

# AERODYNAMISKA BERÄKNINGAR FÖR HÖGHASTIGHETSBANAN ÖSTLÄNKEN

## Aerodynamic simulations for the high speed railway project Ostlänken

*Linda Tegehall, ÅF*

*Rikard Gothäll, Tyréns*

*Jan Östh, ÅF*

*Karl-Johan Loorentz, Trafikverket*

*Tomas Karlberg, ÅF*

*Fredrik Jareman, ÅF*

### Sammanfattning

Höghastighetsbanor kommer innebära helt nya förutsättningar för tunnlar och de installationer och system som anläggs i tunnelarna. I denna artikel beskrivs hur konsortiet ÅF/Tyréns arbetar med att simulera aerodynamiken kring ett höghastighetståg i en fiktiv tunnel av den storlek som förväntas byggas i projekt Ostlänken. Resultat från de första omgångarna simulationer presenteras och det diskuteras hur resultaten står sig i förhållande till de krav som ställs på anläggningarna och hur det kommer att inverka på utformningen av anläggningarna.

### Abstract

High speed railways will pose new challenges for tunnels and the installations and systems that will be built in those tunnels. In this paper the method of the ÅF/Tyréns consortium simulations of the aerodynamic effects of a high speed train in a type tunnel is presented. Results from the first simulation runs is compared to regulations and the effects on future design choices are discussed.

## 1 Inledning

Projekt Ostlänken är den nordligaste delen i ett framtida svenskt järnvägsnät för höghastighetståg. Från Järna till Linköping, en sträcka om ca 15 mil, ska trafik i 320 km/h vara möjlig någon gång i slutet av 2020-talet. Ostlänken kommer totalt sett att innefatta ett stort antal tunnlar med varierande längd, från ett par hundra meter upp till drygt 5 km. Den samlade längden bergtunnel blir högst sannolikt över 20 km. En utmaning inom tunneldesign, som blir betydligt större när tunnlar ska dimensioneras för höga hastigheter, är tunnelarnas aerodynamiska

utformning. Frågor såsom tåggeometri, trycktröga tåg, fri area i tunnlar, tunn-  
lars ytråhet, vindhastighet vid tågpassage och tryckpåverkan på installationer i  
tunnlar är exempel på frågor som påverkar våra framtida höghastighetstunnlar.  
En välkänd problematik vid tågtrafik i tunnlar över 200 km/h är det som kallas  
tunnelknall, ett aerodynamiskt fenomen som uppstår då den tryckvåg som alst-  
ras vid tågpassage når en fri yta vid en tunnelmynning. Tunnelknallfenomenet  
resulterar i ett oönskat dovt buller som av människor kan uppfattas på ett lik-  
nande sätt som den knall som uppstår när ett flygplan bryter igenom ljudvallen.  
Internationellt hanteras problemet vanligen med olika typer av perforerade tun-  
nelportalkonstruktioner, aerodynamiskt utformade tåg eller vidgning av tunnel-  
sektioner. I miljöer där det ställs hårda bullerkrav är tunnelknallproblematiken  
trots dessa åtgärder en begränsande faktor i hur hög hastighet som kan tillåtas.

I samband med systemhandlingsprojekteringen av Ostlänkens delprojekt 4 har  
ÅF/Tyréns i uppdrag av Trafikverket att ta fram förslag på hur tunnelutform-  
ningen i stället kan anpassas i berget, och därigenom förhindra att tunnelknallfe-  
nomenet uppstår. Ett första steg i processen att ta fram utformningsförslag inne-  
fattar genomförande av CFD-beräkningar (Computational Fluid Dynamics), där  
olika typer av tunnelpåslagslösningar analyseras. Med hjälp av CFD-tekniken  
kan förändringar i lufttrycket vid tågpassager beräknas och visualiseras i 3D för  
olika geometriförslag. Tanken är att utformningen av tunnlar påslag, beroen-  
de av bl.a. geologiska förutsättningar och bergtäckning, ska kunna anpassas med  
hjälp av typlösningar för att undvika tunnelknallproblematiken. Beräkningarna  
utförs under hösten 2015 och våren 2016 och förslag på utformning av tun-  
nelpåslag kommer att vara färdiga i andra halvan av 2016.

