

DISSERTATION

Effizienzsteigerung im Eisenbahnverkehr: Geringere Kosten für Verdichtung und Qualitätssteigerung im Regional- und Vorortverkehr Südmährens

KURZFASSUNG

mit dem Schwerpunkt Fahrplan- und Betriebsvarianten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen
Wissenschaften unter der Leitung von

Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Hauger

und

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bardo Hörl

Department für Raumentwicklung, Infrastruktur- und Umweltplanung (280)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Harald Buschbacher

Matrikelnummer: 9725625
Bürgerspitalgasse 21, 1060 Wien
harald.buschbacher@reflex.at

Wien, im März 2008

Aufgabenstellung

Identifizierung von Effizienzpotenzialen durch Variantenvergleich

Das erste Thema der Arbeit sind die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung im Eisenbahnvorort- und – regionalverkehr für den Südmährischen Kreis in einem Zeithorizont etwa bis zu den Jahren 2015-2018. Die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung werden dabei dadurch beurteilt, dass verschiedene Fahrplan- und Bahnbetriebsvarianten entworfen und bewertet werden. Aufgrund erheblicher zu erwartender Veränderungen in den Rahmenbedingungen stellt der derzeitige Betrieb zwar keine Variante dar, es existiert jedoch eine Form von „Nullvarianten“ im Sinne von Varianten, die dem heutigen Betrieb mit moderneren Fahrzeugen und dichteren Fahrplänen am ähnlichsten sind.

Die Fahrplan- und Betriebsvarianten enthalten auch Varianten mit Einführung einer Stadtrationalbahn, welche die Verknüpfung zum zweiten Thema darstellen: Entwurf, Machbarkeitsabschätzung und vorläufige Bewertung der Variante eines vereinfachten Umbaus des Bahnknotens Brno im Vergleich mit den bislang erwogenen Varianten.

Abgrenzung des Themas

- **Räumlich:** Die Beispielregion ist der Südmährische Kreis als NUTS-III-Einheit und höherrangige Verwaltungseinheit mit der Hauptstadt Brno. In verkehrlicher Hinsicht bedeutet das in erster Linie Vorortverkehr von Brno (tägliche Fahrten zu Arbeit und Ausbildung), weiters Regional- und Vorortverkehr in den südlichen und östlichen Teilen der Region, die weiter von Brno entfernt sind. Die (Kreis-)grenzüberschreitenden Verkehrsbeziehungen sind ebenso berücksichtigt, wie die Anforderungen des integralen Taktfahrplans, die Kosten werden jedoch zwischen den Kreis so aufgeteilt, dass sich die Ergebnisse auf das Gebiet des südmährischen Kreises beziehen.
- **Zeitlich:** Den entworfenen und verglichenen Varianten wurde die Erneuerung des Fahrzeugparks und die Realisierung einiger Infrastrukturausbauten zugrunde gelegt, insbesondere die Lösung einiger Konfliktpunkte und Kapazitätseinschränkungen des Bahnknotens Brno. Der Zeithorizont, bis zu dem diese Voraussetzungen gegeben sein werden, wird etwa auf den Zeitraum 2015-2018 geschätzt.
- **Inhaltlich - Zuggattungen:** In die Kategorie Regional- und Vorortverkehr fallen alle Regional- und Eilzüge, variantenweise wurde auch mit der Einbindung der Schnellzüge in den Regionalverkehr gerechnet. Nicht berücksichtigt wurden die eigenwirtschaftlich angebotenen EC- und IC-Züge sowie der Güterverkehr.
- **Inhaltlich – Kosten und Nutzen:** Schwerpunkt der Arbeit sind die internen Kosten des Verkehrsunternehmens bzw. des Aufgabenträgers, d.h. bis auf einige Ausnahmen sämtliche Kosten des Eisenbahnverkehrs plus periodisierte Investitionskosten variantenspezifischer Infrastrukturausbauten. Unterschiede in Umfang und Qualität des öffentlichen Verkehrsangebots werden nicht monetarisiert (beispielsweise im Sinne von Erlösprognosen oder externen Kosten des motorisierten Individualverkehrs). Die Kosten werden jedoch auch im Verhältnis zur Betriebsleistung (Zugkilometer pro Woche) ausgedrückt, wobei die Betriebsleistung in realistischen Grenzen gemäß dem vom Kreis angestrebten zukünftigen Fahrplanumfang sein muss. Qualitätsunterschiede zwischen den Varianten werden beim Vergleich der Ergebnisse auch qualitativ kommentiert.



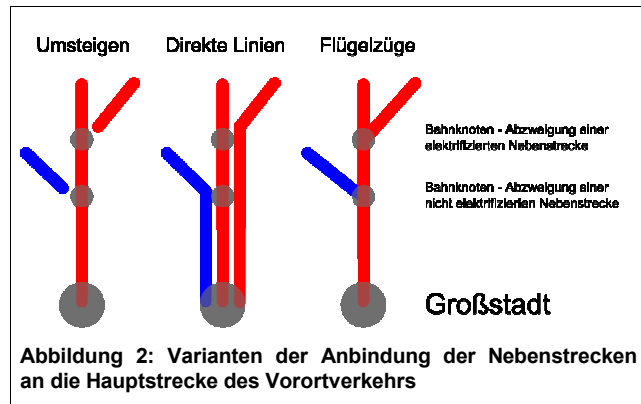
Abbildung 1: Lage des Südmährischen Kreises im mitteleuropäischen Bahnnetz. Quellen: Europäische Kommission, geografický server.

Fahrplan- und Betriebsvarianten

Die verglichenen Fahrplan- und Betriebsvarianten unterscheiden sich nach vier Kriterien:

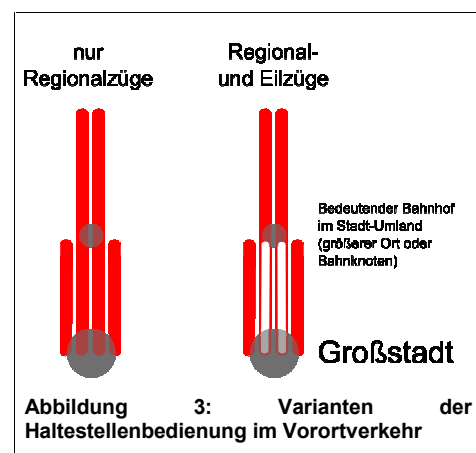
1. Anbindung der Nebenstrecken an die Hauptstrecken des Vorortverkehrs:

Die klassische Variante ist das Umsteigen am Knotenbahnhof, umsteigefreie Verbindungen von den Stationen an der Nebenstrecke bis in die Großstadt können direkte Linien oder Flügelzüge sein.



