

Gleisverfügbarkeit, Fahrbahnzustand und wirtschaftlicher Unterhalt

# Eine komplexe Herausforderung

Die Minimierung der Unterhalts- und Erneuerungskosten von Gleisanlagen ist eine komplexe Herausforderung für alle Infrastrukturbetreiber. Die Arbeiten müssen so auf die Nutzung der Anlagen abgestimmt sein, dass sowohl langfristig als auch kurzfristig die Verfügbarkeit möglichst hoch ist. Deshalb ist die Prognose der Zustandsentwicklung der einzelnen Fahrbahnkomponenten ein zentrales Element in der Festlegung von Unterhalts- und Erneuerungsstrategien.

Von Christoph Marti, Thomas Herrmann und Jost Lüking\*

Die starke Fahrplanverdichtung in der jüngeren Vergangenheit hat den Aspekt «Verfügbarkeit der Gleisinfrastruktur» stark in den Vordergrund gerückt. Die laufende Steigerung der Zugfahrleistung und die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit erfordern immer häufigere Unterhalts- und Erneuerungsmassnahmen, weil der stetig zunehmende Verkehr zu einem erhöhten Verschleiss der Schienenanlagen führt. Da in einem Schienenabschnitt nicht gleichzeitig Unterhaltsmassnahmen durchgeführt und Personen oder Güter transportiert werden können, entsteht ein Ressourcenkonflikt bezüglich der Benützung der Anlagen. Der Druck auf die Infrastrukturbetreiber, ihre Unterhaltsarbeiten effizienter, flexibler und möglichst ohne Kostensteigerungen durchzuführen steigt, zumal die Zeitfenster für Unterhalt- und Erneuerungsarbeiten durch den

vermehrten Trassenverkauf immer kürzer werden. Infrastrukturmanager stehen deshalb zunehmend vor folgender Herausforderung: Wie lassen sich die Kosten für Unterhalt und Erneuerung minimieren und gleichzeitig die Gleisverfügbarkeit möglichst hoch halten, damit ein Maximum an Trassen den Eisenbahnverkehrsunternehmen verkauft werden kann? Wann müssen bauliche Massnahmen ausgeführt werden? Und wie gross wird der Nutzen gegenüber dem finanziellen Aufwand eingeschätzt?

Die Unterhaltsmassnahmen können präventiv oder reaktiv erfolgen. Präventiver Unterhalt wird durchgeführt, bevor die Verfügbarkeit des Gleises durch Schäden und Abnutzung reduziert wird; reaktiver Unterhalt erst bei Schäden, die den Zugverkehr einschränken – zum Beispiel, wenn die Sicherheit nicht mehr ausreichend gewähr-



Beschädigte Schiene mit Abplatzungen am Schienenkopf.

leistet werden kann. Eine hohe Verfügbarkeit der Gleise gewährleistet eine sichere Fahrt unter Einhaltung der geplanten Fahrzeiten. Sicherheit aus Optik der Gleisinfrastruktur heisst einerseits kein Versagen der Tragkonstruktion unter den einwirkenden Kräften des fahrenden Zuges und andererseits keine Verformung des Gleises, die zu Zugsentgleisungen führen kann.

## Entwicklung von Unterhalts- und Erneuerungsstrategien

Die Eisenbahnunternehmen in der Schweiz und in den Nachbarländern führen ihre Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten nach unterschiedlichen Strategien aus, die aber letzten Endes auf den beiden gegensätzlichen Methoden proaktive und reaktive Unterhalt- und Erneuerungsstrategie beruhen: Regelmässiger, geplanter Unterhalt mit



**Gleisvermessung der ÖBB mittels EM-SAT 120. Mittels Laser präzise und gleichzeitige Vermessung von Gleishöhe, Richtung, Spurweite und Überhöhung. Durch den Abgleich der Messdaten mit der Sollgeometrie werden die Steuerdaten für die Gleisstopfmaschine ermittelt und per Funk oder Diskette übergeben.**

laufender Durchführung der Arbeiten gegenüber Unterhalt bei Bedarf, sobald ein als kritisch definierter Zustand erreicht wird. Bei beiden Strategien ist deshalb die Kenntnis über Zustände und Zustandsverläufe der einzelnen Komponenten des Gleises von zentraler Bedeutung<sup>1</sup>. Diese Zustandsänderungen sind nicht linear: Grösser werdende Verformungen beschleunigen die Abnutzung überproportional. Mit rechtzeitig durchgeführten Unterhaltmassnahmen wird diesem Prozess entgegengewirkt, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer und somit zur Reduktion der Unterhalts- und Erneuerungskosten führt.

