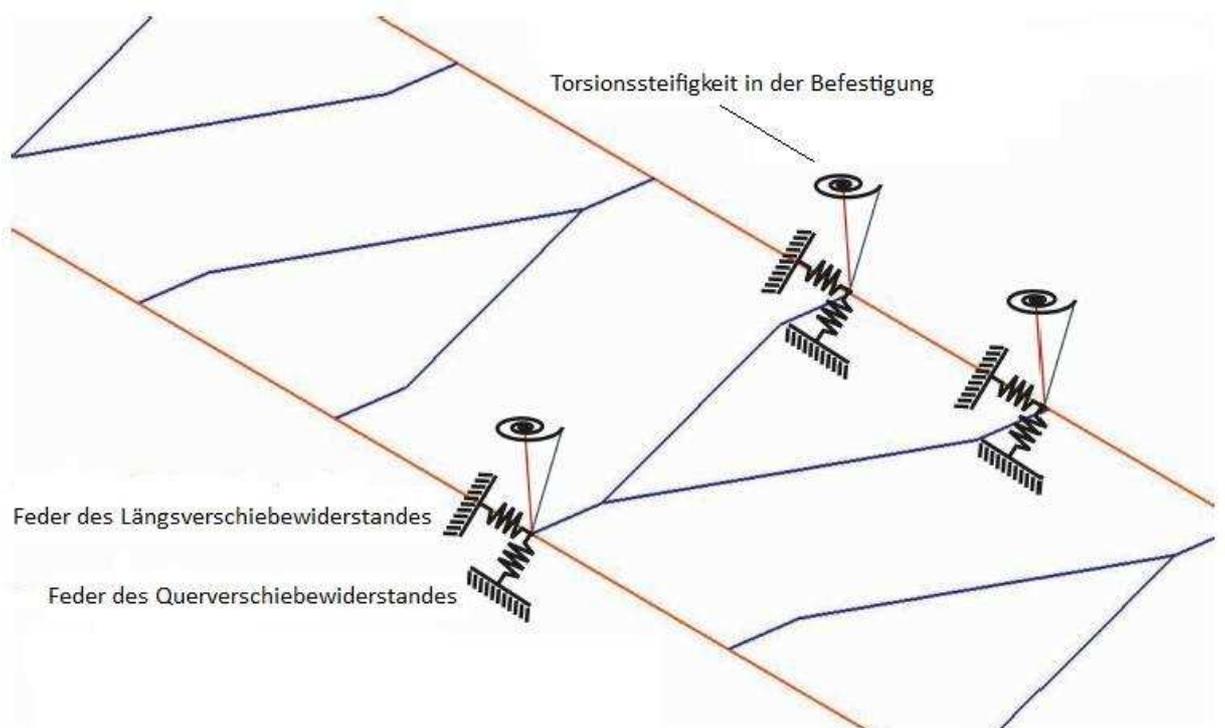


Abb. 5.1 Gleisrostmodell mit Unterstützelementen

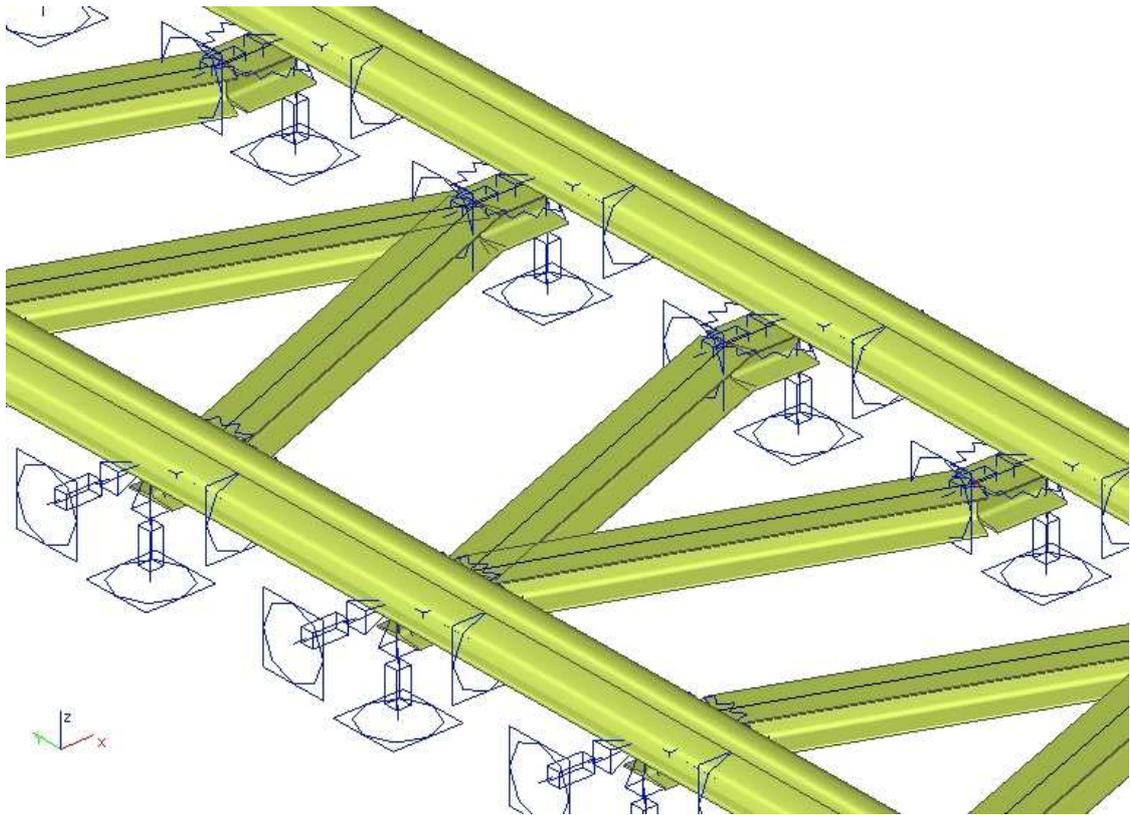


Abb. 5.2 Modelldetail im Programm SCIA Engineer

5.1.1 Unterstützung in der Radialrichtung

Als Eingangsparameter für die Unterstützung in der Radialrichtung wurde die Querwiderstandskurve vom Prüflabor TÜV Automotive GmbH bei der Berechnung verwendet. Diese Kurve zeigt den stabilisierten Schotterbettzustand, das heißt, dass das Schotterbett im Zustand nach Konsolidation unter Einfluss der dynamischen Betriebswirkung oder nach der Benutzung des dynamischen Stabilisators ist. Ein derartiger Querwiderstand ist ungefähr 1,8 mal grösser als im nicht stabilisierten Gleis. Der Widerstand auf jede Schwelle wurde gleichmäßig auf drei Unterstützungspunkte verteilt. Das bedeutet, dass die Querwiderstandskurve in jedem Knoten im Vergleich zur Kurve auf jede Schwelle nur ein Drittel so groß ist.