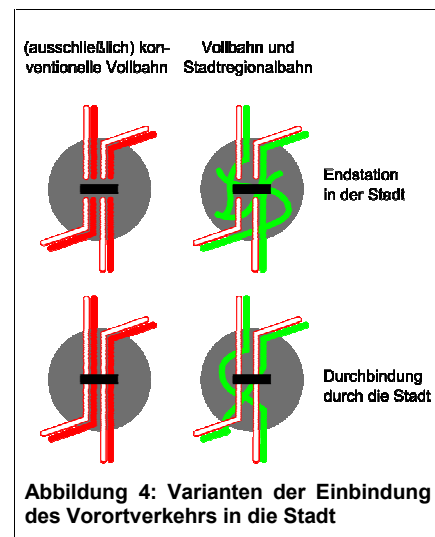
2. Haltestellenbedienung im Vorortverkehr:

Auf den am stärksten frequentierten Streckenabschnitten im Stadt-Umland, wo die kürzesten Intervalle gerechtfertigt sind (in der Regel in einer Größenordnung von 15 Minuten) kann ein Teil der Züge als Eilzüge geführt werden, die nur in ausgewählten Stationen halten.



3. Einbindung des Vorortverkehrs in die Stadt:

Brno kann Endstation aller Züge des Regional- und Vorortverkehrs sein, die Linien können aber auch durch Brno durchgebunden werden. Weiters können die Züge ausschließlich über konventionelle Vollbahnstrecken in die Stadt geführt werden, oder teilweise unter Verwendung von Tram-Train-Garnituren als Stadtrationalbahn über das Straßenbahnnetz.



4. Zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität:

Im Regional- und Vorortverkehr treten deutliche Hauptverkehrszeiten auf, die durch die zeitliche Charakteristik der Arbeits- und Ausbildungswege bedingt sind. Hinsichtlich der zeitlichen Anpassung der der Beförderungskapazitäten an diese Spitzen sind folgende Varianten denkbar:

- Keine Anpassung: konstante Beförderungskapazität den ganzen Tag über
- Intervallanpassung: Zur Spitze kürzere Intervalle, als außerhalb der Spitzen
- Teilen und Verstärken der Garnituren an den Endbahnhöfen: die Garnituren werden zu Beginn der Hauptverkehrszeit verstärkt und am Ende der Spitze geteilt, die

entsprechenden Fahrzeuge werden über Mittag in der Stadt und während Abend und Nacht am ländlichen Streckenende abgestellt.

- Teilen und Verstärken der Garnituren auch an Unterwegsbahnhöfen: die verstärkten Garnituren befahren nicht den ganzen Zuglauf, sondern nur den stärker belasteten Vorortabschnitt, was schnelles Teilen und Verstärken im Verlauf des Aufenthalts in einem Unterwegsbahnhof erfordert.

Varianten des Umbaus von Bahnknoten und Hauptbahnhof Brno

Die Frage der Gestalt des Umbaus des Bahnknotens und Hauptbahnhofs in Brno ist ein sehr kontroversielles Thema. Eine detaillierte Analyse der Kosten und sonstigen Vor- und Nachteile der bisher erwogenen Hauptvarianten (Verlegung des Hauptbahnhofs oder Neubau im Zentrum) existiert bereits. Der Schwerpunkt des zweiten Teils dieser Arbeit ist daher die Variante eines vereinfachten Umbaus: Es wird ein Stadtrionalbahnsystem für Brno entworfen, mit dem die Belastung der Bahnsteigkanten des Hauptbahnhofs soweit verringert werden kann, dass statt eines de-facto-Neubaus des Bahnhofs eine Renovierung und Ergänzung des bestehenden Bahnhofs ausreicht. Nach einer Beurteilung der grundsätzlichen Machbarkeit eines solchen vereinfachten Umbaus wird der Entwurf der Gleisanlagen und der städtebaulichen Komposition vorgestellt und eine vorläufige Schätzung der Investitionskosten angestellt. Dabei werden auch die zusätzlichen Kosten für die Fahrplan- und Betriebsvarianten mit Stadtrionalbahn berücksichtigt. Abschließend werden die Vor- und Nachteile der Varianten des Umbaus von Bahnknoten und Hauptbahnhof Brno vorgestellt.

Methodische Vorgehensweise

Einteilung des Bahnnetzes in Streckenbündel

Die Fahrplan- und Betriebsvarianten wurden zunächst für sechs voneinander unabhängige Streckenbündel entworfen und bewertet:

- Nord (Gebiet um die Hauptstrecke 260 Brno – Letovice)
- Nordost (Hauptstrecken 300 Brno – Nezamyslice und 340 Brno – Veselí nad Moravou)
- Südost (Hauptstrecke 250 Brno – Břeclav)
- Südwest (Hauptstrecken 240/244 Brno – Náměšť nad Oslavou / Hrušovany nad Jevišovkou)
- Nordwest (Hauptstrecken 250 Brno – Křižanov)
- Břeclav – Hodonín (Hauptstrecke 330 Břeclav – Moravský Písek)

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser voneinander unabhängigen Streckenbündel wurden auch Varianten mit Verknüpfung von Linien mehrerer Streckenbündel entworfen.

Erhebung von Ausgangsbedingungen

Als Grundlagen für den Entwurf von Fahrplan- und Betriebsvarianten wurden zunächst folgende Rahmenbedingungen erhoben:

- **Fahrgastfrequenzen**
 - Derzeitige tägliche Fahrgastzahlen für alle Streckenabschnitte wurden als Ergebnisse von Fahrgastzählungen direkt von České Dráhy a.s. erhalten.
 - Die bis zum Zeithorizont der Arbeit erwarteten Fahrgastzuwächse auf den einzelnen Streckenabschnitten wurden in erster Linie nach dem „Generel dopravy“, einer Art Generalverkehrsplan des südmährischen Kreises angesetzt.
 - Die Tagesganglinien der Fahrgastfrequenzen wurden durch eigene Fahrgastzählungen an drei Bahnhöfen (welche 10 Streckenabschnitte abdecken) bestimmt und danach auf den ganzen südmährischen Kreis extrapoliert.
- **Der derzeitige Zustand und erwartbare Ausbauten der Eisenbahninfrastruktur** wurde nach dem Entwurfsteil des Generel dopravy abgeschätzt.
- **Der angestrebte Umfang des Zugangebots** wurde ebenso aus dem Generel dopravy übernommen, die Bandbreite einer „realistischen“ Betriebsleistung wurde mit 75% - 125% der Vorstellungen des Kreises angesetzt.
- **Bedingungen für den integralen Taktfahrplan**
 - Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten an den Knotenbahnhöfen um den Südmährischen Kreis wurden dem aktuellen Fahrplan entnommen, auch wurde beurteilt, welche Bahnhöfe in welchem Ausmaß und welcher Perfektion die Funktion von Taktknoten erfüllen.