Bestimmend für Zustandsverlauf und Lebensdauer der einzelnen Gleiskomponenten sind einerseits die einwirkenden Kräfte durch die verkehrenden Züge und andererseits die klimatischen Einflüsse. Bei stark befahrenen Strecken

wird in der Regel die Abnutzung durch die fahrenden Züge bestimmend für die Lebensdauer. Um möglichst lange eine adäquate Gleisqualität halten zu können, werden Starklaststrecken meistens proaktiv unterhalten und Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten in den kurzen Betriebspausen ausgeführt. Auf Schwachlaststrecken werden oft die klimatischen Einflüsse bestimmend für die Lebensdauer, weshalb die Vorteile von regelmässigem Unterhalt beschränkt sind. Deshalb werden diese Strecken meist reaktiv unterhalten. Damit die Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten den fahrplanmässigen Zugsverkehr möglichst nicht behindern, werden sie häufig in Betriebspausen beziehungsweise Schwachlastzeiten (also meist nachts) durchgeführt. Für umfangreichere Erneuerungsarbeiten werden Strecken auch temporär gesperrt. Falls während dieser Arbeiten planmässige Zugverbindungen gestrichen wer-

den müssen, kommen zu den Einnahmeeinbußen beim Trassenverkauf auch Zusatzkosten für Transportersatz – zum Beispiel mit Bussen – hinzu. Dem stehen die Kosten für die geplanten Unterhalts- und Erneuerungsmassnahmen gegenüber, die umso höher ausfallen, je kürzer die verfügbaren Zeitfenster für die Unterhaltsarbeiten sind.

Bei der Wahl der geeigneten Unterhaltsstrategie für einen Streckenabschnitt spielt darum die Fahrplandichte (Anzahl, Art und Gewicht der Züge) eine entscheidende Rolle. Damit lässt sich die Alterung der Anlage abschätzen und daraus ein Unterhaltsbedarf ableiten. Eine erfolgreiche Umsetzung der Unterhalts- und Erneuerungsstrategie setzt eine netzweite Analyse des Unterhaltsbedarfs nach dem sogenannten Top-down-Prinzip voraus, unter Einbezug von Betriebspausen, Schwachlastzeiten, Möglichkeiten



für temporäre Streckensperrung bis hin zur Ausschöpfung von Zeitreserven, die für temporäre Streckenbeanspruchungen für Unterhaltsarbeiten im Fahrplan vorgesehen sind<sup>2</sup>.

### Was bestimmt die Abnutzung des Gleises?

Für die Erstellung von Zustandsprognosen für das Gleis müssen die verschiedenen Abnutzungseffekte quantifiziert und in einer Zustandskennzahl zusammengeführt werden.

Das Gleis wird in erster Linie durch die fahrenden Züge beansprucht. Abnutzung des Schienenkopfes, zum Beispiel in Form von Dellen und Rillen in der Schienenlauf­fläche, führen zu sich weiter ausdehnenden plastischen Verformungen des Schienen­profils und damit erhöhter Materialbeanspruchung, was zum Beispiel zu Abplatzungen führt. Die Unebenheiten werden durch Schleifen des Profils behoben. Diese Massnahme kann nur begrenzt durchgeführt werden, da bei jedem Schleifvorgang Stahl abgetragen wird.

Die Schottersteine schleifen sich unter den Lastwechsel gegenseitig ab, was zu einer Verdichtung des Schotterbetts führt. Der feine Abrieb lagert sich in den Hohlräumen zwischen den Schottersteinen ein, was zu einer weiteren Verdichtung führt. Auf diese Weise verliert das Schotterbett einen grossen Teil seiner Federwirkung. Die Materialbeanspruchung von Schiene, Schienenbefestigung und Schwelle nimmt in der Folge davon zu. Der Verdichtung des Schotterbetts wird durch eine Schotterreinigung entgegengewirkt. Abweichungen beim Längen- oder Querprofil, bei der Überhöhung in Kurven oder Abweichungen bei der Spurweite erhöhen die einwirkenden dynamischen Kräfte. Die Verformungen nehmen weiter zu.

