

MEMO

Betreff **Bahn induzierte Luftdruckschwankungen im Fehmarnbelt-Tunnel**
Bereich **Planfeststellung**
ATR-Nr. **RAT76-HCH-030**
An **Henrik Schjøler Dahl, Kim Smedegaard Andersen, Mathias Laubenstein**
Von **Susanne Kalmar Pedersen, Fritz Hilgenstock;**
Kopie an **Henrik Christensen, Maggi Åhlander, Bali Eicke**

Anhänge **AERODYNAMIC DRAG AND TRAIN-INDUCED PRESSURES IN THE PROPOSED FEHMERN LINK CROSSING, Phase-4 Report-B: Extended entrance regions, Alan Vardy, 3rd October 2011**

1. Einführung

Date 2017/10/10

Der Fehmarnbelt-Bahntunnel wird für moderne Standardpersonenzüge mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h in jeweils eingleisigen Tunnelröhren geplant.

Fährt ein Zug in einen Tunnel ein, erzeugt er dort eine Druckwelle. Wie hoch der Druck ist, hängt vor allem von der Zugfront und deren Form, der Zuggeschwindigkeit und der Tunnelquerschnittsfläche ab.

Die Druckwelle und Druckschwankungen im Tunnel können insbesondere den akustischen Komfort für die Passagiere beeinflussen. Dies ist unter anderem abhängig von der Dichtigkeit (Luftdichtheit) des Zuges.

Darüber hinaus kann die Druckwelle auch Mikro-Druckwellen (MPW), einen sogenannten Tunnelknall verursachen: ein lautes Geräusch, welches auftritt, wenn der Zug den Tunnel verlässt.

Um den Tunnelknall zu verhindern und sicherzustellen, dass der akustische Passagierkomfort gewährleistet ist, sind bestimmte Voraussetzungen bei Gestaltung des Tunnelquerschnitts und des Tunnelportals zu berücksichtigen.

Daher wurde bereits in der ersten Entwurfsphase (2009 bis 2011) das Planungsteam RAT-JV regelmäßig mittels Analysen von Zug-induzierten Druckschwankungen von Professor Alan Vardy unterstützt. Professor Alan Vardy ist ein international anerkannter Experte auf dem Gebiet aerodynamischer Aspekte. Darüber hinaus berechnete Professor Vardy die Druckschwankungen für den aktuellen Tunnelentwurf und steuerte sein Expertenwissen bei.

Ramboll-Arup-TEC JV
C/o Rambøll Danmark A/S
Hannemanns Allé 53
DK-2300 KOPENHAGEN S
DÄNEMARK

T +45 5161 1000
F +45 5161 1001
www.ramboll.com

Ramboll-Arup-TEC JV
C/o Rambøll Danmark A/S
DK reg.no. 32269036

Dieses Memo bietet eine kurze Beschreibung der Entwurfskriterien für den Bahntunnel, die dazu dienen den Tunnelknall und mögliche akustische Auswirkungen zu verhindern. Es stellt außerdem das Ergebnis der durchgeführten Analysen und die Vermeidungsmaßnahmen vor, die in den Tunnelentwurf eingeflossen sind.

Der Abschlussbericht von Professor Vardy bezüglich Tunnelknall ist dem Memo beigelegt (siehe AERODYNAMIC DRAG AND TRAIN-INDUCED PRESSURES IN THE PROPOSED FEHMERN LINK CROSSING, Phase-4 Report-B: Extended entrance regions, 3rd October 2011).

2. Zug-induzierte Druckschwankungen

Erste Analysen von Zug-induzierten Druckschwankungen waren Grundlagen für die Konzeption der Eisenbahnrohre und des Tunnelportals für den Fehmarnbelt-Tunnel. Neben der Vermeidung des Tunnelknalls, war auch die Sicherstellung eines hohen akustischen Komforts für die Zugpassagiere Grundlage der Planung.

2.1 Tunnelknall

Das mögliche Auftreten des Tunnelknalls ist abhängig von dem Schallimpuls, der aus schnellen Druckänderungen an der Rückseite des Zuges entsteht, wenn der Zug den Tunnel verlässt. Der Tunnelknall entsteht durch das Freisetzen von Schallenergie, ähnlich wie bei einem Flugzeug, welches die Schallmauer durchbricht.