- Es wurde ein Schema überregionaler und kreisweiter Elemente eines integralen Takts entworfen, dessen Machbarkeit mittels Fahrzeitsimulationen auf einigen kritischen Streckenabschnitten überprüft wurde.

Schätzung von Kostensätzen (Einheitspreisen)

Zum Zweck der Kostenberechnungen für die einzelnen Fahrplan- und Betriebsvarianten wurden zunächst allgemeine Kostensätze geschätzt:

- **Fahrzeugkosten**
 - Anschaffungskosten für Fahrzeuge, ausgedrückt in der Einheit Kč/Sitzplatz wurden anhand von etwa 30 Beispielen veröffentlichter Informationen über Fahrzeugbeschaffungen durch verschiedene Verkehrsunternehmen oder Regionen abgeschätzt. Weiters wurde eine Lebensdauerfunktion der Fahrzeuge in Abhängigkeit von der jährlichen Laufleistung geschätzt, wodurch eine variantenweise Berechnung der jährlichen Fahrzeugamortisationskosten für jede eingesetzte Fahrzeuggattung ermöglicht wurde.
 - Fahrzeuginstandhaltungskosten, ausgedrückt in Kč/Sitzplatz-km, wurden nach Äußerungen von Fahrzeugherstellern geschätzt.
- **Kosten für Endenergie** in der Einheit Kč/MJ am Rad wurden nach den Energieträgerpreisen (Diesel oder Traktionsstrom) berechnet, dividiert durch den Wirkungsgrad der Energieumwandlung nach Energieträger.
- **Fahrpersonalkosten** (vollständige Arbeitskosten in der Einheit Kč/h am Umlauf) wurden nach verschiedensten Quellen geschätzt (Stellenannoncen, Lohnstatistik, Daten aus Kalkulationen von Verkehrsunternehmen oder Fahrzeugherstellern)
- **Infrastrukturkosten**
 - Kosten für die Instandhaltung bestehender Infrastruktur und Betriebsführung auf dieser wurden in Form von Infrastrukturbenutzungsentgelten berücksichtigt, wie sie tatsächlich den Verkehrsunternehmen nach zurückgelegten Zugkm und brtkm verrechnet werden.
 - Kosten für variantenspezifische Infrastrukturausbauten wurden nach der Methodikstudie „ungefähre Investitionskosten von Verkehrsbauten“ und prognostizierten Kosten ähnlicher Projekte geschätzt.
- **Einsparungen durch Stadtregionalbahn-Kompensationseffekte:** Die Kostenreduktion im Straßenbahnbetrieb durch Synergieeffekte mit dem Stadtregionalbahnbetrieb wurde nach folgenden Indikatoren geschätzt:
 - Entfallende Amortisationskosten dank eines geringeren Bedarfs an Fahrzeugen (ähnliche Berechnung wie bei den Vollbahnfahrzeugen, allerdings mit fixer Lebensdauer)
 - Entfallende hypothetische Straßenbahninfrastrukturbenutzungsentgelte
 - Entfallende Kosten für Traktionsstrom, FahrerInnen und Fahrzeuginstandhaltung nach der Kalkulation des Verkehrsbetriebs Brno für die Straßenbahn

Für die **Indexierung der Kosten** auf den Zeithorizont der Arbeit wurde für die Arbeitskosten der Index der Lohnsteigerungen im Verkehrssektor herangezogen, die restlichen Kosten wurden mit dem Verbraucherpreisindex hochgerechnet. Für die Annuitätenberechnung bei Fahrzeuganschaffungen oder Infrastrukturausbauten wurde der Zinssatz nach Angaben der tschechischen Nationalbank und des tschechischen Statistikamts geschätzt.

Definition der Fahrplan- und Betriebsvarianten

Zunächst wurden die Fahrplan-Hauptvarianten entworfen, die durch die Zeitlagen der Züge, der Linienführung und gegebenenfalls durch Umstiege oder Flügelzüge charakterisiert sind.

Die Untervarianten unterscheiden sich durch verschiedene Anpassung der Beförderungskapazität an die zeitlichen Nachfrageschwankungen sowie im Falle direkter Linien manchmal auch nach verwendeter Traktion (Elektrifizierung von Nebenstrecken, Einsatz von Hybridgarnituren oder von Dieselmotoren auch unter Fahrdraht).

Die einzelnen Varianten wurden mittels einiger Umläufe definiert, für jeden dieser Umläufe wurden die erforderlichen Fahrzeugeigenschaften bestimmt, und zwar die Kapazität (Sitzplätze), Antrieb und ob es sich um ein konventionelles Vollbahnfahrzeug oder um eine Tram-Train-Garnitur für die Stadtregionalbahn handelt.

Insgesamt wurden etwa 200 Varianten auf sechs Streckenbündeln entworfen und bewertet.

Berechnung der Mengengerüste

Aus den Daten der Variantendefinition und den Eigenschaften der einzelnen befahrenen Streckenabschnitte wurden für die einzelnen Varianten Mengengerüste berechnet:

- Anzahl erforderlicher Fahrzeuge inkl. Reserve nach Fahrzeuggattung (Kapazität/Antrieb)
- Jährliche Laufleistung dieser Fahrzeuge nach Gattung
- Endenergieverbrauch nach Traktion (Berechnung nach Fahrwiderstandsformel mit Berücksichtigung von Zuggewicht, Streckenhöchstgeschwindigkeit, Haltehäufigkeit, Längsneigungen und gegebenenfalls Rekuperation)
- Arbeitsstunden der TriebfahrzeugführerInnen (sowohl der TriebfahrzeugführerInnen am Umlauf, als auch jener, die im Falle planmäßigen Teilens und Verstärkens von Garnituren das Abstellen und Bereitstellen der Fahrzeuge durchführen)
- Infrastrukturbenutzungsentgelte
- Variantenspezifische Infrastrukturausbauten (konkrete Projekte wie etwa die Elektrifizierung eines bestimmten Abschnitts oder eine Übergangsstrecke für die Stadtrationalbahn)
- Stadtrationalbahn-Kompensationseffekte (Reduktion der Anzahl erforderlicher Straßenbahnfahrzeuge, Reduktion der Betriebsleistung in Wagen-km und Platz-km bzw. brtkm)

Berechnung der Ergebnisse

Die Endergebnisse in Form der gesamten (berücksichtigten) Kosten wurden nach dem Prinzip:

$$\text{Gesamtkosten} = \sum (\text{Mengengerüste} * \text{Kostensätze})$$

berechnet. Das bedeutet, dass keinerlei generalisierte Indikatoren (z.B. Kosten pro zurückgelegtem Platzkm) verwendet wurden, welche systematische Fehler durch die Bildung von Durchschnittskosten bei grundsätzlich verschiedenen Betriebskonzepten hätten bringen können.