Klimatische Einflüsse in Form von Temperaturwechseln in der Grössenordnung von minus zehn Grad Celsius bis plus sieben Grad Celsius führen vor allem beim durchgehend verschweissten Gleis zu sehr hohen inneren Spannungen, die – zwar selten – zu Gleisverwerfungen führen. Als Gegenmassnahme wird die Gleislage durch Stopfen des Schotterbetts korrigiert. Diese Massnahme kann allerdings auch nur begrenzt durchgeführt werden, da beim Stopfen ein Teil der Schottersteine zertrümmert wird.

### Moderne Gleisdiagnose

Moderne Eisenbahnunternehmen setzen für die Überwachung und die Ermittlung der Soll-Ist-Abweichungen der Gleisanlagen hoch entwickelte Diagnosefahrzeuge ein. Diese sind in der Lage, die gesamte Geometrie der Gleislage und des Schienen­profils inklusive des Verschleisses zu messen, den Zustand der Schienenbefestigung



Die Pickel einer Gleisstopfmaschine für die Gleislagekorrektur. Bei grossen Abweichungen der Gleislage sind mehrere Stopfvorgänge notwendig.

zu erfassen und Risse in den Schwellen und aufstossenden Schlamm zu detektieren.

Einsatz und Anwendung der Diagnosefahrzeuge hängen direkt mit der Unterhaltsstrategie zusammen. Eisenbahnen wie beispielsweise die SBB messen eine Gleisstrecke zweimal pro Jahr. Die Messdaten dienen vor allem der Überprüfung des Gleiszustandes über einen bestimmten Zeitraum und zur Überprüfung der während der Sommermonate ausgeführten Arbeiten. Andere Bahnen wie beispielsweise die SNCF setzen das Diagnosefahrzeug gezielt zur Überwachung ein. Schwach befahrene Nebenstrecken werden praktisch ohne Unterhalt betrieben, dafür wird bei schlechter Gleislage der Zustand typischerweise alle zwei Monate durch Messwagenfahrten oder visuell geprüft. Interventionen oder Sofortmassnahmen werden ausgelöst, sobald ein Parameter einen für die Beschreibung des Gleiszustands kritischen Wert annimmt.

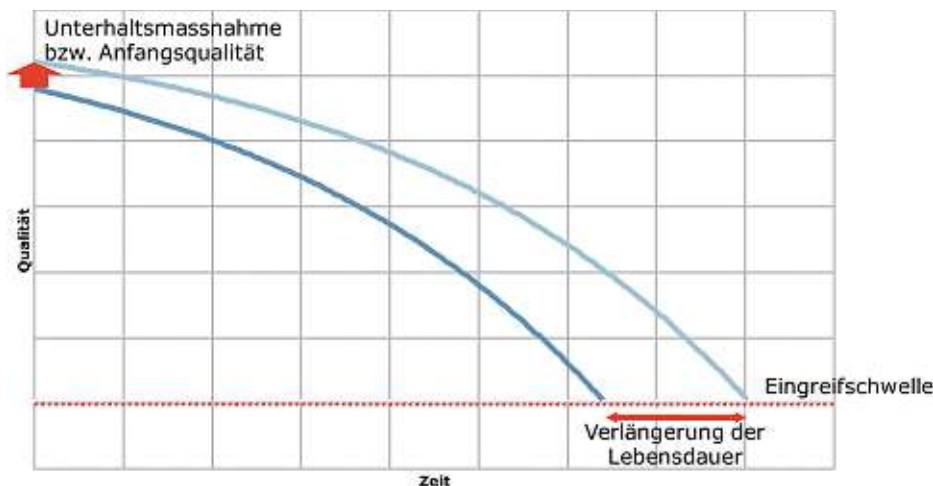
Die Diagnosefahrzeuge werden nicht nur bei Gleisen in kritischem Zustand häufig eingesetzt, sondern auch auf Eisenbahnlinien mit sehr hohen Anforderungen an die Zustandsgüte der Fahrbahn. Prominente Beispiele dafür sind die Shinkansenlinien in Japan mit täglicher Prüfung, die TGV-Linien, die mindestens alle vier Wochen überprüft werden, oder auch der Lötschberg-Basistunnel mit Messungen alle vierzehn Tage.