Der Tunnelknall tritt in der Regel bei Hochgeschwindigkeitszügen und langen Tunneln auf. Das Auftreten eines Tunnelknalls wird in der Praxis als nicht als sehr wahrscheinlich angesehen, wenn die Zuggeschwindigkeit auf maximal 200 km/h begrenzt ist. Jedoch zeigten einige frühe Analysen von Professor Vardy zum Fehmarnbelttunnel ein mögliches Risiko für einen Tunnelknall, so dass weitere Untersuchungen durchgeführt wurden. Das mögliche Tunnelknallrisiko wurde von Professor Vardy basierend auf einer zulässigen MPW-Amplitude von 10 Pa in einem Abstand von 10 m von der Portalausfahrt definiert.

Das mögliche Tunnelknallrisiko kann durch folgende Maßnahmen minimiert werden:

- Einen sich ausweitender Bahntunnelquerschnitt im Einfahrts- bzw. Ausfahrtsbereich.
- Druckentlastungsöffnungen im Einfahrtsbereich.
- Perforierte Trennwände zwischen den Röhren.
- Schotteroberbau anstelle Feste Fahrbahn.

Auch im Falle eines bestehenden Tunnels gibt es verschiedene Minimierungsmaßnahmen, die von der Reduzierung der Zuggeschwindigkeit während der Einfahrt in den Tunnel bis zu verschiedenen Druckentlastungssystemen in Form von Öffnungen oder Überdruckventilen reichen.

2.2 Akustischer Komfort der Passagiere

Einige Passagiere könnten ein akustisches Unbehagen beim Einfahren oder Verlassen eines Tunnels empfinden. Dies ist verbunden mit Druckschwankungen im Inneren des Zuges, das

beim Einfahren oder Verlassen des Tunnels oder auch im Tunnel selbst, auftreten. Das Phänomen ist ähnlich, wie die eintretende Druckänderung während des Start oder der Landung in einem Flugzeug die beim Anpassen des Kabinendrucks entsteht.

Wenn ein Zug in den Tunnel einfährt, wird der Luftdruck im Tunnel nur leicht ansteigen. Dies ist spürbar, wird aber in der Regel nicht als unangenehm empfunden. Das mögliche Problem liegt in dem "Verhalten" der Druckwelle, die, ausgelöst durch die Änderung des Luftdrucks, durch den Tunnel läuft. Diese Druckwelle bewegt sich im Bereich der Schallgeschwindigkeit und neigt dazu, bei sich ändernden Randbedingungen (überwiegend am Tunnelportal) zu reflektieren (Echo). Dies kann Veränderungen und Schwankungen des Luftdrucks im Tunnel und im Inneren eines Zuges (abhängig von der Dichtigkeit der Waggonen) verursachen.

Der akustische Komfort ist in hohem Maße von der Dichtigkeit der Züge abhängig. Moderne Hochgeschwindigkeitszüge weisen bereits eine sehr hohe Dichtigkeit auf.

Der Druckdichtigkeitskoeffizient τ wird benutzt, um die Abdichtungsqualität von Zügen zu bestimmen. Er beschreibt die Zeit, die benötigt wird, um den Unterschied zwischen dem internen und die externen Druck auszugleichen. Moderne Hochgeschwindigkeitszüge weisen einen τ -Wert von >10 Sekunden auf.

2.3 Richtlinie für den akustischen Komfort

Die UIC-Code 779-11 vom Februar 2005 enthält Angaben zu Passagierbehaglichkeitskriterien für neue Bahntunnel in Europa. Die Richtlinien basieren auf internationale Erfahrungen mit verschiedenen Arten von Zügen und Tunneln. Die Basisdruckbehaglichkeitskriterien für einen eingleisigen Tunnel sind:

Nicht abgedichtete Züge ($\tau_{\text{dyn}} < 0,5$ s):

- $\Delta p \leq 3$ kPa in 4 s

Abgedichtete Züge ($\tau_{\text{dyn}} > 0,5$ s):

- $\Delta p \leq 1$ kPa in 1 s
- $\Delta p \leq 1,6$ kPa in 4 s
- $\Delta p \leq 2$ kPa in 10 s

Diese Werte sind Empfehlungen, die sicherstellen, dass die große Mehrheit der Passagiere während der Fahrt durch Tunnel keine erheblichen Beschwerden erfahren.

Im UIC-Code ist auch ein Gesundheitskriterium definiert, nachdem die maximale Druckänderung (Spitzenwert) für die Fahrgäste und Besatzung während der Zeitdauer, die der Zug den Tunnel passiert, nicht mehr als 10 kPa betragen darf.