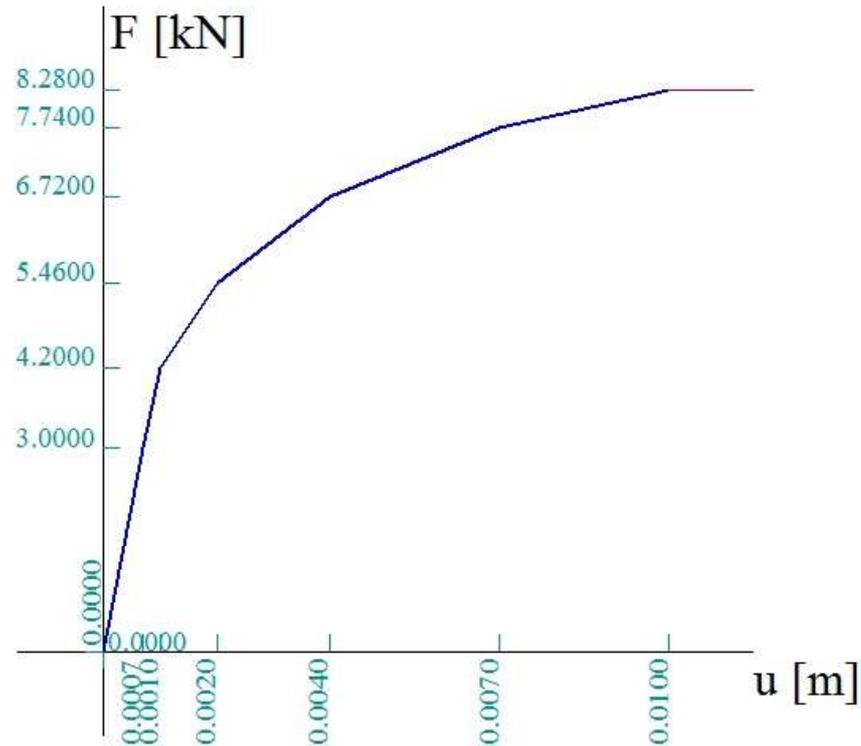


Abb. 5.3 Querwiderstandskurve auf jeden Knoten benutzt bei der Berechnung

5.1.2 Unterstützungspunkt in der Längsrichtung

Als Eingangsparameter für die Unterstützung in der Längsrichtung wurde auch die Längswiderstandskurve vom Prüflabor TÜV Automotive GmbH bei der Berechnung verwendet. Der Gesamtwiderstand auf jede Schwelle wurde auf drei Unterstützungsknoten gleichmäßig verteilt (siehe Abb. 5.4). Den Einfluss von dem Längsverschiebewiderstand auf die Horizontalstabilität kann man durch das Gleisverformungsverhältnis mit und ohne Berücksichtigung dieser Unterstützung ausdrücken. Zum Beispiel kommt das Verhältnis 0,97 für Schiene S 49 im Bogen mit Radius 180 m heraus. Das bedeutet, dass der Längswiderstand nur 3% der horizontalen Gesamtstabilität ausmacht und er ist nicht entscheidend für diese Beurteilung.

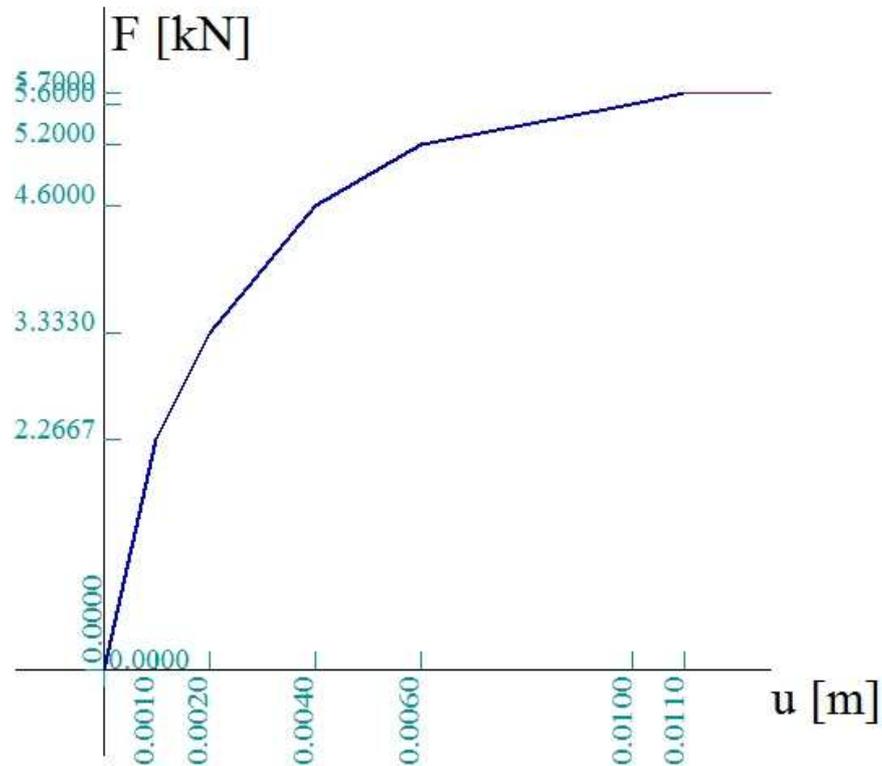


Abb. 5.4 Längswiderstandskurve auf jeden Knoten benutzt bei der Berechnung.

5.1.3 Modellierung des Verdrehwiderstandes

Als Eingangsparameter für die Unterstützung in der Befestigung wurde die Verdrehwiderstandskurve vom Prüflabor TÜV Automotive GmbH bei der Berechnung verwendet. Es handelt sich um die Innenbindung in der Konstruktion, die einen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit in der klassischen Fachwerkstruktur mit Diagonalen hat. Falls ein lockeres Gelenk in der Schiene-Schwelle Verbindung ist, dann wirkt diese Konstruktion als Fachwerk. Falls eine feste Bindung dort ist, dann wirkt diese Konstruktion als Rahmen. Im Gleisrost mit Y-Schwellen wird der Rahmen schon im Rahmen von einer Schwelle gebildet. Die Y-Schwellenarme bilden ein festes Rahmendreieck zusammen mit der Schiene, das das Verdrehen in der Befestigung selbst verhindert. Bei den durchgeführten Berechnungen mit freiem Gelenk und fester Verbindung wurde ein Unterschied von 0,04 % von den Gesamtverschiebungen festgestellt. Der Einfluss von diesem Widerstand ist also für die Gesamtverformungen unerheblich.

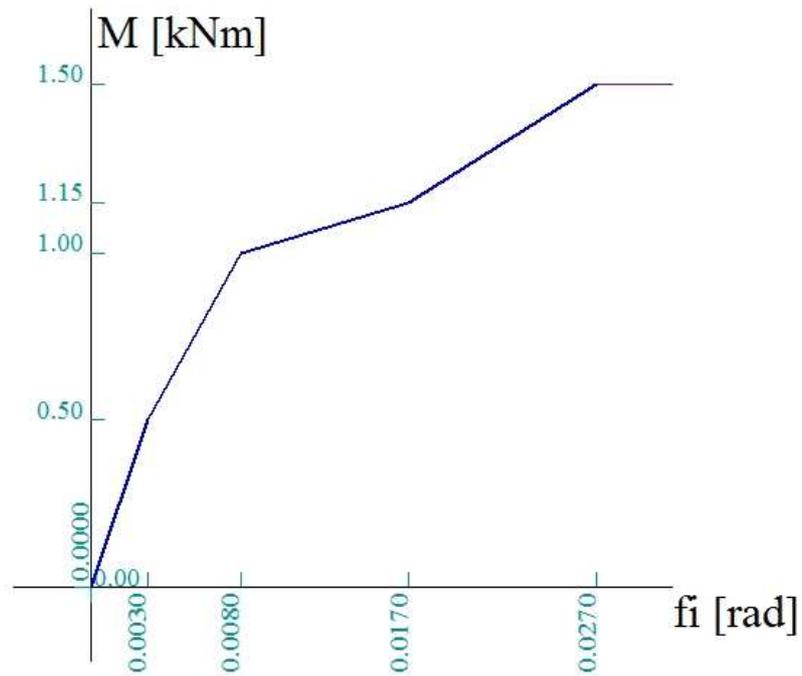


Abb. 5.5 Verdrehwiderstandskurve benutzt bei der Berechnung

5.1.4 Schwelle

Die Schwellen wurden aufgrund der wirklichen Abmessungen modelliert und entsprechend den Programmbedingungen angepasst. Der Eintrittsparameter ist das Profil IB 100-S1 mit allen technischen Daten wie vom Hersteller angegeben.

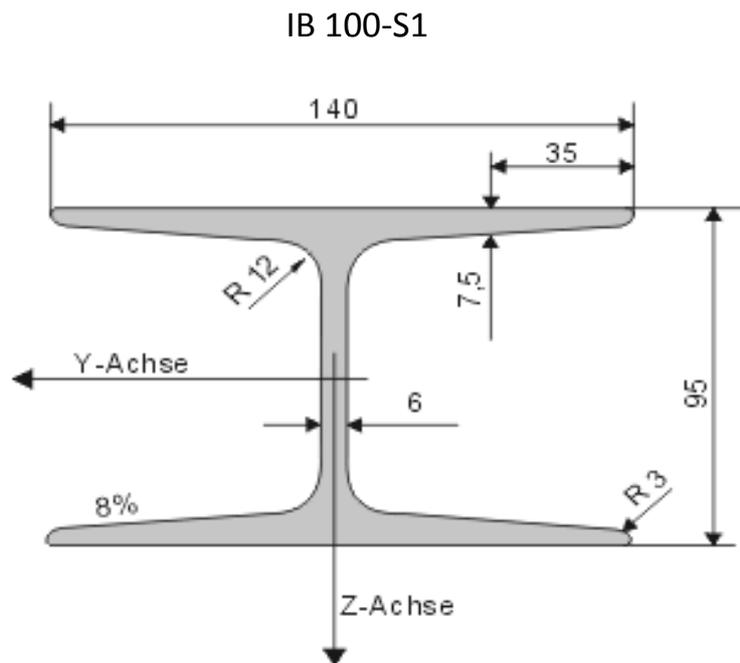


Abb. 5.6 Grundabmessungen von dem Schwellenprofil IB 100-S1

Höhe	159 mm
Querschnittsfläche	A=6977 mm ²
Gewicht	G=54,77 kg/m
Trägheitsmoment	J _x =2337,9 cm ⁴
Trägheitsmoment	J _y =417,5 cm ⁴
Widerstandsmoment	W _x =278,7 cm ³
Widerstandsmoment	W _y =59,6 cm ³