Många av de internationella banor som projekt Ostlänken hämtar kunskap i från  
har tunnlar som har klätts in med heltäckande betongelement av bergtekniska  
skäl. Det har gett upphov till tunnlar med konstant tvärsnitt och låg friktion  
vid luftflöden genom tunneln. Motsvarande förhållanden är mindre vanliga i  
Sverige varför det är troligt att många av tunnlar kan utföras som konven-  
tionella bergtunnlar med varierande tvärsnitt och högre ytråhet. Skillnaderna i  
förutsättningar skapar möjlighet att utnyttja utrymmen kring tunneln som inte  
har varit tillgängliga i andra projekt. Inom projekt Ostlänken undersöks därför  
om åtgärder för att minska buller och tryckpulser kan placeras i berg snarare än  
utanför tunnelmynningarna.

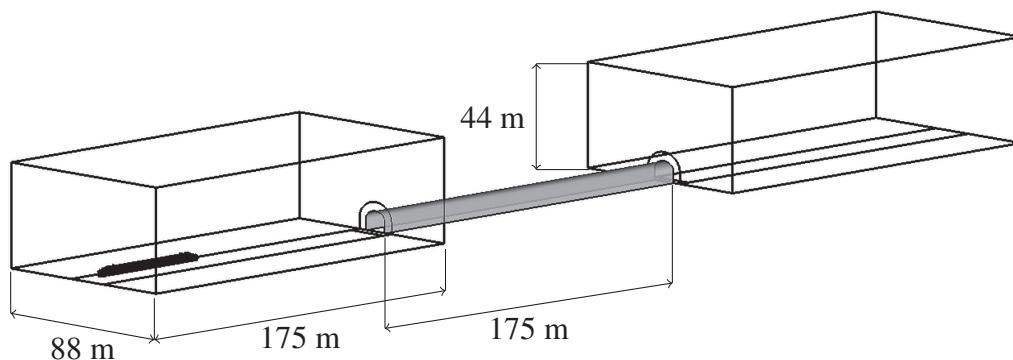
De analyser som presenteras i denna artikel är en första del av en serie analyser  
i projekteringen av Ostlänken. Syftet med dessa analyser har varit att utvärdera  
ett antal principer för buller- och tryckreducerande åtgärder i en fiktiv tunnel.  
Målsättningen är att skapa ett projekteringsunderlag inför en kommande detalj-  
projektering. I senare skede skall lösningarna verifieras med ytterligare beräk-  
ningar för de faktiska anläggningsdelar som projekterats fram.

## 2 Metod

Tryckpulserna som uppstår när tåg åker i tunnlar predikteras med strömningsmekaniska beräkningar (eng. Computational Fluid Dynamics – CFD). Dessa beräkningar löser de styrande Navier-Stokes ekvationerna numeriskt. Beräkningsmetoden består av tre delar. Först definieras en beräkningsdomän som täcker in de delar av systemet som ska ingå i simuleringen. Systemet diskretiseras sedan genom att dela upp domänen i ett stort antal mindre volymer som alla innehåller en diskretiseringspunkt vardera. Denna uppdelning utgör det beräkningsnät som används vid simuleringen. Det tredje steget består av att definiera de specifika randvillkor och modeller som krävs för att fånga de fysiska fenomen man är intresserad av. [1]

### Beräkningsdomän

Beräkningsdomänen presenteras i figur 1. Domänen består av tre delar, en inloppsdomän (till vänster i figuren) där tåget startar, en utloppsdomän med tågets slutposition och en dubbelspårstunnel som sammanbinder de båda domänerna.



Figur 1: Beräkningsdomän med in- och utloppsdomän och en dubbelspårstunnel.

*Computational domains composed of an entrance and exit domain and a double-track tunnel.*

Tåget som används i simuleringarna är ett modernt snabbtåg, Siemens ICE3, som är 60,6 m långt och färdas i 320 km/h. Tåggeometrin är förenklad utan strömvagnar och med övertäckta boogies och mellanrum mellan vagnarna. Vidare är ej heller rälsen eller andra objekt i tunneln inkluderade, utan geometrin är helt slät. Dessa förenklingar görs för att spara beräkningskraft. Tåget är placerat ca 100 m från tunnelmynningen så att flödet runt tåget skall hinna bli

fullt utvecklat innan tåget når fram till tunneln. Höjden och bredden på inloppsdomänen är tillräckligt stora för att undvika att effekter från domängränserna påverkar flödet runt tåget. Det samma gäller för utloppsdomänen. Tunneln är en dubbelspårstunnel med en tvärsnittsarea på  $91 \text{ m}^2$  och en längd på 175 m. Tunnelns längd är vald utifrån att vara tillräckligt lång för att det skall vara möjligt att studera tryckpulserna som bildas när tåget kör in och ut ur tunneln, men samtidigt inte bli för beräkningskrävande. Tåget framförs på vänster sida av dubbelspåret, på den linje där rälsen är tänkt att ligga.