Dieses Kriterium ist verpflichtend für Geschwindigkeiten von über 200 km/h, um das Risiko zu minimieren, dass ein Passagier mit körperlichen oder gesundheitlichen Gehöreinschränkungen Schaden erleidet.

Die vorbeschriebenen Grenzwerte für Druckänderungen liegen weit unterhalb der Werte, die für gesunde Menschen ein Sicherheitsrisiko darstellen würde.

3. Analysen und Entwurfentwicklung

Während der Entwurfsphase wurde das Entwurfsteam RAT-JV von Professor Vardy unterstützt, der sowohl die erforderlichen Berechnungen zur Bewertung des Risikos des Tunnelknalls und die Auswirkungen auf den akustischen Komfort der Passagiere als auch für weitere luftdruckverursachte Effekte durchgeführt hat, die Auswirkung auf den Bahntunnelentwurf und –betrieb haben könnten.

3.1 Grundlegende Annahmen

Die Berechnungen von Professor Vardy beruhen auf sämtlichen relevanten und grundlegenden Annahmen aus dem Tunnelentwurf.

Die Druckeinwirkungen wurden für 3 verschiedene Kategorien: einen Regionalzug, einen Hochgeschwindigkeitszug und einen Güterzug berechnet. Die möglichen Auswirkungen wurden mit Hilfe eines sog. „State-of-the-Art“ Modells analysiert.

Für jede dieser Zugkategorien wurde eine umfassende Sensitivitätsstudie durchgeführt, um die Auswirkungen von Abweichungen für folgende Merkmale zu ermitteln:

- Zuggeschwindigkeit;
- Querschnitt des Tunnels;
- Dichtigkeit der Züge;
- Länge der Züge;
- Querschnitt des Zuges;
- Reibungskoeffizient.

3.2 Ergebnisse

Akustischer Komfort der Passagiere

Die Ergebnisse der Analysen zum akustischen Komfort der Passagiere zeigen, dass Druckschwankungen für den geplanten FBQ-Bahnquerschnitt begrenzt sind und die im UIC Code empfohlen Behaglichkeitskriterien und die Kriterien zur Vermeidung von körperlichen Beeinträchtigungen eingehalten werden. Die Untersuchungen basieren auf einer für den jetzigen Zeitpunkt repräsentativen Dichtigkeit von Personenzügen. Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahmen werden die Züge wahrscheinlich eine höhere Dichtigkeit als heute besitzen und somit einen noch einen besseren Komfort bieten.

Tunnelknall

Die ersten Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen im Jahr 2011 konnten das Risiko von Tunnelknall nicht völlig ausschließen, so dass anschließend weitere Untersuchungen durchgeführt und Maßnahmen wie die Aufweitung des Bahntunnelquerschnitts im Tunnelportalbereich oder der Anordnung von Druckentlastungsöffnungen im Portalbereich untersucht wurden.

Das Ergebnis dieser zusätzlichen Untersuchungen hat eindeutig gezeigt, dass die Aufweitung des Querschnitts zum Tunnelportal nur einen begrenzten Effekt auf die Druckschwankungen

hat. Daher wurden vorsorglich Druckentlastungsöffnungen in dem Portalbereich der Eisenbahnröhren vorgesehen.

4. Maßnahmen zur Kontrolle von Druckschwankungen

Wie zuvor beschrieben, zeigen die Berechnungen von Professor Vardy ein mögliches Tunnelknallrisiko. Es wurden daher vorsorglich zusätzliche bauliche Maßnahmen im ersten Abschnitt der Bahnrohre vorgesehen, um den Druckaufbau und die Druckschwankungen kontrollieren zu können.

Die Genehmigungsplanung der Portalbereiche enthält daher gleichmäßig verteilte Druckentlastungsöffnungen entlang des Tunnelportalbereiches. Die Öffnungen verhindern einen schnellen Druckaufbau, der den Tunnelknall verursachen könnte und bieten darüber hinaus auch einen besseren akustischen Komfort für die Passagiere.

Der Lageplan aus den Planfeststellungsunterlagen (Anlage 7.1, Blatt 8) zeigt das Layout auf Fehmarn für den 150 m langen Portalbereich mit insgesamt 15 Öffnungen für jede Bahnrohre.