Tab. 5.3 Technische Daten der Schiene S 54

Höhe	172 mm
Querschnittsfläche	A=7670 mm ²
Gewicht	G=60,21 kg/m
Trägheitsmoment	J _x =3038,3 cm ⁴
Trägheitsmoment	J _y =512,9 cm ⁴
Widerstandsmoment	W _x =333,6 cm ³
Widerstandsmoment	W _y =68,4 cm ³

Tab. 5.4 Technische Daten der Schiene UIC 60

5.1.6 Modellverifikation

Das Gleismodell wurde so adaptiert, damit die Ergebnisse den real gemessenen Werten entsprechen. Für diesen Zweck wurde eine Kombinationskonstante ins Programm Scia Engineer eingeführt. Ihr Wert wurde beim Radius 180 m und $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ für die Schiene UIC 60 mit 5,5 mm und für die Schiene S 54 mit 3,5 mm festgestellt.²⁷

5.2 Auswertung für horizontale Gleisstabilität

5.2.1 Lastfall 1

Im diesen Fall wurde das Gleis ohne geometrische Fehler modelliert. Als Belastung hat Schienenerwärmung von $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ gewirkt. Das ist der höchste Wert unter Berücksichtigung von allen Sicherheitsreserven.

Ergebnis: Das Gleis atmet elastisch mit folgenden Radialverschiebungen in mm:

	Schiene		
	S 49	S 54	UIC 60
R=150m	5,4	6,7	9,0
R=180m	3,0	3,7	5,6
R=200m	2,1	2,8	3,9

Tab. 5.5 Die höchste Radialverschiebungen unter Belastung von $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

²⁷ Nach „4) Zeitschrift EI– Eisenbahningenieur (55) 12/2004, Bogenatmung und Gleislagestabilität des Y- Stahlschwellengleises in kleinen Halbmessern, Johannes Franz“

5.2.2 Lastfall 2

In diesem Fall wurde das Gleis mit Anfangsimperfektion von 15 mm von der projektierten Lage bei $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ modelliert. Die Imperfektion wurde durch eine Ersatzkraft wirksam in der Verformungsrichtung eingegeben. Die Ersatzkraft hat jene Größe, um die auftretende Verformung auszulösen. Nach der Richtlinie RVE 05.00.05 "Abnahme Oberbauarbeiten" ist eine maximale Abweichung von 15 mm von der projektierten Gleisachse im Bogen mit Halbmesser $< 300 \text{ m}$ zulässig. Weiter gilt, dass der Bogenpfeilfehler auf der Basis von 5 m den Wert 5 mm nicht überschreiten darf.

Ergebnis: Gleis weist erhöhte Deformationen an der Imperfektionsstelle auf.

	Schiene		
	S 49	S 54	UIC 60
R=150m	10,3	12,0	14,6
R=180m	6,6	7,8	10,2
R=200m	5,3	6,3	8,3

Tab. 5.6 Maximale Querradialverschiebungen in mm beim Bogenatmen von $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ mit Anfangsimperfektion 15 mm

	Schiene		
	S 49	S 54	UIC 60
R=150m	3,2	3,2	3,2
R=180m	2,5	2,5	2,5
R=200m	2,3	2,4	2,5

Tab. 5.7 Maximale Verschiebungsdifferenz in mm auf der Gleislänge von 5 mm beim Bogenatmen von $\Delta t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ mit Anfangsimperfektion 15 mm

	Schiene		
	S 49	S 54	UIC 60
R=150m	57	68	80
R=180m	47	55	66
R=200m	46	54	64

Tab. 5.8 Werte von Ersatzkräften in kN

	Schiene		
	S 49	S 54	UIC 60
R=150m	4,9	5,3	5,6
R=180m	3,6	4,1	4,6
R=200m	3,2	3,5	4,4

Tab. 5.9 Verschiebungsdifferenz zwischen erstem und zweitem Lastfall in mm

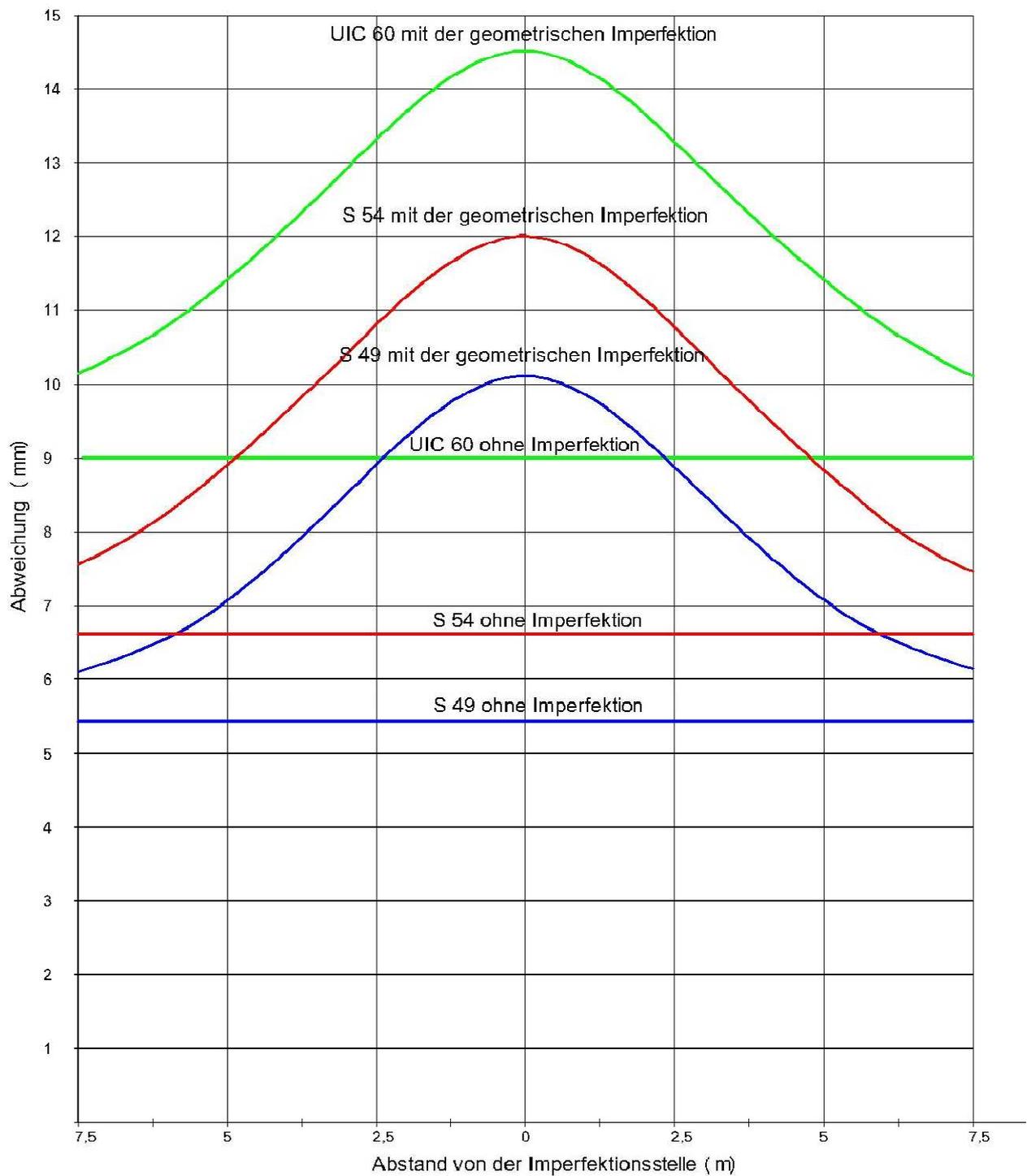


Abb. 5.10 Vergleichen von Verformungskurven beim Bogenatmen $r = 150\text{ m}$ nach der Schienenart