## Beräkningsnät

Domänen delas in i mindre volymer, celler, som utgör beräkningsnätet. För att på ett noggrant sätt kunna simulera luftens rörelser runt tåget koncentreras cellerna runt tåget, vid tunnelmynningarna och inuti tunneln. Beräkningsnätet visas i figur 2, figur 3 och figur 4. Nätet består av polyhedrala celler. Närmast tåget är nätets uppbyggt av fem lager med prismor, för att lösa upp gränsskiktet närmast tåget. Därefter övergår nätet till polyhedrala celler. Framför och bakom tåget samt i tunneln är cellerna strukturerade hexaedrar som är utsträckta i tryckpulsernas utbredningsriktning. Längre ut i domänen består nätet av polyhedrala celler. Beräkningsnätet består totalt av drygt 40 miljoner celler.



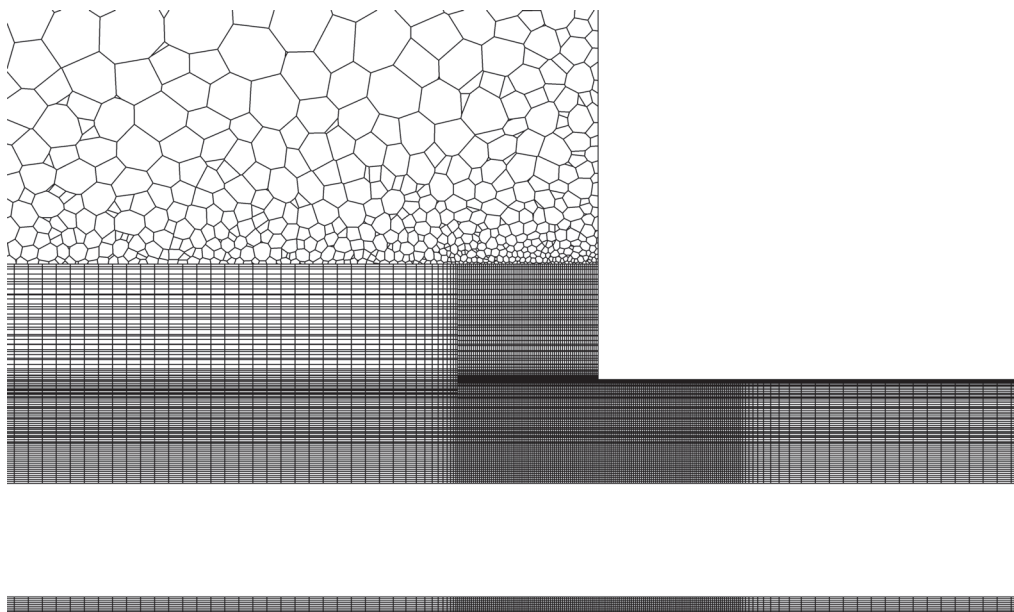
Figur 2: Översiktsbild av beräkningsnätet med tåget mitt i tunneln.

*Overview of the computational mesh with the train in the middle of the tunnel.*

För att hantera tågrörelsen används en rörlig beräkningsdomän. Domänen delas upp i en stillastående och en rörlig del med ett interface däremellan som kopplar samman de båda delarna. Den del av beräkningsnätet som är närmast tåget rör sig med samma hastighet som tåget.

## Modeller och randvillkor

Programvaran som används för simuleringarna är Ansys Fluent. Luftflödet som skapas när ett tåg åker genom en tunnel är starkt tredimensionellt och turbulent med kraftiga virvlar runt omkring och bakom tåget. Ansys Fluent löser de transienta kontinuitets-, rörelsemängds- och energi-ekvationerna numeriskt med finita volymmetoden. Turbulensen modelleras med  $k-\varepsilon$  modellen tillsammans med



Figur 3: Den stillastående delen av beräkningsnätet vid tunnelportalen. Strukturerade hexahedra celler används i tågets färdriktning och utanför används polyhedra celler.