Wie zu sehen ist, werden die Druckentlastungsöffnungen auch am Tunnelausgang vorgesehen. Diese Maßnahme geht vorsorglich über die Empfehlungen des Berichts Phase 4b von Professor Vardy hinaus. Die Anordnung der Druckentlastungsöffnungen im Einfahrts- und auch Ausfahrtsbereich bieten eine zusätzliche Sicherheit für das Druckentlastungssystem.

AERODYNAMIC DRAG AND TRAIN-INDUCED PRESSURES IN THE PROPOSED FEHMERN LINK CROSSING

Phase-4 Report-B: Extended entrance regions

Alan Vardy, 3rd October 2011

SUMMARY

The evolution of a train nose-entry wavefront propagating along an extended entrance region of the Fehmern Link Tunnel is illustrated. It is shown that a 150 m long region would be just long enough to prevent unacceptable noise disturbance from the tunnel exit portal even if no complementary countermeasures were adopted at other locations. Leakage holes that would achieve this outcome are identified. The key parameter is the resistance to flow through the holes, but inertial factors are also found to be relevant. These conclusions have led to the identification of generic forms of suitable geometrical configurations of the leakage holes. The proposed configurations combine aerodynamic effectiveness with flexibility for future adjustments if required. However, the scope for allowing for future increases in train speed is limited.

1 BRIEF

- 1.1 The writer has been commissioned by Ramboll-Arup-TEC JV (RAT) to advise on aerodynamic phenomena in a tunnel for the proposed Fehmern Link Crossing. This report gives an outline design for a portal entrance region that would minimise the risk of radiating unacceptable pressure disturbances - “sonic booms” or “Micro pressure waves (MPWs)” - from the tunnel exit even if no complementary measures were undertaken elsewhere in the tunnel.
- 1.2 RAT has defined the base tunnel geometry, including provisional proposals for 150 m long flared and perforated portal regions. High-speed trains pose the greatest risk of unacceptable MPWs so this report deals exclusively with these. The assumed train speed is 200 km/h. RAT has requested this reduction from the speed of 250 km/h assumed in “Phase-3 Report-B: Assessment of the risk of sonic booms”.
- 1.3 It is assumed herein that readers are familiar with the content of previous reports to RAT by the writer, especially the Phase-3(B) report.

2 TUNNEL AND TRAINS

- 2.1 The overall tunnel geometry assumed herein is identical to that defined in the Phase 3(B) report. For reasons given therein, no account is taken of changes in elevation along the tunnel.
- 2.2 The train assumed in the simulations is representative of a modern high speed train. It is assumed to be (at least) 200 m long and to have a cross-sectional area of 10 m². Its skin friction coefficient is assumed to be $f_z = 0.0035$ (so $\lambda_z = 0.014$). The predicted

outcomes will exhibit a moderate sensitivity to these assumed values, but not sufficient to merit a dedicated sensitivity study at this stage of the design process.

- 2.3 A more important property of the train is the shape of its nose. It is nearly certain that a modern train nose will be sufficiently well streamlined to avoid strong boundary layer separations during entry to a tunnel. Indeed, the nose will be significantly more gentle than would be necessary for this purpose alone. The important dimension for present purposes is the *length* of the nose. For the base case simulations presented herein, the nose is approximated by a linear increase of area over a nominal length of 5 m.

PORTAL REGIONS

- 3.1 In common with the Phase 3(B) report, it is assumed that the tunnel will have 150 m long entrance and exit regions. The overall geometrical configuration is assumed to be as shown in the file "*RAT 523-216.01-A sketch.pdf*". The cross-sectional area of the tunnel varies uniformly from 44 m² at the portal to 36 m² at the connection to the bored tunnel region.
- 3.2 There are 16 box-like shafts from the surface to the tunnel roof. These are at approximately 9.4 m centres and are provisionally assumed to have horizontal cross-sections 5m x 5m. One purpose of this report is to propose a possible form of the required aerodynamic links between the boxes and the tunnel interior.
- 3.3 For the simulations reported herein, there are aerodynamic connections between the boxes and each tunnel - i.e. the entrance region and the exit region. The detailed design of these connections should be determined interactively, allowing for structural as well as aerodynamic considerations. For simplicity, it is assumed herein that each connection will be just one large hole, but it would be possible (indeed, aerodynamically preferable) to have two or more smaller holes instead.
- 3.4 It is proposed that each hole in the concrete roof slab should be between 2 m² and 3 m², namely approximately double the desired area for flow. The actual flow area would be achieved by bolting (steel) plates or grids to the upper face of the slab. Some possible configurations are shown in the following hand-drawn sketch (Fig.1).