Neben den absoluten Kosten wurden spezifische Kosten in der Einheit Kč/Zug-km als näherungsweise Effizienzindikator im Sinne des Verhältnisses von Kosten zum Umfang der öffentlichen Dienstleistung errechnet.

Weiters wurden folgende nichtmonetäre Indikatoren berechnet und deren Einfluss auf die Kosten der Varianten beurteilt:

- Auslastung der Beförderungskapazitäten
- Primärenergieverbrauch
- Umlaufgeschwindigkeit und Auslastung des Fahrzeugparks

Ergebnisse – Kosten der Fahrplan- und Betriebsvarianten

Einfluss der Fahrplan- und Betriebsvarianten auf die Kosten (allgemein)

Der Einfluss der Fahrplan- und Betriebsvarianten auf die Kosten ist jedenfalls erheblich: Gegenüber den „Nullvarianten“ eines einfachen Betriebs ähnlich dem heutigen, ohne zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität, haben effizientere, aber durchaus realistischere Varianten in der Regel um 20-25% niedrigere Kosten. Betrieblich schwierigere Varianten, beispielsweise mit Flügelzügen, mit Teilen und Verstärken von Garnituren an Unterwegsbahnhöfen oder mit Einsatz ungewöhnlich kleiner Garnituren sparen 30-40%, die teuersten bewerteten Varianten haben teils sogar mehr als die doppelten Kosten der günstigsten.

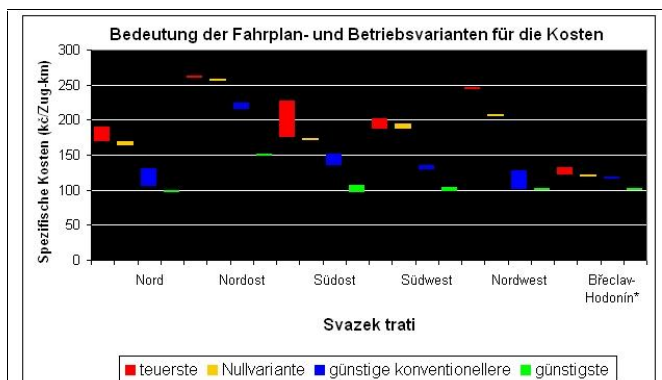


Abbildung 5: Bedeutung der Fahrplan- und Betriebsvarianten für die Kosten. *: optimistisches Infrastruktur-Szenario.

Bedeutung der zeitlichen Anpassung der Beförderungskapazitäten

Das deutlichste Ergebnis ist ein großes Effizienzpotenzial durch zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität: Mit Ausnahme vereinzelter Varianten mit Intervallanpassung können mit allen Varianten der Anpassung der Beförderungskapazität die Gesamtkosten gegenüber Varianten mit konstanter Beförderungskapazität verringert werden. Mit Teilen und Verstärken von Garnituren an Endbahnhöfen lassen sich die Kosten durchwegs auf 80-85% der Kosten ansonsten ähnlicher Varianten senken, mit Kapazitätsanpassung der einzelnen Züge auch an Unterwegsbahnhöfen in der Regel auf unter 80%.

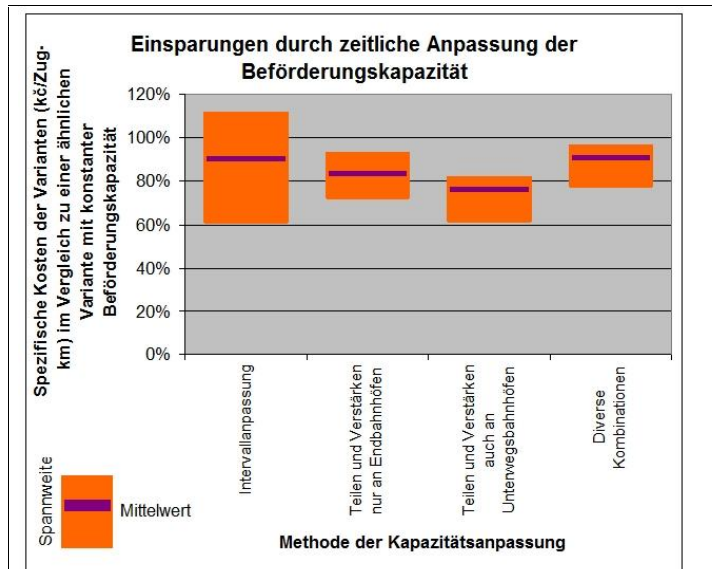


Abbildung 6: Einsparungspotenziale mit zeitlicher Anpassung der Beförderungskapazität

Kosten nach Fahrplan-Hauptvarianten

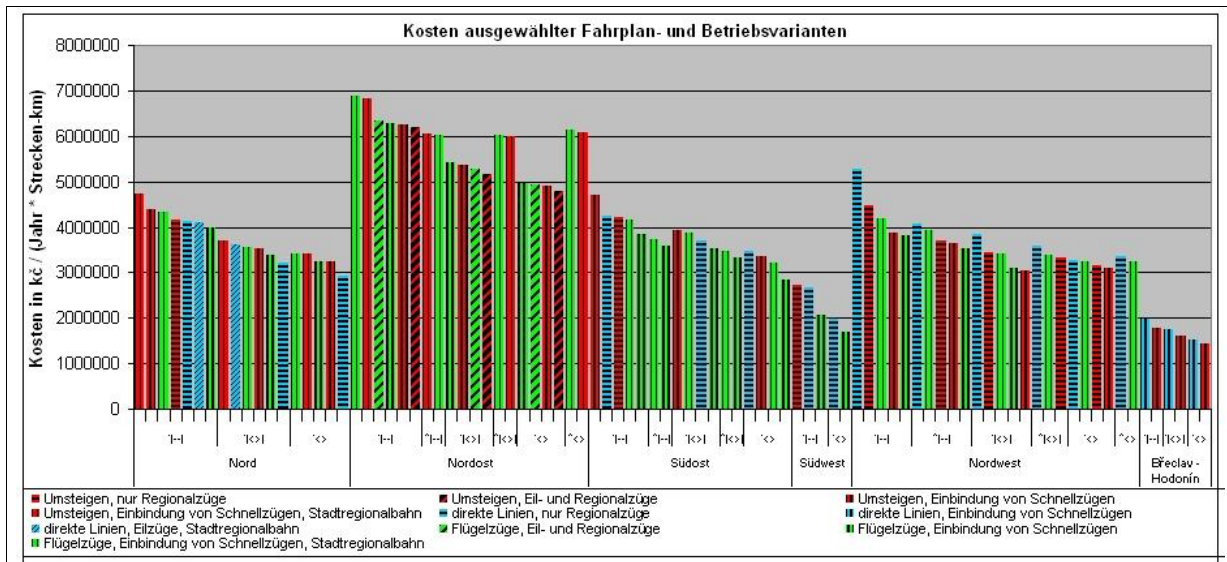


Abbildung 7: Kosten ausgewählter Fahrplan- und Betriebsvarianten

Legende:

\circ : gleiche Intervalle den ganzen Tag über

\wedge : Intervallanpassung

|--|: konstante Kapazitäten der Garnituren den ganzen Tag über

|<math><></math>|: Teilen und Verstärken von Garnituren an Endbahnhöfen

<math><></math>: Teilen und Verstärken von Garnituren auch an Unterwegsbahnhöfen

In absoluten Zahlen ist keine Fahrplanvariante eindeutig am besten für alle Streckenbündel: auf einem Streckenbündel haben Varianten mit direkten Linien und nur mit Regionalzügen die niedrigsten Kosten, auf anderen jedoch Varianten mit Einbindung der Schnellzüge und Flügelzügen. Die Varianten mit Einbindung der Schnellzüge haben aber meistens eine größere Betriebsleistung, daher ist in den spezifischen Kosten (Kosten pro Zug-km) die Tendenz zu sehen, dass diese Varianten ein besseres Kosten-Leistungs-Verhältnis haben, als Varianten mit direkten Linien oder Umsteigen und nur mit Regionalzügen:

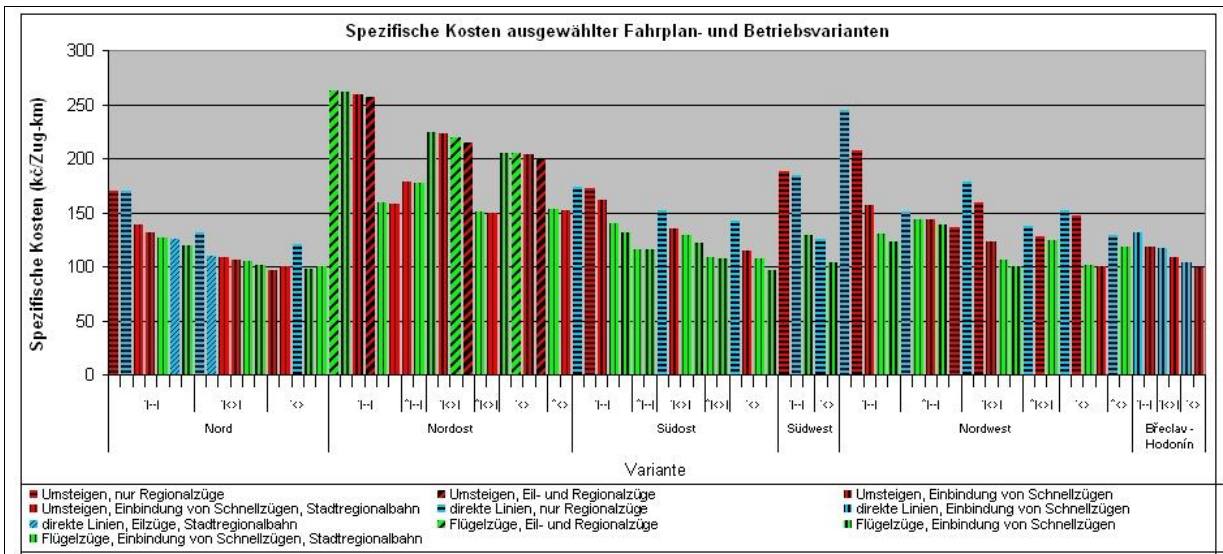


Abbildung 8: spezifische Kosten ausgewählter Fahrplan- und Betriebsvarianten

Legende:

°: gleiche Intervalle den ganzen Tag über

^: Intervallanpassung

|--|: konstante Kapazitäten der Garnituren den ganzen Tag über

|<>|: Teilen und Verstärken von Garnituren an Endbahnhöfen

<>: Teilen und Verstärken von Garnituren auch an Unterwegsbahnhöfen

Die Varianten mit Stadtrationalbahn sind auf allen Streckenbündeln erwartungsgemäß ungünstiger, als andere Fahrplan- und Betriebsvarianten. Ihre Aufgabe ist es jedoch, einen vereinfachten Umbau des Bahnknotens und Hauptbahnhofs Brno mit geringeren Investitionskosten zu ermöglichen.

Kosten nach Traktionssystem

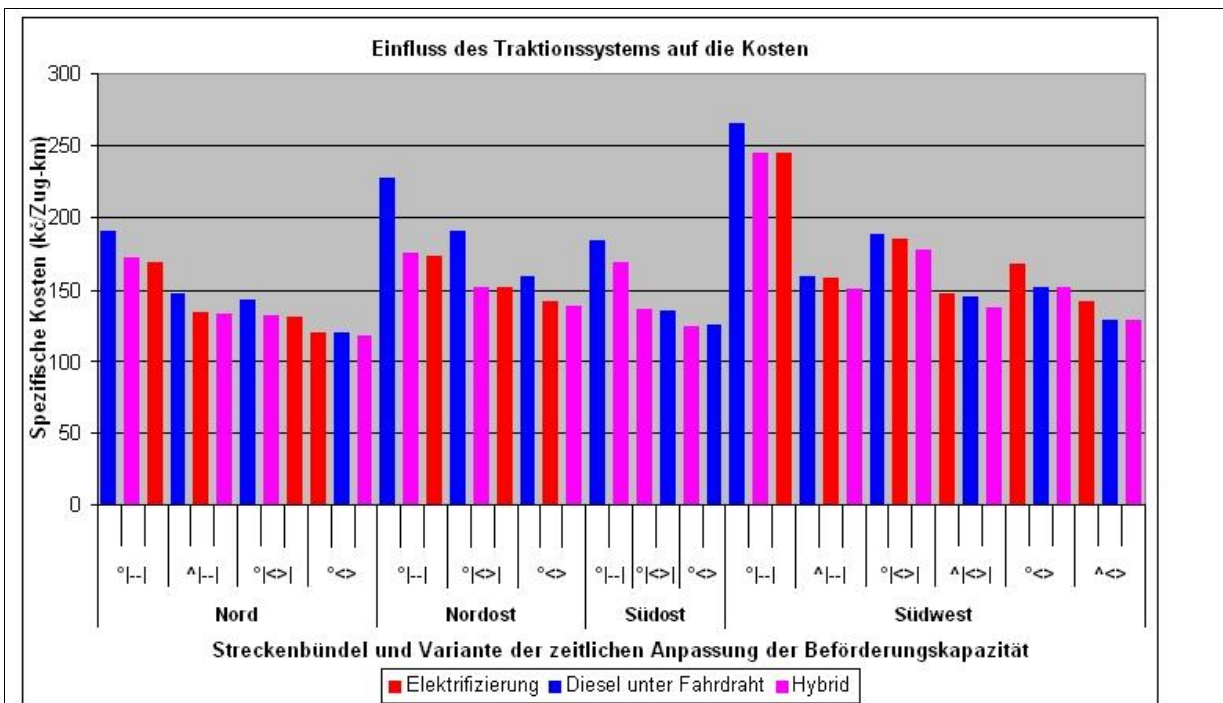


Abbildung 9: Kosten nach verwendetem Traktionssystem

Legende:

°: gleiche Intervalle den ganzen Tag über

^: Intervallanpassung

|--|: konstante Kapazitäten der Garnituren den ganzen Tag über

|<>|: Teilen und Verstärken von Garnituren an Endbahnhöfen

<>: Teilen und Verstärken von Garnituren auch an Unterwegsbahnhöfen

Die Reihung von Varianten, die sich nur im verwendeten Traktionssystem unterscheiden, hängt eng vom Ausmaß der zeitlichen Anpassung der Beförderungskapazität zusammen: Am teuersten sind die Varianten mit Dieselantrieb auch unter Fahrdracht ohne zeitliche Kapazitätsanpassung, denn sie haben auch den größten Traktionsenergieverbrauch. Je perfekter die zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität wird, umso mehr verringert sich der Nutzen der Elektrifizierung von Nebenstrecken.

Unter der Annahme, dass Hybridfahrzeuge einem um 13% höheren Anschaffungspreis haben als ansonsten gleiche Diesel- oder Elektrofahrzeuge, hat die Hybridtraktion nur auf dem Streckenbündel Südwest ohne jegliche zeitliche Kapazitätsanpassung oder am Streckenbündel Nordwest bei Intervallanpassung oder Teilen und Verstärken von Garnituren an den Endbahnhöfen signifikant niedrigere Kosten. In allen anderen Fällen bewirken Hybridfahrzeuge entweder höhere, oder im Rahmen der Genauigkeit der Berechnungen keine merklich von einer der konventionellen Varianten abweichende Kosten. Am ehesten gerechtfertigt ist die Elektrifizierung der Strecke Skalice n.S. – Boskovice, da auf diesem Streckenbündel – wenn auch nur in absoluten Zahlen – die günstigste Variante jene mit direkten Linien ist, abgesehen von der Variante mit der perfektesten zeitlichen Anpassung der Beförderungskapazität ist in diesem Fall die Elektrifizierung günstiger, als Dieseltraktion auf der ganzen Linie. Auf den Strecken Hrušovany u Brna – Židlochovice und Šakvice – Hustopeče ist die Elektrifizierung nur dann zielführend, wenn nicht die erheblich günstigere Variante mit traktionsmäßig gemischten Flügelzügen gewählt wird (etwa wegen ihrer betrieblichen Kompliziertheit). Auch für die Strecke Tišnov – Bystřice nad Pernštejnem gilt, dass sich die Elektrifizierung nur in allgemein eher ineffizienten Varianten auszahlt: Ohne Einbindung der Schnellzüge und ohne zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität.

Einfluss der Betriebsleistung auf die Kosten

Wie zu erwarten, haben allgemein umfangreichere Streckenbündel höhere absolute Kosten und auf zwei Streckenbündeln, wo es zwei grundsätzlich unterschiedliche Konzepte mit verschiedener Betriebsleistung gibt, gibt es auch eine deutliche Korrelation, dass die Varianten mit größerer Betriebsleistung absolut teurer sind. Auf den restlichen Streckenbündeln gibt es hingegen keine Korrelation, oder es sind die umfangreicheren Varianten sogar tendenziell billiger. Ein Grund für dieses überraschende Ergebnis kann sein, dass in einigen Fällen die Varianten mit dichterem Fahrplan eine effizientere Auslastung der Beförderungskapazitäten aufweisen, beispielsweise wegen der Intervallverkürzung nur am Vorortabschnitt mit der stärksten Fahrgastfrequenz. Andererseits kann es bei einem Zweistundentakt auf der ländlichen Hälfte einer Strecke passieren, dass die gleiche Garnitur abwechselnd einen vollen Zug mit langem Zuglauf und einen halbleeren Zug mit kurzem Zuglauf darstellt und daher nicht effizient ausgelastet ist. Jedenfalls kann es durchaus vorkommen, dass ein geändertes Betriebskonzept nicht nur den Fahrgästen kürzere Intervalle bringt, sondern auch dem Verkehrsunternehmen geringere Kosten. Umgekehrt muss nicht jede Streichung von Zügen die erwartete Kostenreduktion bringen.

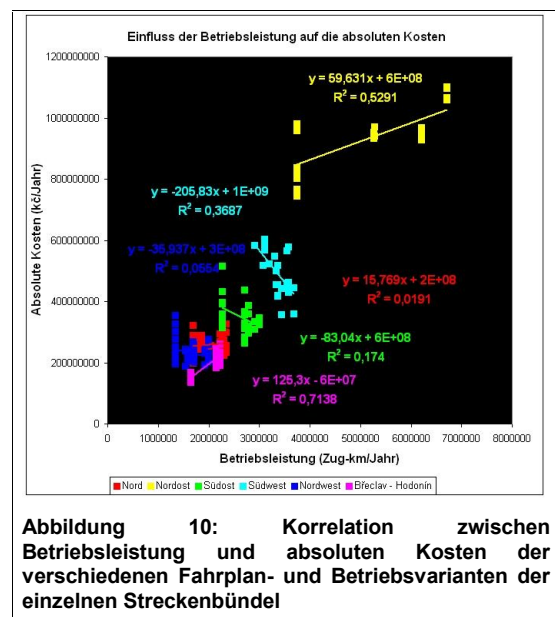


Abbildung 10: Korrelation zwischen Betriebsleistung und absoluten Kosten der verschiedenen Fahrplan- und Betriebsvarianten der einzelnen Streckenbündel

Mögliche Einsparungen durch Verknüpfung von zwei oder mehreren Streckenbündeln

Mit der Durchbindung zweier Linien von unterschiedlichen Streckenbündeln zu einer längeren Linie können im Falle langer Wendezeiten an jenem Bahnhof, an dem sich die Streckenbündel berühren, Garnituren und Arbeitsstunden von TriebfahrzeugführerInnen eingespart werden. Wegen der insgesamt unveränderten Betriebsleistung erhöht sich jedoch gleichzeitig die jährliche Laufleistung der verbliebenen Fahrzeuge. Das tatsächliche Einsparungspotenzial der Durchbindung von Zügen ist jedoch viel geringer, als die Unterschiede zwischen den Varianten innerhalb der einzelnen Streckenbündel: Im Vergleich mit ansonsten ähnlichen Varianten ohne Durchbindung betragen die Einsparungen nur 0,6 – 3,8 % der gesamten berücksichtigten Kosten der betroffenen Streckenbündel. Von diesem Wertes kann jedoch etwa ein Drittel auch dadurch realisiert werden, dass die TriebfahrzeugführerInnen während der Wendezeit zwischen den Garnituren umsteigen.