*Stationary part of the mesh around the tunnel entrance. Ordered hexahedral cells are used along the direction of motion of the train. Outside this area, polyhedral cells are used.*

väggfunktioner för hastigheten i gränsskiktet närmast väggar. Tidssteget som används i simuleringarna är 0.0008 s.

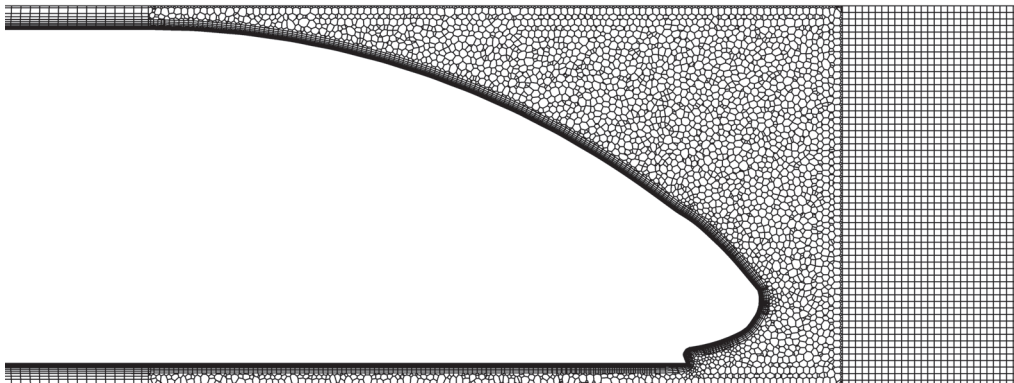
På inlopp respektive utlopp används tryckrandvillkor. Tunnelväggarna, marken och tåget har ett no-slip randvillkor. På resten av ränderna används symmetri-randvillkoret.

## Simulerade fall

Här nedan presenteras fallen som har simulerats. Fall A där simuleringsmetoden valideras mot mätdata beskrivs först. Därefter presenteras fall B, referensfallet och sist beskrivs ett fall med tryckutjämningschakt.

### Fall A: Validering

För att validera den framtagna beräkningsmetoden simulerades först en befintlig enkelspårstunnel, Hällbergstunneln, som ligger på sträckan Bjästa – Överhörnäs



Figur 4: Den rörliga delen av beräkningsnätet vid tågnosen. Närmast tåget är fem lager med prismor. Därefter polyhedrala celler och framför tåget strukturerade hexahedrala celler.

*Moving part of the mesh around the train's front face. Closest to the train the mesh is composed of five layers of prismatic cells. Successively, polyhedral cells and, in front of the train, ordered hexahedral cells.*

på Botniabanan. Lufttrycksmätningar genomfördes här under sluttesterna i juni 2009. Hällbergstunneln är 600 m lång med en tvärsnittsarea på 44,6 m<sup>2</sup>. Mätningarna gjordes med ett Reginatåg (Gröna Tåget) som körde i 212 km/h genom tunneln. Trycket i tunneln mättes i en punkt vid väggen, 25 m från tunnelinloppet.

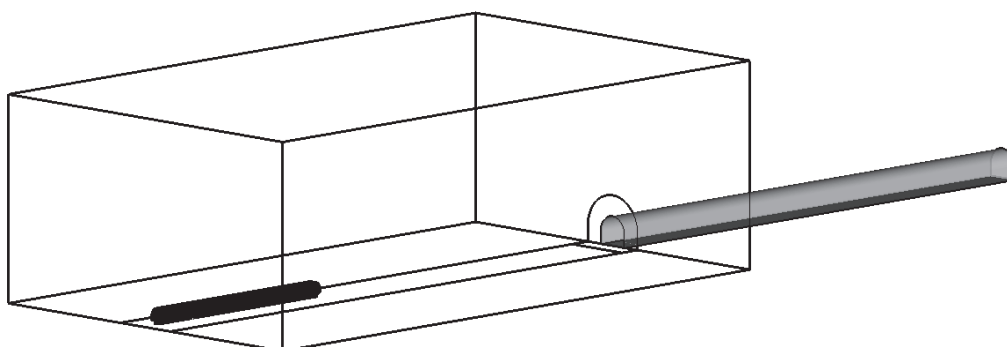
Domänen, se figur 5, förenklas i den här simuleringen genom att utloppsdomänen tas bort och tunneln kortas ner till 125 m. Randvillkoret på tunnelslutet sätts till tryckutlopp. Detta görs i syfte att spara beräkningskraft och bara det initiala förloppet när tryckvågen bildas och passerar förbi mätpunkten är av intresse.