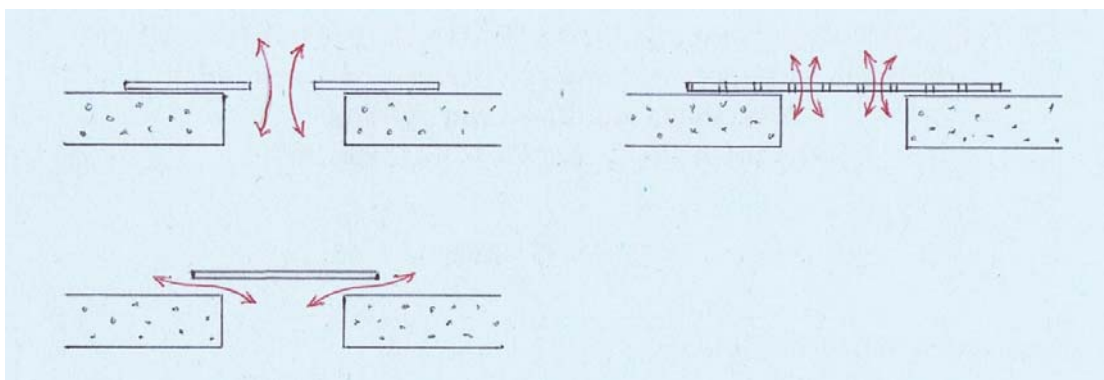


Fig-1: Possible geometrical configurations of suitable leakage holes

- 3.5 There are several reasons for having over-large holes and using plates/grids to restrict the areas available for flow. From an aerodynamic point of view, the most important reason is that the effective inertial mass of the flow through the holes should be as small as reasonably practicable. That is, the overall momentum of the required airflows through the holes should be minimised. The 5m x 5m boxes are ideal in this respect because the required velocities (and hence accelerations) will be small. The average velocities through the roof slab itself will be much larger than in the boxes, but it will nevertheless be significantly smaller than in the most constricted regions of flow - i.e. in vena contractas shortly after passing through the plates/grids.
- 3.6 There are other important advantages of the proposed configuration. These arise from the relatively straightforward opportunity that they provide for future adjustments. Such changes could be needed, for instance, if future operation calls for higher speed trains or for changes to the assumed direction of travel. In principle, they could even be needed to fine-tune the holes during commissioning of the initial tunnel (although it is hoped that this will not be necessary).

4 DESIGN TARGET

- 4.1 The ultimate purpose of extended entrance regions is to cause the train-entry pressure wavefront to elongate so much that it cannot steepen unacceptably during subsequent propagation along the tunnel. To develop a suitable design, it is necessary to choose an acceptable steepness of the wavefront on arrival at the tunnel exit.
- 4.2 The amplitude Δp_{MPW} of the micro-pressure wave (MPW) at a distance r outside a simple exit portal of area A_T is approximately proportional to the steepness of the pressure wavefront arriving at the portal. For design purposes, the following relationship derived from areo-acoustics theory may be used (Vardy, 2008):

$$\Delta p_{MPW}(r,t) = \frac{2A_T}{\Omega rc} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{wave} \quad \dots \text{(Eq-1)}$$

where Ω is the solid angle subtended at the portal by the external environment and c denotes the speed of sound.

- 4.3 This relationship is only approximate and it can be used only for relatively low-frequency effects (below the audible range, for instance). Nevertheless, it is considered to be adequate for present purposes, especially as:
- (i) the shape of the arriving wavefront cannot be known with sufficient detail to utilise any nominally more accurate expressions; and
 - (ii) experience in Japan has shown that small amplitude MPWs do not tend to emit unacceptable amounts of energy at high frequencies.
- 4.4 Suppose that the allowable amplitude of the MPW is assumed to be 10 Pa at a distance of 10 m from the portal. In this case, Eq-1 may be used in the manner described by Matsubayashi, *et al* (2000) to show that the maximum acceptable steepness of any part of the wavefront arriving at the exit will be approximately 3 kPa/s. This is a more stringent condition than is usually chosen, but the location of

the outlet portal (i.e. close to road tunnel portals) is unusual. Also, at this stage in the design process, it is prudent to err on the safe side rather than to design to criteria that might be found to be inadequate at a later date,

- 4.5 Assuming (i) a 3 kPa/s limit and (ii) simple inertial steepening of the wavefront along the 18 km tunnel, the corresponding maximum allowable steepness of the wavefront at the downstream end of the entrance region is approximately 1.25 kPa/s - so this is the required design target.