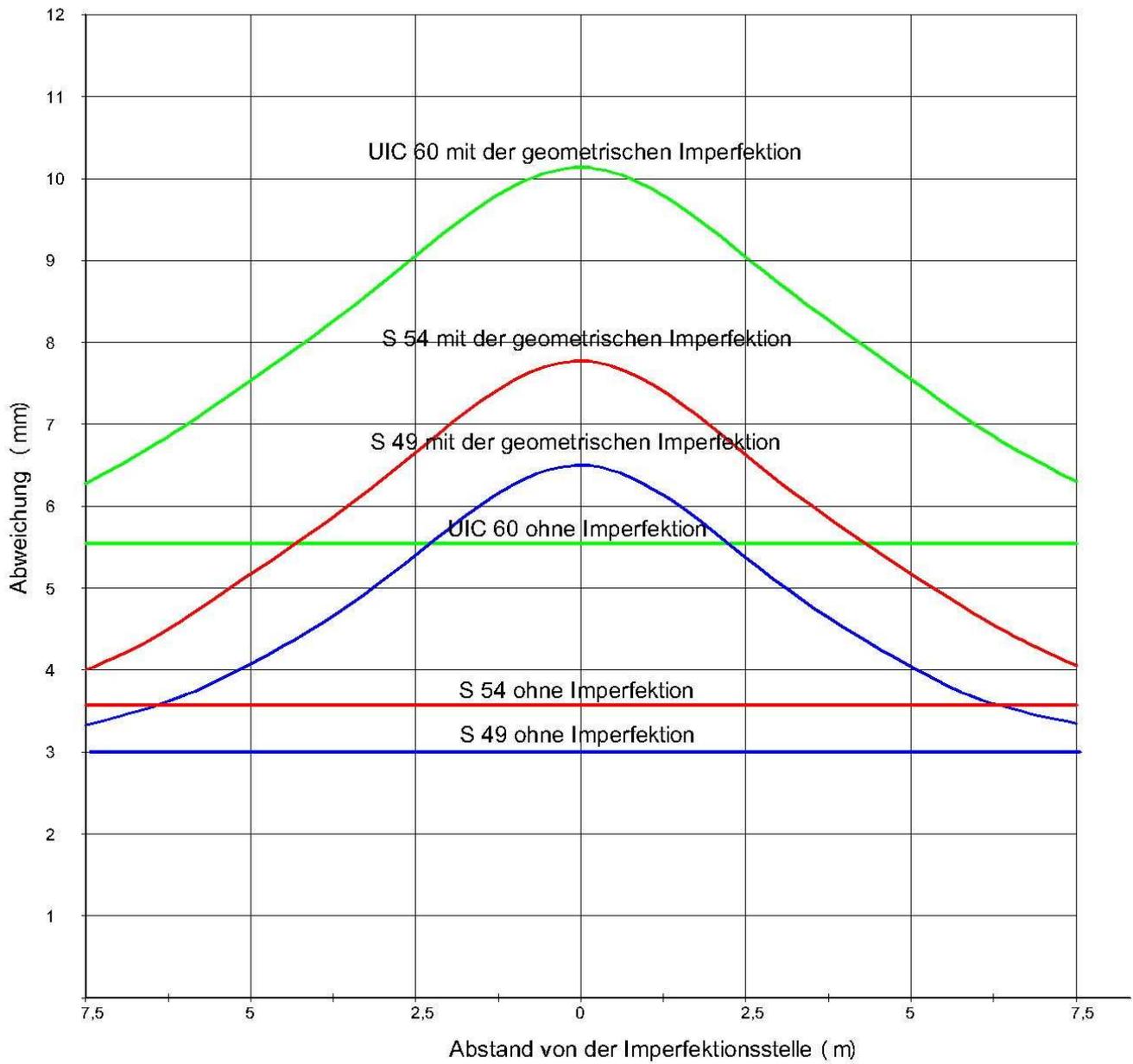


Abb. 5.11 Vergleichen von Verformungskurven beim Bogenatmen $r = 180\text{ m}$ nach der Schienenart

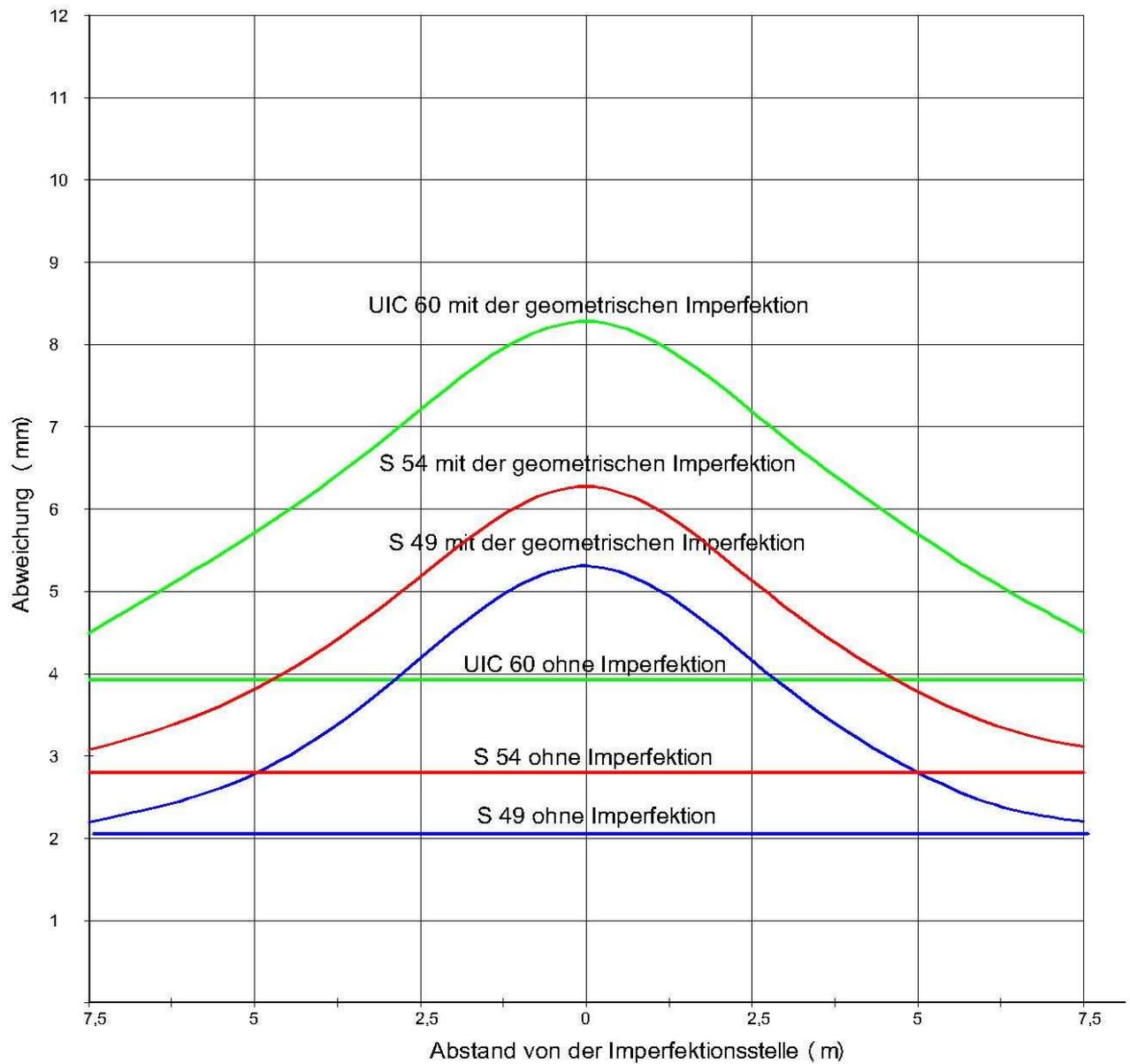


Abb. 5.12 Vergleichen von Verformungskurven beim Bogenatmen $r = 200\text{ m}$ nach der Schienenart

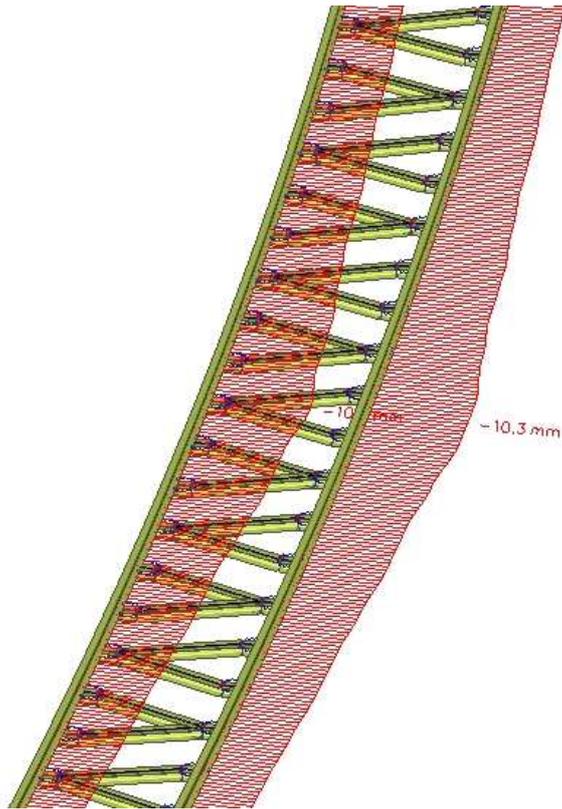


Abb. 5.13 Horizontale Gleisverformung an der Imperfektionsstelle für Schiene S 49 und $r = 150 \text{ m}$