### Zeitpunkt für Unterhalts- und Erneuerungsmassnahmen

Für den Eisenbahninfrastrukturbetreiber besteht der Hauptnutzen der rechtzeitig ausgeführten Er-

haltungsmassnahmen in der Vermeidung von zusätzlichen und teureren Arbeiten in der Zukunft, wobei stets ein adäquater, die Sicherheitsbestimmungen erfüllender Fahrbahnzustand garantiert sein muss. Das Aufschieben von Reparaturen hat zur Folge, dass eine geplante Massnahme in Zukunft eventuell nicht mehr sinnvoll ist oder durch eine teurere Unterhalts- oder gar Erneuerungsmassnahme ersetzt werden muss. Dies ist vor allem auf stark befahrenen Linien der Fall.

Regelmässige, proaktive Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten erfolgen nach einem zuvor definierten Plan, ohne dass unmittelbar zuvor Zustandsmessungen notwendig wären. Überproportionale Zustandsverschlechterungen, die bei bereits fortgeschrittenem Verschleiss auftreten, können so reduziert werden. Durch die Planung der Arbeiten lassen sich Arbeiten zusammenfassen und somit Synergieeffekte nutzen. Da Unterhaltsarbeiten rechtzeitig durchgeführt werden, werden aufwendige und damit zeitraubende Massnahmen reduziert, wodurch die Beeinträchtigung der Infrastrukturverfügbarkeit ebenfalls niedrig ausfällt. Diese «kleineren» Unterhaltsmassnahmen werden soweit als möglich in den Betriebszeitlücken (zum Beispiel in der Nacht) durchgeführt. Trotzdem haben notwendige Erneuerungsarbeiten oftmals eine zumindest teilweise Sperrung der Gleise zu Folge. Durch Vorausplanen lassen sich die Nachteile der Streckensperrung im Bereich des Möglichen reduzieren. Die Erstellung eines solchen Unterhaltsplans ist anspruchsvoll, da präventive Massnahmen zum richtigen Zeitpunkt ergriffen werden sollen. Notwendige Voraussetzungen für den proaktiven Un-



**Zusammenhang zwischen Unterhaltsarbeiten und Lebensdauer.**

terhalt sind zudem jährliche, genügend hohe Budgets sowie entsprechendes Personal für die Planung und das Ausführen der Arbeiten. Reaktiver Unterhalt und Erneuerung zeichnet sich dadurch aus, dass bei Unterschreiten von Toleranzwerten (vor allem sicherheitsrelevanten Grenzwerten) Interventionen unter Zeitvorgabe entsprechend ihrer Dringlichkeit ausgelöst werden. Eine Intervention ist dann entweder minimalistisch, das heisst es wird nur gerade soviel investiert, dass die Grenzwerte wieder eingehalten werden, oder die Intervention ist maximal, was oft einer Erneuerung der Fahrbahn oder Teilen davon gleichkommt. Beispiele für minimalistische Interventionen sind der Ersatz einzelner Schwellen,

Schienenbefestigungen, punktuelle Schweissarbeiten, punktuell Schleifen oder Stopfen, Verschraubungen anziehen oder Schraubenlochsanierungen. Vorteil dieser Strategie ist, dass der Aufwand für Unterhaltsarbeiten sehr beschränkt ist und somit auch nur begrenzt personelle, materielle und finanzielle Ressourcen permanent zur Verfügung gestellt werden müssen. Nachteilig ist aber der grosse Aufwand, der für die Überwachung des Fahrbahnzustands betrieben werden muss. Das Risiko von zufälligen Ausfällen einzelner Komponenten nimmt zu, womit die Verfügbarkeit plötzlich reduziert werden kann. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich die Gleisqualität ab einem bestimmten Verschleissausmass überpro-

portional verschlechtert, und schliesslich erfordert diese Strategie eine hohe Flexibilität an Personen- und Materialverfügbarkeit.