5 PREDICTED PRESSURE HISTORIES

- 5.1 Figure-2 depicts pressure histories at successive locations along an entrance region during train-entry. These histories do not satisfy the required design condition, but that is unimportant because they are *not* indicative of expected conditions in a well-designed tunnel. Instead, the example is used to illustrate important behaviour to which attention is drawn in the following paragraphs.

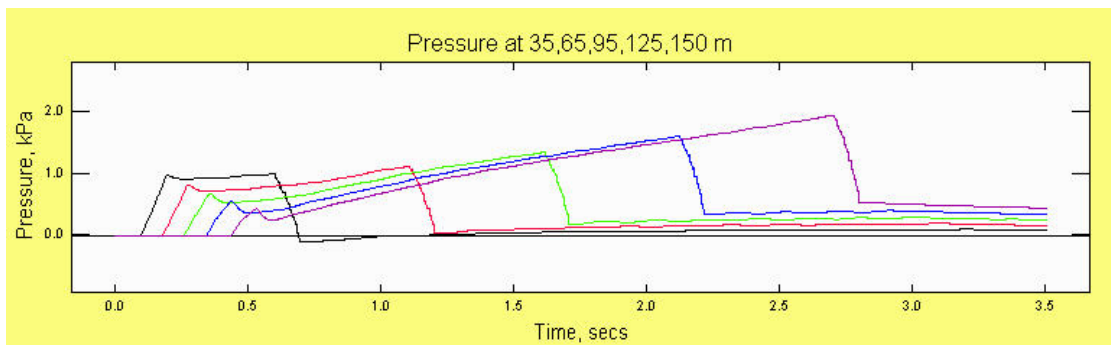


Fig-2: Predicted pressure histories - unsuitable leakage holes

- 5.2 The predicted pressure histories have the general form of a trapezium. This is especially obvious at upstream locations, but it is also true at downstream locations. (*NB: Temporarily, please ignore the strong overshoot at the head of the wavefront*). The leakage holes tend to reduce the leading step of the trapezium strongly and consequently to increase the average gradient of the main ramp. Ideally, the leading step should reduce to zero at the end of the region.
- 5.3 In this example, the hole areas are slightly smaller than optimum and hence the total leakage is too small. As a consequence, there is a finite leading step even at the end of the region. The pressure gradient along the ramp itself easily satisfies the required criterion, but the gradient associated with the leading step is far too large. It would have unacceptable consequences at the tunnel exit.
- 5.4 Conversely, if the hole areas were greater than optimum, too much leakage would occur and the overall length of the pressure ramp would be smaller than necessary. The leading step would be eliminated, but the overall pressure gradient along the main ramp would be greater than with optimum hole areas.
- 5.5 Now consider the strong overshoot at the tip of the wavefront. This exists in addition to the simple trapezium-like step considered above. The conditions assumed in the

simulation have been deliberately chosen to exaggerate the effect, but the phenomenon has physical meaning and it needs to be allowed for in design.

- 5.6 One cause of the exaggerated importance of the overshoot in Fig-2 is the use of a flat-fronted train nose in the simulation whereas real high speed trains have elongated noses. A second cause is an allowance for relatively high inertia of flows through the holes. One purpose of the designs presented in Section-3 for leakage holes (e.g. Fig-1) is to minimise this effect.
- 5.7 Figure-3 shows predicted pressure histories allowing for a configuration that nearly complies with the proposed pressure gradient criterion. In this example,
- (i) the train nose is elongated over a nominal length of 5 m;
 - (ii) the inertia of leakage flow is smaller than in Fig-2;
 - (iii) the total area of the leakage holes slightly exceeds the theoretical optimum.
- All of these conditions are consistent with the proposed design.