### Fall B: Referens

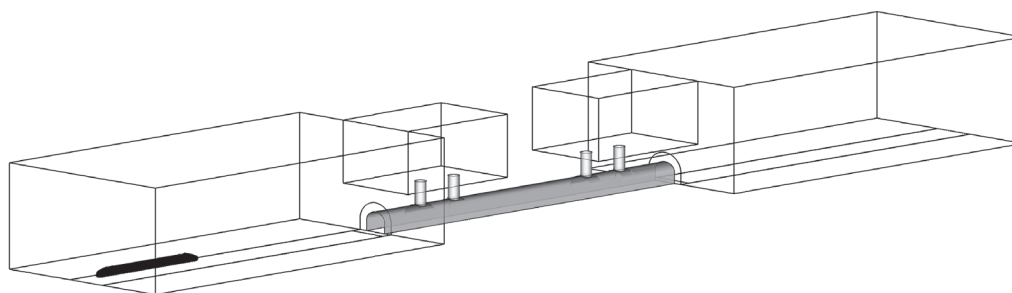
Som utgångspunkt och referens för kommande fall där tryckutjämningsmekanismer studeras, simulerades referensfallet i enlighet med domänen beskrivet i figur 1. Referensfallet har en dubbelspårstunnel.

### Fall C: Tryckutjämningschakt

Två cylindriska tryckutjämningschakt placeras vid både mynning och ände på tunneln, se figur 6. Det första schaktet är placerat 25 m från mynningen, respektive änden på tunneln. Avståndet mellan schakten är 15 m och schaktens diameter är 5 m. Höjden på schakten är 10 m och de är förbundna med omgivningsluften så att tryckpulser och luft kan strömma ut genom schakten.



Figur 5: Beräkningsdomän för valideringsfallet.  
*Computational domain for the validation case.*



Figur 6: Beräkningsdomän för fallet med tryckutjämningschakt.  
*Computational domain for the case with pressure relief shafts.*

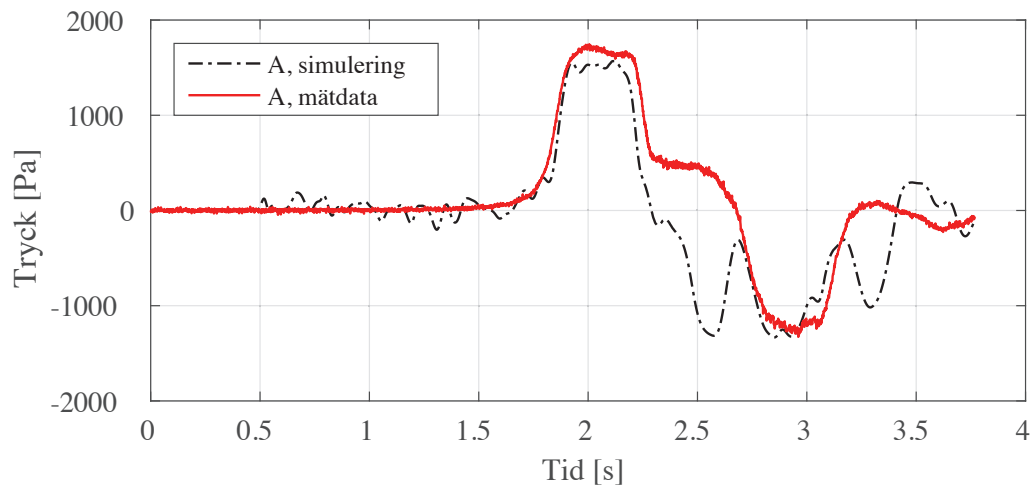
### 3 Resultat

I detta avsnitt presenteras och diskuteras resultatet från de simulerade fallen. Först presenteras resultaten från fall A i jämförelse med mätdata. Därefter presenteras resultaten från fall B, referensfallet, som sedan jämförs med fallet med tryckutjämningschakt, fall C.

#### Fall A: Validering

I figur 7 jämförs trycket i mätpunkten 25 m från mynningen för simulering och mätdata. Det maximala trycket uppnås vid  $t=2$  s, vilket kommer från den initiala tryckpulsen som uppstår när tåget kör in i tunneln. Både maxtrycket och lutningen på kurvorna stämmer väl. Det lägsta trycket erhålls när baksidan av tåget passerar mätpunkten. Simuleringarna predikterar det maximala och minimala trycket inom 10 procent av de uppmätta värdena. Både den initiala tryckpulsen som bildas när tåget kör in i tunneln och kolveffekten, att tåget trycker luften framför sig medan det kör i tunneln, predikteras.