Abgesehen vom geringen Einsparungspotenzial spricht gegen die Durchbindung von Linien, das sie die zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität verkompliziert: Insbesondere im Fall von traktionsmäßig gemischten Flügelzügen käme es im Verknüpfungsbahnhof (in der Regel Brno hl.n.)

zu sehr komplizierten Verschiebewegungen mit An- und Abhängen von Teilen der Garnitur während des Stationsaufenthalts.

Aus der Sicht der Fahrgäste stellen direkte Verbindungen Hodonín – Břeclav – Brno sowie Fernverbindungen durch Brno die nützlichsten Durchbindungen dar.

Ein gewisse Alternative zur Durchbindung von Linie wäre eine solche Überlappung von Linien, dass zumindest ein Teil der Züge von Süden her bis Židenice geführt wird und von Norden her bis Horní Heršpice bzw. zu einer neuen Haltestelle im Bereich des Abstellbahnhofs. Eine solche Linienüberlappung würde auch die Möglichkeit des Umstiegs auf den öffentlichen Stadtverkehr auch an anderen Stationen als Brno hl.n. bringen und Stationsaufenthalte und Verschiebewegungen in Brno hl.n. verringern.

Kostenstruktur

In der Kostenstruktur überwiegen die Fahrzeugkosten (davon 60-70% Amortisationskosten), der Rest verteilt sich annähernd gleichmäßig auf Traktionsenergie, Fahrpersonalkosten und Infrastrukturbenutzungsentgelte.

Im Durchschnitt der teuersten Varianten machen die Traktionsenergiekosten, insbesondere für Diesel, einen deutlich größeren Anteil aus, ansonsten reduzieren sich von den Nullvarianten zu den günstigsten Varianten insbesondere die Anteile der Wartungs- und Energiekosten.

Der Anteil der Fahrzeug-Amortisationskosten ändert sich nicht, der Anteil der Infrastrukturentgelte erhöht sich, obwohl sie sich in absoluten Zahlen verringern. Am deutlichsten steigt der Anteil der Fahrpersonalkosten, es handelt sich um die einzige Komponente, die auch absolut geringfügig zunimmt.

Kostenstruktur von Fahrplan- und Betriebsvarianten

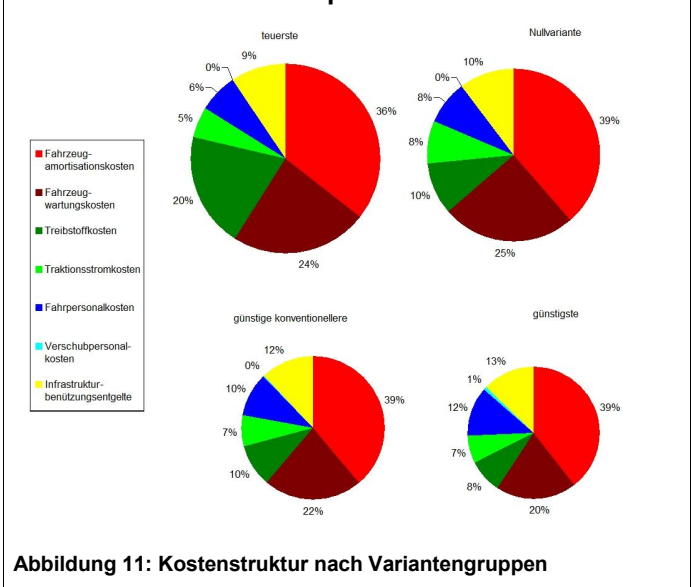


Abbildung 11: Kostenstruktur nach Variantengruppen

Nichtmonetäre Indikatoren

Von den absoluten und spezifischen Kosten abgesehen wurden auch folgende nichtmonetäre Indikatoren errechnet:

- **Auslastung der Beförderungskapazität:** Im Rahmen der verglichenen Varianten beträgt das Verhältnis zurückgelegte Personenkilometer zu angebotenen Sitzplatzkilometern 18 bis 46%. Dabei ist ein enger Zusammenhang zwischen der Auslastung und den absoluten Kosten zu erkennen, entscheidend sind dabei die unterschiedlichen Größen der einzelnen Garnituren, nicht die Anzahl Fahrgäste pro Zug.
- **Primärenergieverbrauch:** Die für 100 Personenkilometer verbrauchte Primärenergie entspricht 1,5 bis 3,5 l Diesel. Auch dieser Indikator verteilt sich parallel zu den absoluten Kosten, entscheidend für den Energieverbrauch ist in erster Linie die Auslastung der Beförderungskapazität, der Verbrauch pro angebotenen Platzkilometer ist von geringerer Bedeutung.
- **Auslastung der Fahrzeugkapazitäten:** Jeder Sitzplatz im Fahrzeugpark wird täglich für 106 bis 220 Personenkilometer verwendet, es ist ein mäßiger Zusammenhang mit den absoluten Kosten zu erkennen.
- **Umlaufgeschwindigkeit:** Bezogen auf die TriebfahrzeugführerInnen beträgt die Umlaufgeschwindigkeit 30 bis 55 km/h; es ist kein Zusammenhang mit den absoluten Kosten zu erkennen.

Empfehlungen

Empfehlungen für Verkehrsunternehmen

- **Zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität:** Das universellste Ergebnis ist, dass im Vorort- und Regionalverkehr ein großes Effizienzpotenzial durch die zeitliche Anpassung der Beförderungskapazität besteht. Angesichts der Anforderungen des Taktverkehrs sind die

Möglichkeiten der Anpassung der Kapazität der einzelnen Züge tendenziell höher, als der Intervallanpassung.