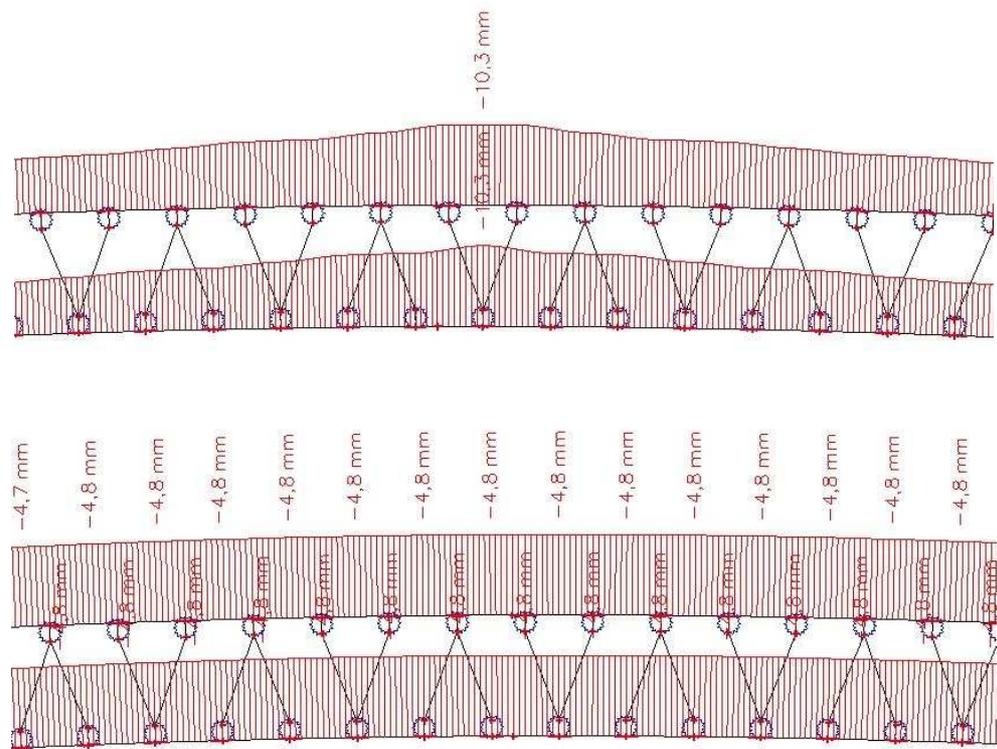


Abb. 5.14 Vergleich der Verformungswellen von zweitem und erstem Fall für 150 m und Schiene S49

5.3 Schlussfolgerung

Das Gleis ist in beiden Fällen stabil und zum Stabilitätsverlust kommt es auch nicht im zweiten Fall, wenn eine maximale zulässige geometrische Abweichung von 15 mm und die maximal mögliche klimatische Belastung wirken. Zum Stabilitätsverlust kommt es erst bei der Schienenerwärmung $\Delta t = 100 \text{ °C}$ und geometrischer Abweichung von 15 mm. Dann erreichen die Verformungen den Wert von einigen Zentimetern und das Finiteelementeverfahren beginnt zu versagen. Die Abweichungen mit Anfangsimperfektion sind höchstens um 40 % grösser als Abweichungen ohne Imperfektion. Dieser Unterschied erreicht höchstens den Wert 5,6 mm für Schiene UIC 60 im Bogen mit Radius von 150 m (siehe Tab. 5.9). Die Abschnittslänge, auf der es zur Gleisverwerfung gekommen ist, überschreitet 20 m nicht. Im Vergleich mit dem Bogenatmen in Liberec bei $r = 150,5 \text{ m}$, wo 2 mm Gleisverschiebung bei der Erwärmung um 23 °C abgemessen wurden, gibt es eine Verschiebung zwischen 0,9 mm ohne und 3,7 mm mit Imperfektion für den modellierten Bogen bei denselben Bedingungen. Auf dem Gleisabschnitt Zwiesel-Grafenau im Bogen mit Radius 178,5 m mit Schiene S 54 und Erwärmung um 46 °C wurde eine Verschiebung von 3,9 mm abgemessen.²⁸ Bei der Modellerwärmung um diese Temperatur ergibt sich eine Verschiebung von 3,1 mm ohne und 7,1 mm mit Imperfektion. Anhand dieser Fälle kann man beweisen, dass der modellierte Bogen den realen gemessenen Werten entspricht, weil die Verformung vom wirklichen Bogen im Ergebnisbereich des modellierten Bogens liegt. Man kann auch ableiten, dass der wirkliche Bogen bestimmte Abweichungen von der idealen Konstruktion aufweist. Die Abweichungen verursachen höhere Verformungen. Insgesamt kann man schließen, dass das Gleis mit Y-Schwellen sehr gute Stabilitätseigenschaften aufweist.

²⁸ Nach „6) Projektbericht zu Berechnung von horizontalen Gleisverschiebungen bei Gleisverläufen mit engen Bögen, TÜV Automotive GmbH, München 2003“

6 Berechnung der vertikalen Tragfähigkeit des Y-Schwellengleises

6.1 Modellbeschreibung

Die Stabilitätsberechnung wurde auf dem geraden Gleisabschnitt durchgeführt. Ob ein Bogen vorhanden ist, hat keine Auswirkung auf diese Tragfähigkeit. Die modellierten Schwellen hatten die gleiche Lagerfläche wie wirkliche Schwellen. Insgesamt wurden drei Konstruktionen begutachtet:

1. Y-Schwelle mit einer Länge von 2000 mm mit Auflagerabstand 230/650/230 mm, Achsenweite 1320 mm
2. Y-Schwelle mit einer Länge von 2000 mm mit Auflagerabstand 230/600/230 mm, Achsenweite 1245 mm
3. Y-Schwelle mit einer Länge von 2200 mm mit Auflagerabstand 230/550/230 mm, Achsenweite 1170 mm

Als Belastung wurden zwei Kräfte als Achslast wirksam. Für die ersten zwei Konstruktionen waren es 225 kN pro Achse, für die dritte 250 kN pro Achse. Es handelt sich nämlich um Y-Schwellen entwickelte gerade für diese Belastung. Die Schwellen wurden über die ganze Lagerfläche unterstützt. Die Auflagerung wird als nicht lineare Bodenfeder simuliert, entsprechend den Eigenschaften des verdichteten Gleisbettes. Nach den Streckenparametern wird ein minimaler statischer Verformungsmodul E_{pp} verlangt. Seine Werte sind in Tab. 6.1.

Streckenart	Min. E_{pp} (MPa)
Hauptgleise $120 \text{ km/h} < V \leq 160 \text{ km/h}$	70
Hauptgleise und Überholungsgleise $V \leq 120 \text{ km/h}$	60
Hauptgleise und Überholungsgleise auf den Regionalstrecken	50

Tab. 6.1 Mindestwerte von dem statischen Verformungsmodul nach der Streckenart

6.2 Auswertung

Die Achsenkräfte wurden auf die Konstruktion so aufgestellt, um eine ungünstigste Belastung zu verursachen, die sich in der Mitte der Spannweite des Durchlaufträgers ergibt. Der Gleisrost hat zwei solchen Lagen. Die Lage A ist direkt in der Schwellenachse. Die Lage B befindet sich in der Mitte der größten Spannweite zwischen Schwellen. Bei beiden Lagen ist eine Kraft immer über einem Auflagerpunkt und die zweite in der Mitte der Spannweite.

6.2.1 Fall 1

Diese Auswertung ist für die Konstruktion mit Auflagerabstand 230/650/230 mm und Achsenbelastung von 225 kN, Schiene S 49, S 54 und Verformungsmodul $E_{pp} = 50 \text{ MPa}$. Die folgenden Bilder zeigen Schienen- und Schwelkenverformung unter der Achsenbelastung.