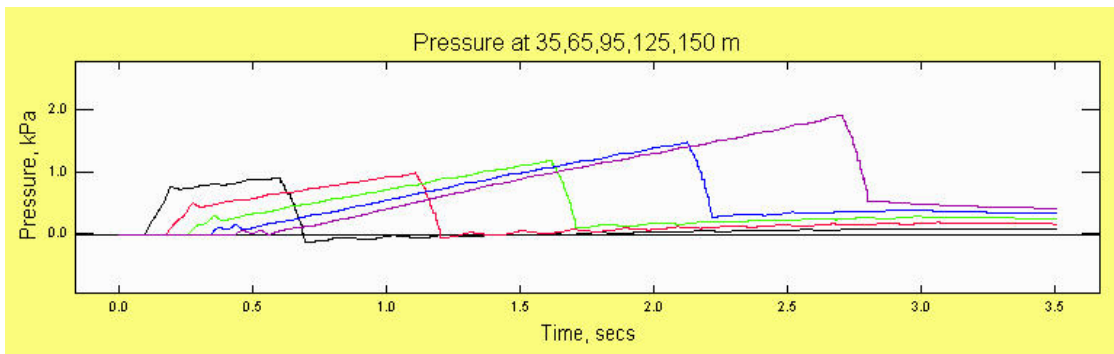


Fig-3: Predicted pressure histories - reasonable leakage holes (but not optimal)

- 5.8 By inspection, the overall ramp is about 20% shorter than the theoretical optimum. Other simulations (not shown) approach the theoretically achievable optimum more closely, but there is a strong practical reason for *not* attempting to achieve the aerodynamic optimum. To explain the reason for this, imagine that the real tunnel is built closely to a predicted optimum design. Then consider the possible impact of *small* errors in the predictions. Such errors are always possible in engineering designs so it is proper to consider their potential consequences.
- 5.9 First, suppose that true leakage flows exceed the predicted values. In this case, the true outcome will be a small, relatively unimportant, reduction in the overall length of the ramp (as in Fig-3). Conversely, suppose that the true flows are smaller than the predicted values. In this case, the true outcome would include a step at the tip of the ramp (as in Fig-2) and would therefore have potentially serious consequences at the tunnel exit. Clearly, it is much more important to avoid the risk of serious consequences than to guard against relatively minor consequences - hence the choice of leakage areas used in Fig-3.
- 5.10 Figures-2 and 3 show pressure histories whereas the design criterion applies to pressure *gradients*. Figure-4 shows the evolution of predicted rates of change of pressure at the end of the entrance region for the example used in Fig-3. The average rate of change in the main ramp is about 1 kPa/s and the maximum is close to the target limit. There are pronounced fluctuations in the predicted values, but these are

acceptably small. The dominant periodicity in the signal is the about 0.17 s, which is the time required for the train to travel the distance between successive holes. Further simulations (not shown) with two half-sized holes instead of each full-sized hole predict much smaller fluctuations.

- 5.11 Just ahead of the main ramp (i.e. between about 0.4 s and 0.6 s), the predicted rates of change exceed the target limit. However, as shown in Fig-3, the absolute pressures in this period are small (less than 0.1 kPa) and the overall events are short-lived (comparable with the times required for sound to travel one tunnel diameter). It is intuitively unreasonable to suppose that such events would cause unacceptable conditions after propagating along 18 km of tunnel. Furthermore, it is known that the one-dimensional method of analysis tends to exaggerate fine details such as this (Vardy & Howe, 2009) during the earliest stages of nose-entry. Accordingly, the writer considers that little account should be taken of these predicted violations of the proposed criteria. The compliance with the criteria throughout the subsequent build-up of pressure in the main ramp is much more important.

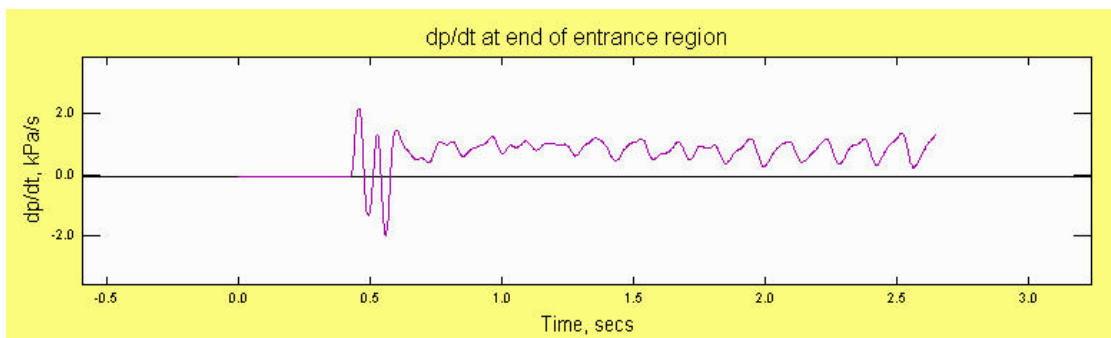


Fig-4: Predicted rates of change of pressure - (same example as Fig-3)