Figur 7: Tryck relativt atmosfärstryck i en punkt vid väggen 25 m in i tunneln för fall A.

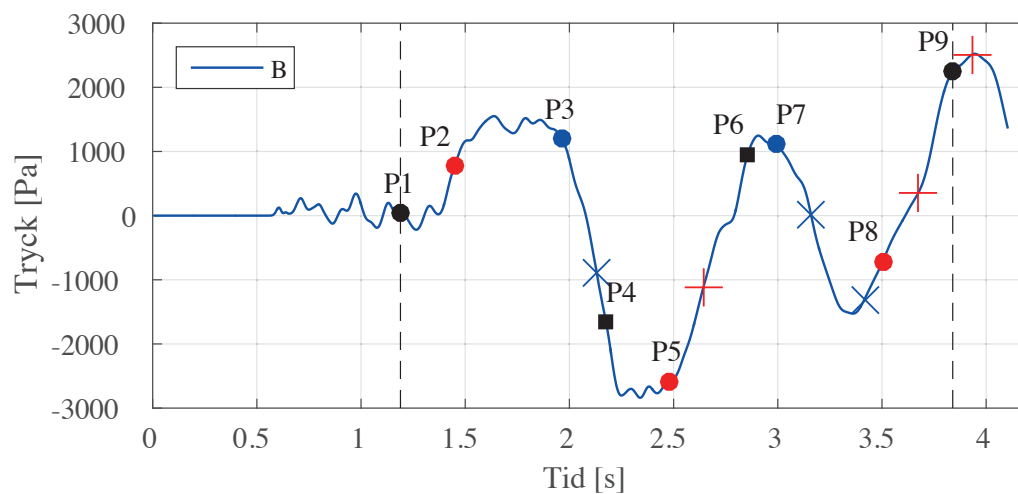
*Pressure relative to atmospheric pressure at a point on the tunnel wall 25 m from the tunnel entrance for case A.*

Efter ca 2,5 sekunder börjar trycket i simuleringen att oscillera medan trycket från mätningen fortsätter att minska på grund av att tåget passerar. Detta beror på att tunneln i simuleringen är kortare än den verkliga tunneln. En kortare tunnel innebär att tryckpulsen når slutet av tunneln och reflekteras tidigare i simuleringarna än i den verkliga tunneln. Från detta dras slutsatsen att simuleringen fångar den reflekterade tryckpulsen samt att tunneln bör vara tillräckligt lång för att tåget ska hinna passera mätpunkten innan den reflekterade tryckvågen når mätpunkten för att lättare kunna studera de olika fenomenen.

### Fall B: Referens

Resultat från simuleringen av referensfallet presenteras i figur 8 och 9. Figur 8 visar trycket i en punkt mitt i tunneln, 2,92 m rakt ovanför tåget. I figuren är tidpunkterna för när de olika tryckpulserna når mätpunkten markerade. Vid  $t=1,2$  s, P1, når tåget tunnelmynningen och den första tryckpulsen bildas och färdas med ljudets hastighet genom tunneln och når mätpunkten vid cirka  $t=1,4$  s, P2. Tryckpulsen reflekteras sedan i tunnelutloppet och kommer tillbaka till mätpunkten med omvänd fas, P3. Kort därefter når tåget mätpunkten, P4, och trycket sjunker ytterligare. Tryckpulsen som uppstod när tågnosen kör in i tunneln fortsätter att reflekteras i mynningarna, P5, P7 och P8. Vid  $t=2,8$  s, P6, har tåget passerat mätpunkten och vid  $t=3,8$  s, P9, har tåget helt kört ut genom tunneln. Utöver den