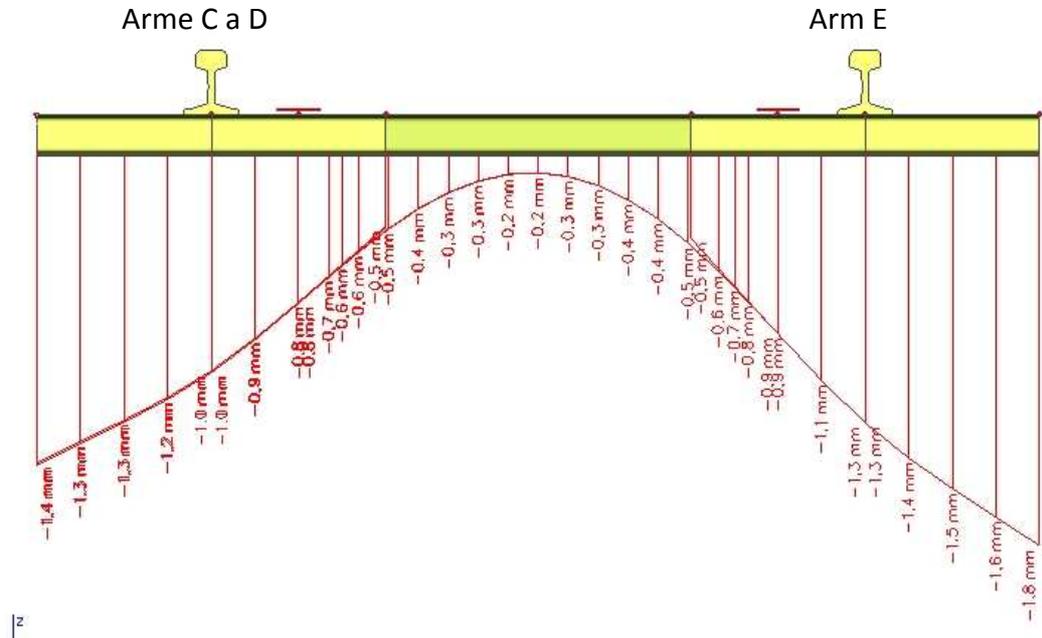


Abb. 6.3 Schwelkeneinsenkung für Schiene S 49 in der Lage A

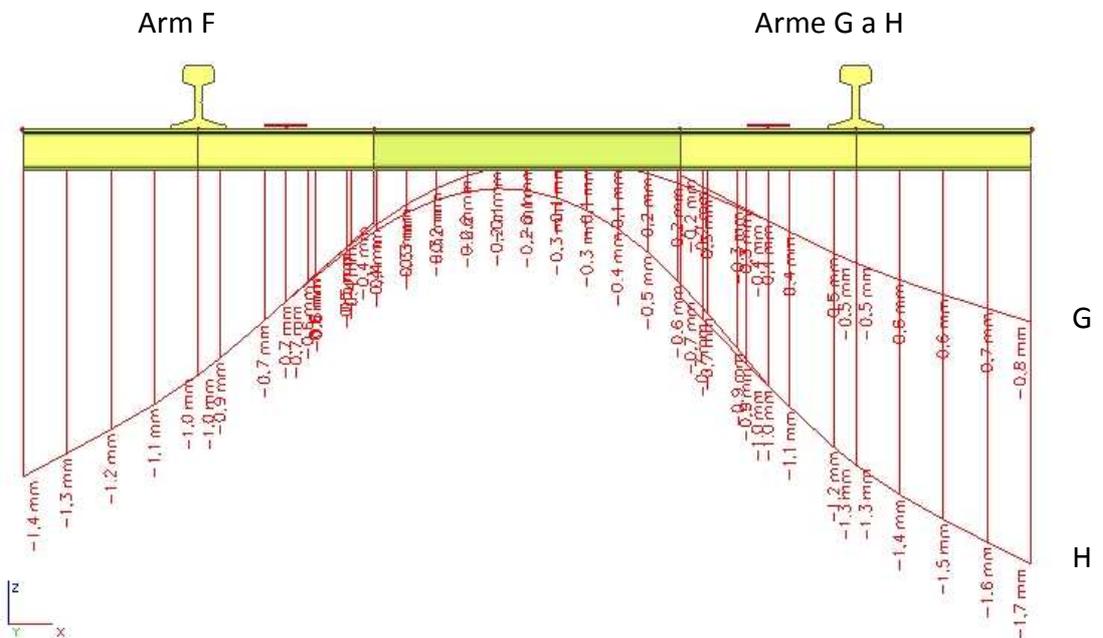


Abb. 6.4 Schwelkeneinsenkung für Schiene S 49 in der Lage B

6.2.2 Fall 2

Diese Auswertung ist für die Konstruktion mit Auflagerabstand 230/600/230 mm und Achsenbelastung von 225 kN, Schiene S 49, S 54 und Verformungsmodul $E_{pp} = 50 \text{ MPa}$. Die folgenden Bilder zeigen Schwellenverformung unter der Achsenbelastung.