**Ökonomische und betriebliche Optimierung**

Die Infrastrukturbetreiber in Europa führen Unterhalt und Erneuerung oft gemischt aus, angepasst an die einzelnen Aufgaben. Die Minimierung der Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der betrieblichen Anforderungen ist sehr anspruchsvoll, zumal die Unterhaltsarbeiten die Lebensdauer auch negativ beeinflussen. Werden beispielsweise die Schienen zu häufig geschliffen, muss die Schiene frühzeitig ausgewechselt werden, da der Schienenkopf rasch über die zulässigen Grenzwerte hinaus abgenutzt ist. Ein zu langes Warten mit Unterhaltsarbeiten ist ebenfalls ungünstig, da das Risiko von Ausfällen mit zunehmendem Verschleiss deutlich ansteigt. Das Auffinden der optimalen Zeitpunkte und die Bestimmung des notwendigen Massnahmensets sind deshalb zentrale Aspekte, um Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten langfristig kostengünstig realisieren zu können.

Ein wesentlicher Bestandteil bei proaktivem Unterhalt und proaktiver Erneuerung ist die Prognose des Fahrbahnzustands beziehungsweise die Verschleissentwicklung der einzelnen Komponenten wie Schienen, Schwellen und Schotter. Für eine schlüssige, vorausschauende Bedarfsplanung sind netzweite Analysen notwendig, die einerseits Unterhalts- und Erneuerungsabschnitte identifizieren und andererseits Kosten abschätzen. (Ein Beispiel einer solchen Zustandsprognose ist auf Seite 20 ersichtlich.)

Die Identifikation zusätzlicher Kosten ist sehr aufwendig und besonders in der Schweiz gilt, dass der Zugsverkehr so wenig wie möglich beeinträchtigt werden soll. Die Verfügbarkeit und das Angebot werden sehr hoch gewichtet. Temporäre Streckenschliessungen werden wann immer möglich vermieden. In der Regel versucht man den Zugsverkehr mit geringen Einschränkungen aufrecht zu erhalten, so dass die notwendigen Arbeiten in Betriebspausen erledigt werden müssen. Der Preis, den man dafür bezahlen muss, sind höhere Kosten infolge höheren Aufwands für die Bauarbeiten, komplexer Logistik und insgesamt längerer Bauzeiten.

Mit reaktivem Unterhalt geht meist ein für längere Zeit deutlich schlechtere Gleisqualität einher. Prominentes Beispiel dafür ist Frankreich. Gemäss nationalem Audit 2005 befindet sich ein grosser Teil der Nebenstrecken des Réseau Ferré de France im europäischen Vergleich in sehr schlechtem Zustand<sup>9</sup>. Grund dafür ist der reaktive Unterhalt und die Tatsache, dass viele Nebenstrecken in Frankreich nur von wenigen und leicht-

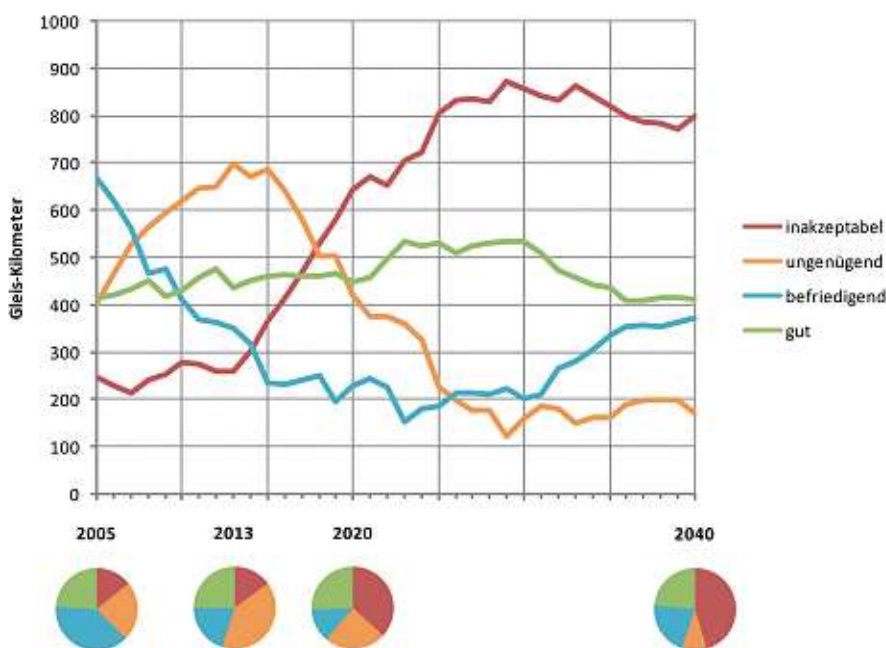


Inhomogenes Gleis mit Beton- und Holzschwellenmix durch punktuellen Schwellenersatz, starre und elastische Schienenbefestigung führt zu schlechtem Tragverhalten und rascher Abnutzung.