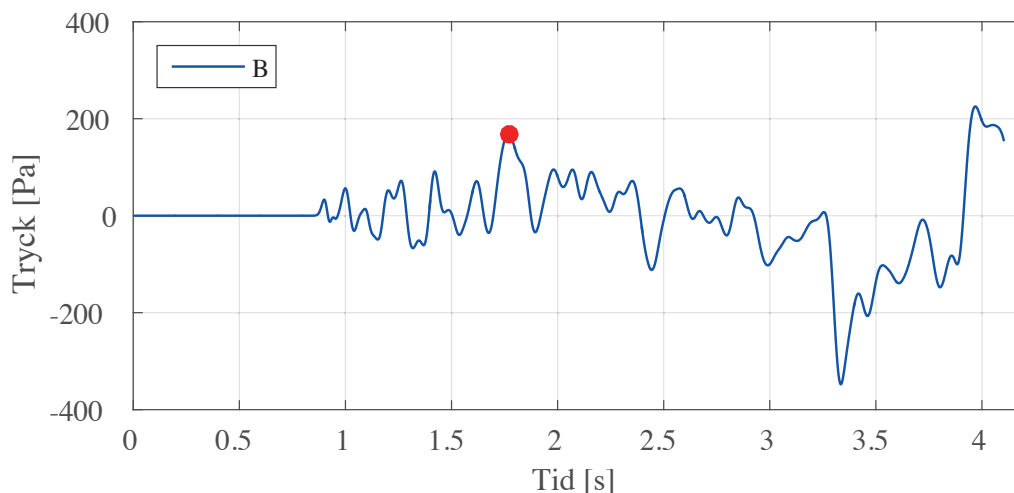


Figur 8: Tryck relativt atmosfärstryck för fall B i en punkt mitt i tunneln. Tidpunkterna för när tåget åker in och ut ur tunneln samt när tåget och de olika tryckpulserna når mätpunkten är markerade.

*Pressure relative to atmospheric pressure for case B at a point in the middle of the tunnel. Points in time for when the train enters and exits the tunnel as well as when the train and the pressure waves reach the measuring point are indicated.*

tryckpuls som bildades när tågets nos kör in i tunneln bildas det tryckpulser när nosen kör ut ur tunneln och när tågets bakände kör in i respektive ut ur tunneln. Dessa tryckpulser reflekteras i mynningarna på samma sätt och är markerade i figur 8. Detta innebär att det är många tryckpulser i tunneln samtidigt med olika stor amplitud och som färdas åt olika håll. När två tryckpulser sammanfaller superpositioneras trycket vilket ses tydligt i figur 8 när två expansionsvågor tillsammans med att tåget passerar mätpunkten ger upphov till ett lågt tryck. Vid  $t=3,9$  s sammanfaller tre tryckvågor som ger upphov till en stegring som är mycket högre än trycket från den initiala tryckpulsen. Slutsatsen från detta är att det är viktigt att titta på flera punkter i tunneln när man undersöker max och mintrycket i tunneln.

Figur 9 visar trycket i en punkt 10 m utanför tunnelmynningen. Vid ungefär  $t=0,8$  s börjar trycket oscillera runt 0 Pa. Detta beror på instabilitet i luftflödet runt tåget i starten av simuleringen som fortplantar sig genom domänen och dämpas sedan ut. Vid  $t=1,7$  s når den första transmitterade vågen, som kommer från den initiala tryckpulsen, punkten utanför tunneln och den högsta tryckförändringen orsakad av tunnelpassagen uppnås. Därefter transmittas pulserna ett antal gånger med avtagande tryck fram till tåget passerar punkten vid ungefär  $t=3,4$  s.



Figur 9: Tryck relativt atmosfärstryck i en punkt 10 m utanför tunneln för fall B. Tidpunkten för när den första transmitterade tryckpulsen når mätpunkten är markerad med rött.

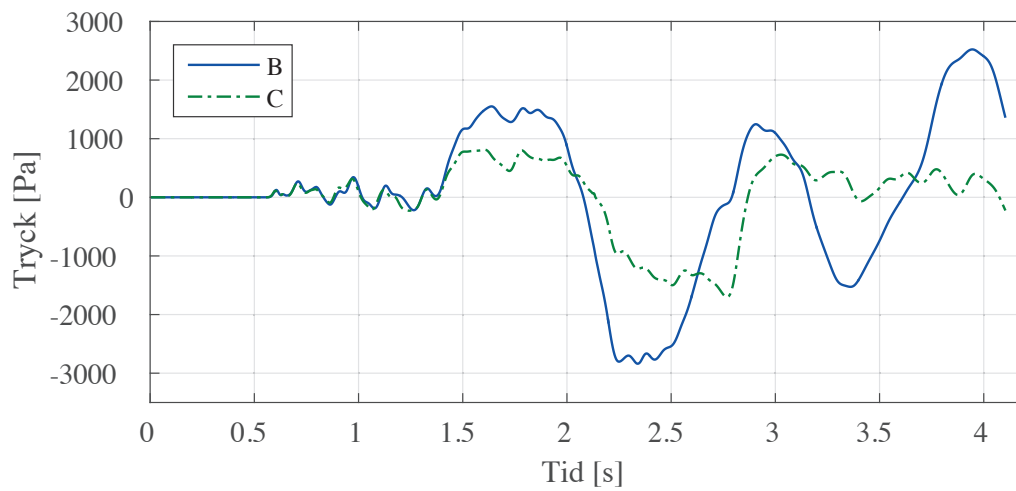
*Pressure relative to atmospheric pressure at a point 10 m outside the tunnel exit for case B. The point in time when the first pressure wave reaches the measuring point is marked with red.*