Empfehlungen für Schienenfahrzeughersteller

- Eignung von Fahrzeugen für die Kapazitätsanpassung: Am wichtigsten ist die Ausrüstung der Fahrzeuge mit automatischen Kupplungen, ohne die die Kapazität der einzelnen Züge weder während einer kurzen Wendezeit an einem Endbahnhof, noch an Unterwegsbahnhöfen angepasst werden kann. Auf einigen Streckenbündeln erfordern die kostengünstigsten Varianten den Einsatz kleinerer Fahrzeuge, als derzeit erzeugt werden (zweiachsige Diesel- bzw. vierachsige Elektrofahrzeuge). Übergänge zwischen den Garnituren auch über automatischen Kupplungen könnten Probleme mit ungleicher Verteilung der Fahrgäste innerhalb des Zuges oder durch Einstieg in den falschen Teil eines Flügelzuges lösen.
- Kompatibilität zwischen Fern- und Regionalverkehr: Die Bildung von Flügelzügen aus Schnell- und Regionalzügen, welche auf einigen Streckenbündeln als effizienteste bewertet wurden, erfordert eine Vereinheitlichung der automatischen Kupplungen. Darüber hinaus muss es möglich sein, Flügelzüge gemischter Traktion zu bilden, d.h., dass Dieselfahrzeuge entweder eine ungewöhnlich hohe Höchstgeschwindigkeit aufweisen müssen (bis zu 160 km/h), oder von elektrischen Fahrzeugen mit einer solchen Geschwindigkeit gezogen werden können.
- Hybridfahrzeuge: aus den Ergebnissen der Arbeit kann die Sinnhaftigkeit der Entwicklung von Hybridfahrzeugen weder bestätigt, noch widerlegt werden. Für eine solche Entscheidung wäre es notwendig, die Produktionskosten für Hybridfahrzeuge genauer zu bestimmen oder auch auf weiteren Beispielstrecken Traktionsvarianten zu vergleichen.

Empfehlungen für Aufgabenträger (Besteller)

- Wettbewerb der Verkehrsunternehmen im gemeinwirtschaftlichen Eisenbahnverkehr: Die Ergebnisse zeigen, dass auch ohne Reduktion von Angebotsumfang oder Fahrplanqualität große Kostenreduktionspotenziale bestehen. Die effizientesten der verglichenen Varianten haben zugleich den geringsten Energieverbrauch und die höchste Beschäftigung (zumindest an Lokführern). Damit dieses Potenzial ausgeschöpft werden kann, ist es aber notwendig, dass Ausschreibungen so formuliert sind, dass sie verschiedene Fahrplan- und Betriebsvarianten ermöglichen. Die Bewerber müssen auch die Kompetenz haben, die Fahrzeuge auszuwählen.
- Koordination zwischen Fern- und Regionalverkehr: Um die Führung von Flügelzügen aus Schnell- und Regionalzügen zu ermöglichen, müssen sich die Besteller dieser Zuggattungen nicht nur auf kompatible Kupplungen einigen, sondern auch auf ein angemessenes Entgelt für die Beförderung der Kurswagen.
- Kreisübergreifende Verkehrsverbünde: die Siedlungsstruktur des Südmährischen Kreises erfordert eine bessere Anpassung der Verbundabgrenzung an die tatsächlichen Verkehrsbedürfnisse auch über die Kreisgrenzen. Erhebliche Kreisgrenzen überschreitende Fahrgastströme gibt es insbesondere an den Grenzen zu den Kreisen Vysočina und Zlín.

Empfehlungen für den südmährischen Kreis

- Planung der Infrastrukturausbauten nach den Erfordernissen des integralen Taktfahrplans: Generell ist es wünschenswert, dass einer Prioritätenreihung von Infrastrukturausbauten konkrete, detaillierte Vorstellungen über den Fahrplan vorausgehen, insbesondere im Sinne von Anschlüssen im Zielzustand eines integralen Taktfahrplans. Es sollten nicht nur geforderte Kapazitätssteigerungen oder Fahrzeitverkürzungen berücksichtigt werden, sondern auch Kantenzeiten zwischen Taktknoten, deren Einhaltung die Reisezeiten bei Umsteigeverbindungen erheblich verkürzen kann.
- Neubewertung von Elektrifizierungsvorhaben: die Fahrzeitsimulationen zeigten, dass bei Streckenhöchstgeschwindigkeiten von 60-100 km/h, auch bei erheblichen Steigungen die Elektrifizierung gegenüber dem Einsatz moderner, ausreichend motorisierter Dieselfahrzeuge keine wesentliche Fahrzeitverkürzung bringt. Aus Sicht der Investitions- und Energiekosten kann die Elektrifizierung auf den Strecken Skalice nad Svitavou – Boskovice, Hrušovany u Brna – Židlochovice, Šakvice – Hustopeče und Tišnov – Bystřice nad Pernštejnem gerechtfertigt sein. Zumindest nach spezifischen Kosten (pro Zug-km) sind aber auch auf diesen Strecken die Varianten mit Flügelzügen gemischer Traktion günstiger, d.h. dass Dieselfahrzeuge auf der Hauptstrecke von Elektrogarnituren gezogen werden und den Dieselantrieb nur auf einem kurzen, nicht elektrifizierten Abschnitt benutzen.
- Verkehrserschließung der Region Hodonín: Die Verbindung Hodonín – Brno ist mit Schnell- und Eilzügen über Břeclav deutlich schneller, als bisher per Autobus. Dadurch würde teilweise

auch der Autobus-Parallelverkehr zur Strecke 255 im Abschnitt Hodonín – Čejč entfallen. Daher sollte die Bestrebung, den Personenverkehr auf dieser Strecke einzustellen, überdacht werden. Für jährliche Kosten von etwa 45 Mio. Kč (inklusive der Amortisation von Infrastrukturinvestitionen) wäre die Reaktivierung des Personenverkehrs auf der Strecke Mutěnice – Kyjov mitsamt einer Streckenumlegung über die Stadt Dubňany sowie die Erschließung von Holič und Skalica na Slovensku mit einer Linie Hodonín – Holič – Veselí nad Moravou möglich.

- Betrieb auf der Strecke Moravský Krumlov – Hrušovany nad Jevišovkou, Wiederaufbau des Grenzübergangs Hevlín – Laa/Thaya: Es wird die Beibehaltung des Personenverkehrs auf der ganzen Strecke Moravský Krumlov – Hrušovany nad Jevišovkou empfohlen, da aus den Fahrzeitsimulationen folgt, dass auch mit dem Einsatz moderner Dieselfahrzeuge eine erhebliche Beschleunigung und die Einhaltung der Kantenfahrzeit Střelice – Hrušovany nad Jevišovkou von weniger als einer Stunde möglich ist. Der Wiederaufbau des Grenzübergangs Hevlín – Laa/Thaya wird im Hinblick auf die Netzwerkeffekte eines zusammenhängenden Bahnnetzes empfohlen, mit anderen Worten aufgrund potenzieller Fahrgastzuwächse nicht nur auf dem reaktivierten Abschnitt, sondern durch wesentlich längere Fahrten. Die Wiedereröffnung des Grenzübergangs würde als Synergieeffekt die Bedienung des Abschnitts Laa/Thaya – Laa Stadt im Rahmen der Wendezeit des Triebwagens von der Strecke Hrušovany nad Jevišovkou – Laa/Thaya ermöglichen.