Durch aufstossendes Wasser verschlammter Schotter, das Schotterbett kann die Federfunktion nicht mehr wahrnehmen.



Zustandsverlauf bei gleich bleibender Unterhalts- und Erneuerungsstrategie. Bleiben Strategie, finanzielle und personelle Ressourcen konstant, wird sich der Zustand des Schienennetzes bei ungenügendem Mitteleinsatz laufend verschlechtern, als «Verzehr» der Infrastruktur.

ten Zügen pro Tag befahren werden. Weniger hohe Qualitätsanforderungen ans Gleis sind in diesen Fällen zulässig. Das Fazit des Audits hat allerdings die Region Midi-Pyrénées veranlasst, eine Expertengruppe mit einer Zustandsanalyse und Prognose zu beauftragen<sup>4</sup>. Aufgrund der Resultate hat der Conseil Régional de la Région Midi-Pyrénées einen Kredit für Infrastrukturerneuerung von 500 Millionen Euro bewilligt<sup>5</sup>, um das Schienennetz zu modernisieren und den heutigen und zukünftigen Bedürfnissen anzupassen.

**Fazit**

Ist der Unterhalts- und Erneuerungsbedarf unbekannt, können die Bedürfnisse der Infrastrukturbetreiber nicht genügend genau abgeschätzt werden. Der Bedarf kann bei der Erstellung neuer Fahrpläne nicht genügend berücksichtigt werden. Ist dagegen ein Programm für die notwendigen Unterhaltsarbeiten zu bestimmten Zeitpunkten vorhanden, können die Bedürfnisse des Unterhalts in den Verhandlungen bei der Trassenvergabe transparent einfließen. Die mittel- und langfristigen Auswirkungen auf den Fahrbahnzustand können aufgezeigt werden. Damit liegen für das Management die Entscheidungsgrundlagen vor, welche Unterhaltmassnahmen infolge beschränkter Budgets weggelassen oder weiter hinausgezögert werden, im Bewusstsein der damit verursachten höheren Baukosten und Beeinträchtigungen im Bahnverkehr bei Ausführung der Massnahmen zu einem späteren Zeitpunkt. ■

**\* Zu den Autoren:**

Christoph Marti, Verkehrsingenieur, dipl. Ing. ETH, R+R Burger und Partner AG  
 Thomas Herrmann, Mathematiker, Dr. sc. ETH, R+R Burger und Partner AG  
 Jost Lükking, Verkehrsökonom, dipl. Volkswirt, Dr. rer. pol., R+R Burger und Partner AG

**Literatur**

- <sup>1</sup> Kennzahlen Eisenbahninfrastruktur – Benchmarking, Gutachten zuhanden des Bundesamts für Verkehr (BAV). R+R Burger und Partner AG. 2007
- <sup>2</sup> Freiräume für Unterhaltsarbeiten, Gutachten, Berichte und Modelle zuhanden der Schweizerische Bundesbahnen (SBB). R+R Burger und Partner AG. 2005–2009
- <sup>3</sup> Audit sur l'état du réseau ferré national français. Société nationale des chemins de fer français (SNCF) et Réseau ferré de France (RFF), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, R+R Burger und Partner AG, SBB Consulting, Furrer+Frey AG, De Cérenville Géotechnique SA et IMC - Infrastructure Management Consultants. 2005
- <sup>4</sup> Mission d'expertise des infrastructures ferroviaires de la Région Midi-Pyrénées, Rapport de synthèse. RFF - Direction Régionale de Toulouse, Région Midi-Pyrénées. SMA et associés SA, R+R Burger und Partner AG, IMC - Infrastructure Management Consultants, SBB Consulting et Furrer+Frey AG. 2007
- <sup>5</sup> Midi-Pyrénées renewal plan. Railway Gazette International. 5. September 2007