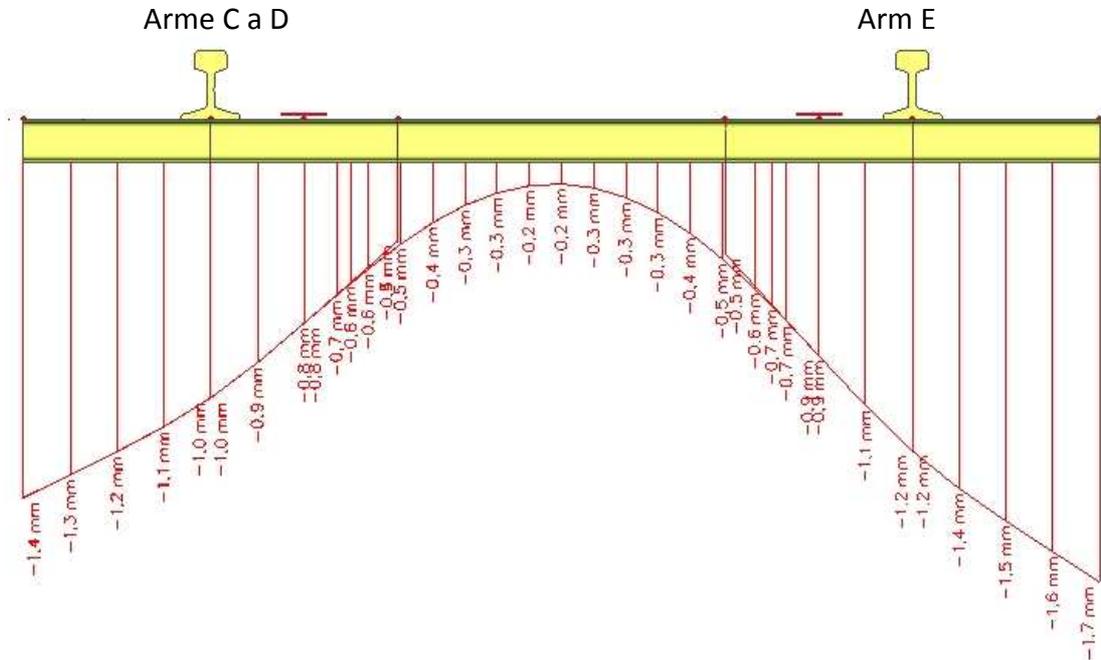


Abb. 6.7 Schwelleneinsenkung für Schiene S 49 in der Lage A

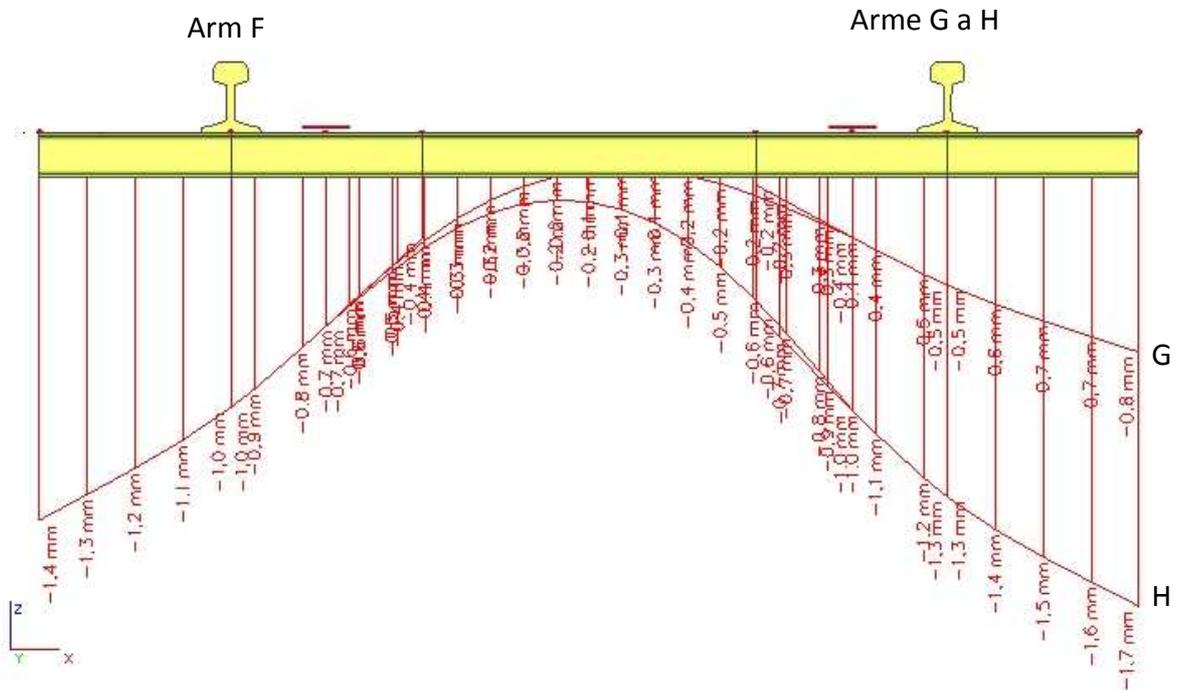


Abb. 6.8 Schwelleneinsenkung für Schiene S 49 in der Lage B

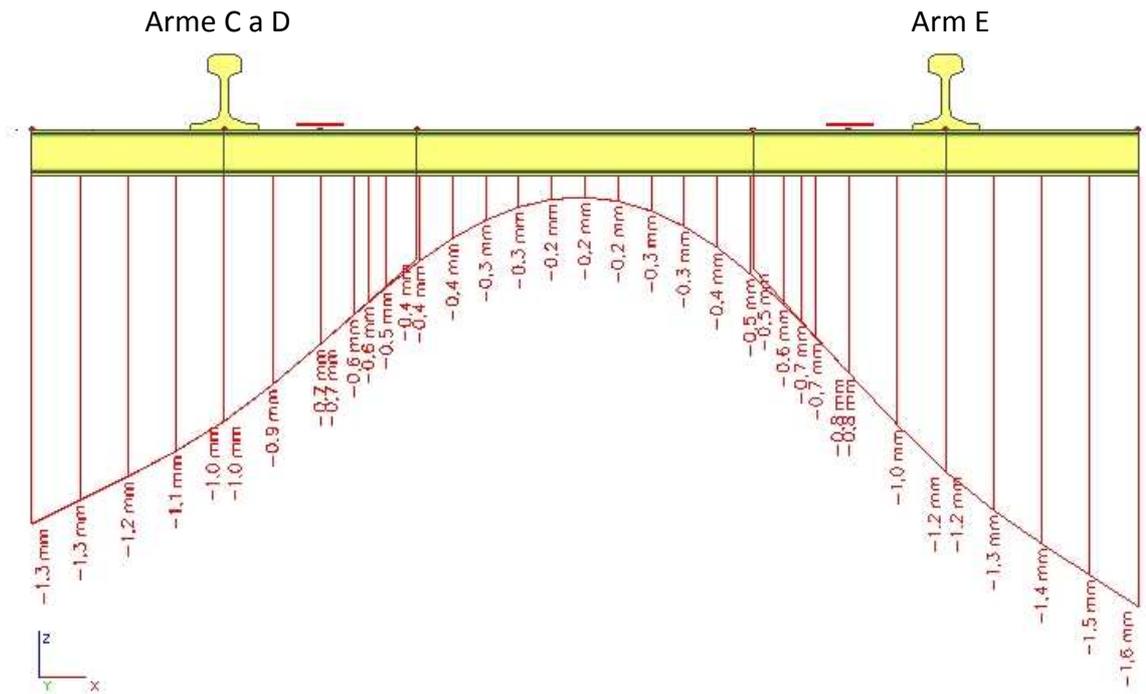


Abb. 6.9 Schweleneinsenkung für Schiene S 54 in der Lage A

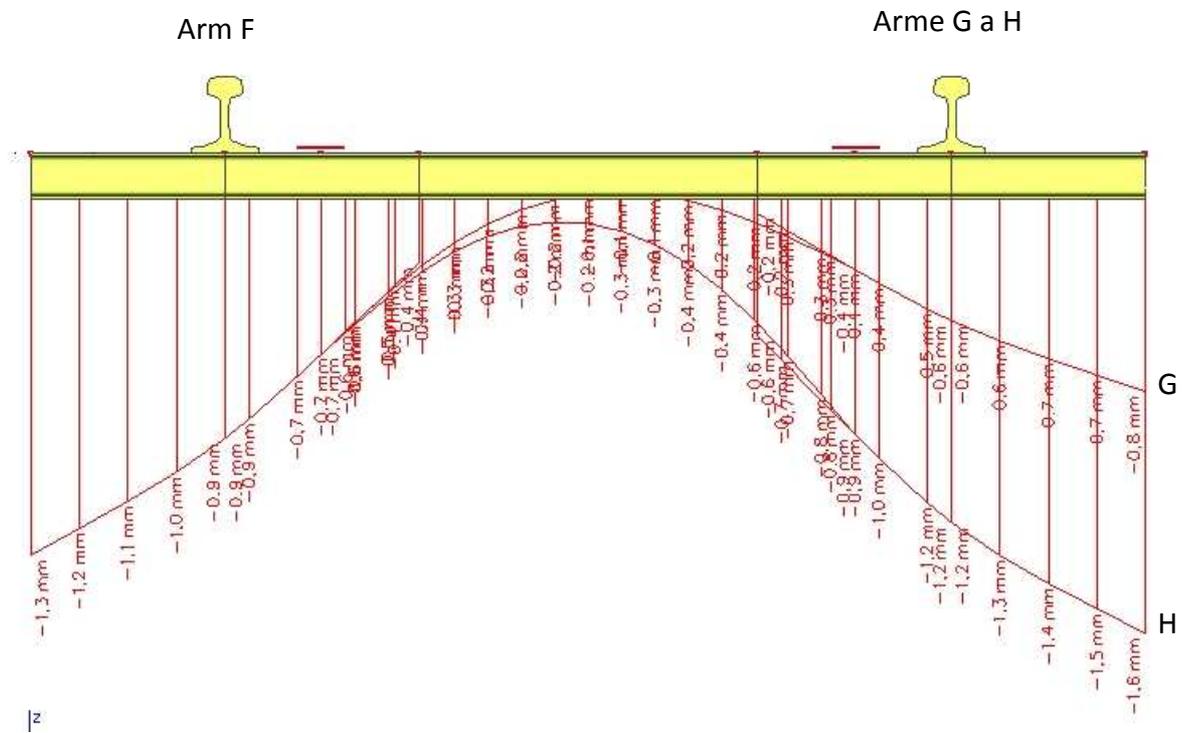


Abb. 6.10 Schweleneinsenkung für Schiene S 54 in der Lage B

6.2.3 Fall 3

Diese Auswertung ist für die Konstruktion mit Achsenbelastung von 250 kN, Schiene UIC 60 und Verformungsmodul $E_{pp} = 60 \text{ MPa}$. Die folgenden Bilder zeigen Schwellenverformung unter der Achsenbelastung.