6 SUPPLEMENTARY COMMENTS

- 6.1 These predictions suggest that the proposed design of the entrance region is close to a practical optimum for the chosen train speed. In particular, the entrance length is just sufficient to enable the overall rate of change to be maintained below the target value. Also, the holes permit enough excess flow to avoid unacceptable risk of a significant step (or strong peak) at the tip of the ramp even after allowing for uncertainties in the theoretical modelling. Furthermore, this outcome has been achieved even with the following pessimistic assumptions:
- (i) subsequent steepening along the tunnel is the maximum possible;
 - (ii) no allowance is made for attenuation in the exit region;
 - (iii) the relatively stringent exit criterion defined in paragraph 4.4 is adopted.
- 6.2 This is a strong outcome. Nevertheless, it is prudent to aware of possible limitations of the design. The most important of these is that the entrance region is only just long enough to achieve the desired goal with a train speed of 200 km/h. It was shown in the Phase 3(B) report that it would not be sufficient for trains travelling at 250 km/h. There are two reasons for this. First, train-induced pressures vary approximately with the square of the speed. Second, the relevant timescales vary inversely with the train speed. As a consequence, pressure gradients vary approximately with the cube of the

speed. Thus, a 25% increase in train speed implies an increase of almost a factor of two in the minimum achievable average pressure gradient at the end of an entrance region of prescribed length.

- 6.3 Suppose that suitable measures along the tunnel or in the exit portal region were deemed to be sufficient to enable a doubling of the upstream gradient to be considered acceptable. In this case, it would nevertheless be necessary to increase the size of the leakage holes to enable the optimum condition to be approached with larger pressures than those considered herein. The ability to make this change is an important benefit of the configurations proposed in Section-3 and typified in Fig-1.
- 6.4 For completeness, it is re-emphasized that the method of analysis used herein includes some uncertainty, especially regarding the behaviour of highly unsteady flows through the leakage holes. *Steady* flows through orifices can be modelled quite well, but suddenly accelerating flows involve strong changes to flow patterns over timescales that are potentially important. The writer has confidence in the overall design proposed herein, but he would have less confidence if the holes were formed solely in the concrete roof slab instead of in the manner described in Section-3 - thereby (i) being unadjustable and (ii) causing greater inertia.
- 6.5 It is assumed herein that there is no discontinuity in the cross-sectional area where the 150 m entrance region joins the main tunnel. That is, both areas are assumed to be 36 m². If this assumption is incorrect, consideration will need to be given to the consequences of any discontinuity. In this context, a discontinuity in the *shape* of the tunnel cross-section is unimportant, but a discontinuity in area could be significant.

7 RECOMMENDATIONS

- 7.1 To use an extended entrance region to ensure desirable conditions at the tunnel exit, it is necessary to limit rates of change of pressure to a maximum of about 1.25 kPa at the end of the region.
- 7.2 For a tunnel with a cross-sectional area of 36 m² and a train speed of 200 km/h, this limiting rate of change of pressure can be achieved with a 150 m long entrance region.
- 7.3 The geometrical configuration of the entrance region proposed by RAT (see drawing "*RAT 523-216.01-A sketch.pdf*") provides a suitable basis for an optimum design. Aerodynamic paths are required through the tunnel roof slab to 5m x 5m shaft/boxes shown in the drawing.
- 7.4 The required area of flow at the most restricted location in each connection is approximately 1 m² ~ 1.25 m². It is proposed that these restrictions should be created by mounting suitable steel plates above significantly larger holes through the roof slab itself. This arrangement is aerodynamically superior to simple (smaller) holes on the roof slab, it offers flexibility for future generations and it makes possible adjustment during commissioning.

8 REFERENCES

- Matsubayashi,K, Brown,JMB & Vardy,AE (2000) ‘Sonic booms - do I have a problem?’, *Proc 10th int symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, USA*, 1-3 Nov, BHR Group, 185-202
- Vardy,AE (2008) ‘Generation and alleviation of sonic booms from railway tunnels’, *Engineering & Computational Mechanics, Proc ICE*, **161** (EM3), 107-119
- Vardy,AE & Howe,MS (2009) ‘Rapid prediction of train nose entry pressure gradients’, *Proc 13th int symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, USA*, 13-15 May, Ed: IA Sweetland, BHR Group, 429-443

Alan Vardy, 3 October 2011