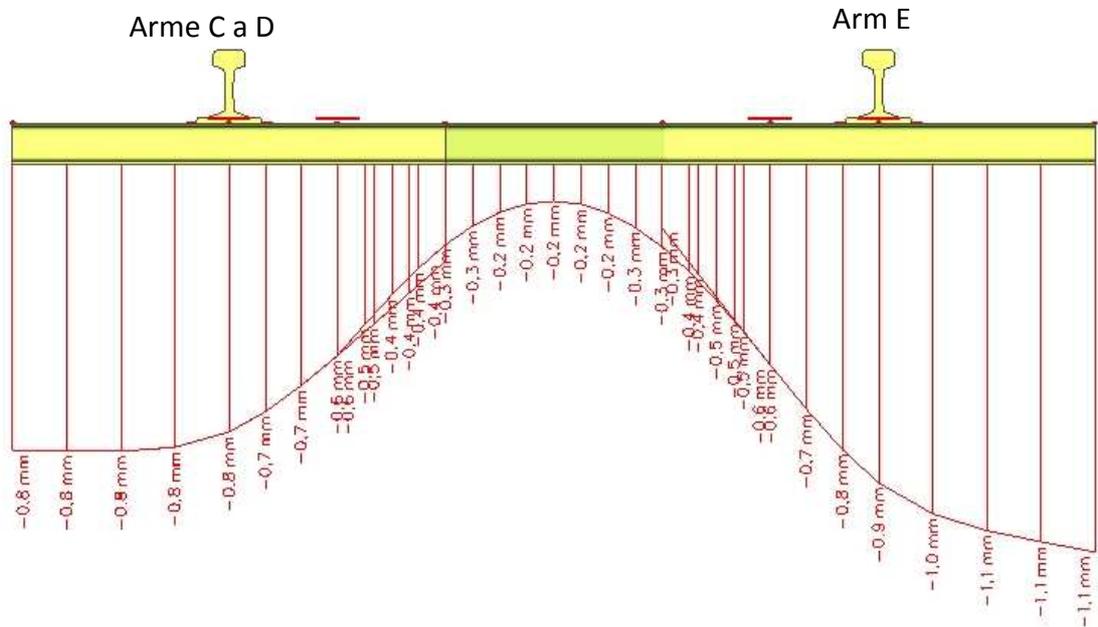


Abb. 6.11 Schwelleneinsenkung für Schiene UIC 60 in der Lage A

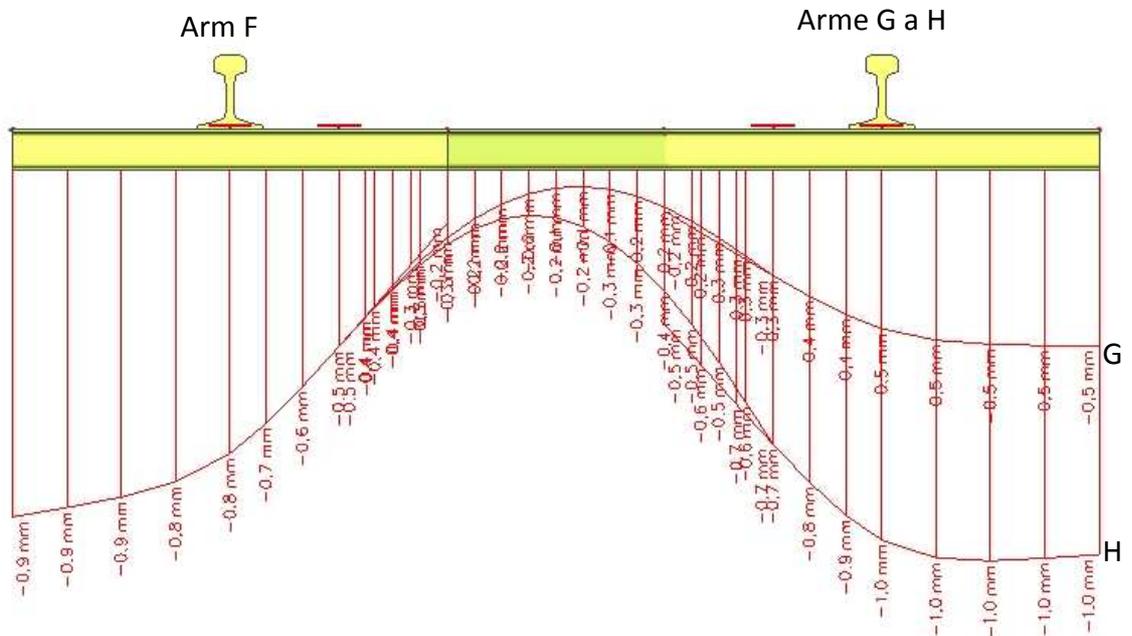


Abb. 6.12 Schwelleneinsenkung für Schiene UIC 60 in der Lage B

6.3 Schlussfolgerung

Im ersten und zweiten Fall unterscheiden sich die Einsenkungen bei der Verwendung der gleichen Schiene max. um 8 %. Das bedeutet, dass die Konstruktion mit größeren Auflagerabständen 230/650/230 mm weniger tragfähig ist als die Konstruktion 230/600/230 mm. Die maximale Schieneneinsenkung hat sich für Achsenlage A ergeben und ist nur um 0,1 mm größer als über dem Unterstützpunkt. Die Einsenkungen für Lage B sind gleich. Der Unterschied ist jedoch in der Schwellendurchbiegung. Die Schwelle in der Lage A wurde gleichmäßig gebogen, aber in der Lage B wurde Schwellenverwindung vorgefunden. Bei der Benutzung des größeren Schienenprofils verteilt sich die Belastung mehr auf Nachbarschwellen, aber diese Wirkung ist unerheblich. Die Verformungen im ersten und zweiten Fall sind gleichwertig auch für verschiedene Schienen. Nur die dritte Konstruktion ist steifer. Das wird durch kleineren Auflagerpunktraum, Schiene UIC 60 und tragbareren Unterbau verursacht. Diese Kombination weist auch bei der höheren Belastung kleinere Verformungen auf, als die Konstruktionen 1 und 2. Das bedeutet, dass sie mehr überdimensioniert ist.

7 Zusammenfassung

Die Verwendung der Y-Schwellen in engen Gleisbögen erfolgt vereinzelt wegen ihrer günstigen Eigenschaften. Vor allem der höhere Querverschiebewiderstand programmiert ihren Einsatz in Bögen mit kleinem Radius vor. Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten kann man die Benutzung der Y-Schwellen im lückenlos verschweißten Gleis bis Mindestradius 150 m für alle drei untersuchten Schienenarten vorsehen. In Bezug darauf, dass so kleine Radien überwiegend auf den Regionalstrecken vorkommen, zieht man den Y-Schwelleneinsatz mit Auflagerabstand 230/650/230 mm in der Kombination nur mit Schienen S 49 und S 54 in Betracht. Auf den Strecken mit Achsenbelastung von 22,5 t kann man Schiene UIC 60 in der Kombination mit dem Auflagerabstand 230/600/230 mm benutzen. Abgesehen von den günstigen technischen Eigenschaften werden auch ökonomische Aspekte berücksichtigt. Der Einsatz der Y-Schwellen verursacht zwar höhere Anschaffungskosten, scheint jedoch unter Berücksichtigung der gesamten Lebensdauer und der Beseitigungskosten insgesamt mit anderen Schwellenarten vergleichbar. Der wichtige Blickpunkt für die Y-Schwellenbewertung ist auch ein Beitrag zum Umweltschutz, auf dem zurzeit großes Augenmerk liegt. Y-Schwellen sind nämlich im Vergleich zu anderen Schwellen zu hundert Prozent recycelbar. Insgesamt haben sich die Y-Schwellen als Alternative bei der Auswahl für Gleiskonstruktionen etabliert.

8 Literaturquellen

- 1) Y-Stahlschwellenoberbau, Prof. Dr. Günther Führer, Prof. Dr. Karl Endmann, Prof. Dr. Günter Berg, Hestra-Verlag Darmstadt 1994
- 2) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, Y-Stahlschwelle, Karl Endmann
- 3) Zeitschrift EI – Eisenbahningenieur (53) 4/2002, Y-Stahlschwellen-Verlegung im Fließbandverfahren, Ulrich Bareiß
- 4) Zeitschrift EI– Eisenbahningenieur (55) 12/2004, Bogenatmung und Gleislagestabilität des Y-Stahlschwellengleises in kleinen Halbmessern, Johannes Franz
- 5) Technischer Zulassungsbericht für die in Eisenbahnschottergleisen einbaubaren Y-Stahlschwellen mit Schienenbefestigung S 15, T. U. W. B. Lehrstuhl für Straßen- und Eisenbahnbau, Budapest 2003
- 6) Projektbericht zu Berechnung von horizontalen Gleisverschiebungen bei Gleisverläufen mit engen Bögen, TÜV Automotive GmbH, München 2003
- 7) Zulassung 201215 betreffend der Y-Stahlschwellen mit Schienenbefestigung S 15 in Schottergleisen, Bundesamt für Verkehr (BAV), Bern 2000
- 8) Vorschrift SŽDC S3 Eisenbahnoberbau, Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, Praha 2008
- 9) Richtlinie der Österreichischen Forschungsgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen (RVE 05.00.XX, RVE 09.00.XX), Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, Wien 2006
- 10) www.oberbauhandbuch.de
- 11) Präsentation Einsatz von Y-Stahlschwellen bei der DB AG, ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, 2005
- 12) Doktorarbeit – Untersuchung der Y-Schwellen im Oberbau auf der Haupt- und Regionalstrecken in der Tschechischen Republik, Ing. Aleš Suchánek, Praha 2008
- 13) www.kzc.cz
- 14) Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Lothar Fendrich, Springer 2006
- 15) Handbuch Gleis, Dr. Bernhard Lichtberger, Tetzlaff Verlag 2003 Hamburg