### Fall C: Tryckutjämningschakt

I figur 10 jämförs trycket i en punkt mitt i tunneln för referensfallet och fallet med tryckutjämningschakt. Den initiala tryckpulsen bryts upp när en del av den går ut genom schakten. Lutningen på kurvan är inte lika brant för fall C och trycket är mycket lägre när den når mätpunkten. Varje gång en tryckpuls passerar schakten pyser en del av den ut, det gör att det superpositionerade trycket aldrig blir så högt som i referensfallet. Detta ses tydligast när tåget passerar mätpunkten mellan  $t=2,2-2,7$  s och vid tidpunkterna  $t=3,4$  s och  $t=4$  s när trycket är mycket stabilare för fall C jämfört med B. Schakten innebär också en förändring av tvärsnittsarean vilket ger upphov till fyra nya, men mindre, tryckpulser för varje schakt när tåget åker förbi.

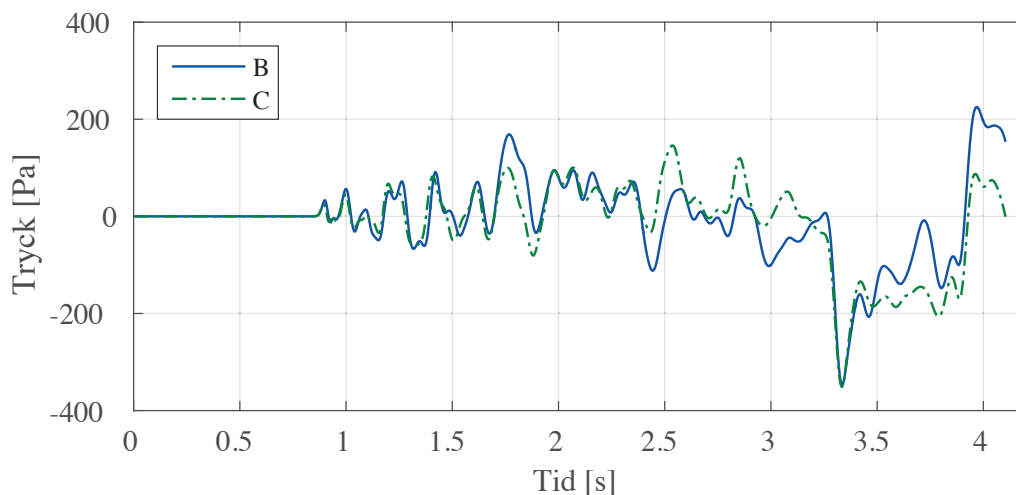
Trycket i punkten 10 m utanför tunneln visas i figur 11 för båda fallen. I uppstartsfasen har fallen samma beteende men den första transmitterade pulsen har ett lägre tryck för tunneln med tryckutjämningschakt. Det finns betydligt fler tryckpulser som transmitteras vid olika tillfällen för fall C. Detta gör till exempel att trycket vid  $t=2,5$  s och  $2,8$  s är högre för fall C än för fall B.

Det maximala trycket från den första tryckpulsen mitt i och utanför tunneln presenteras i tabell 1. Mitt i tunneln blir trycket ca 50 % lägre med tryckutjämningschakt. I punkten 10 m utanför är trycket runt 40 % lägre.



Figur 10: Tryck relativt atmosfärstryck i en punkt mitt i tunneln för fall B och C.

*Pressure relative to atmospheric pressure at a point in the middle of the tunnel for case B and C.*



Figur 11: Tryck relativt atmosfärstryck i en punkt 10 m utanför tunneln för fall B och C.

*Pressure relative to atmospheric pressure at a point 10 m outside the tunnel exit for case B and C.*

## Vindhastigheter

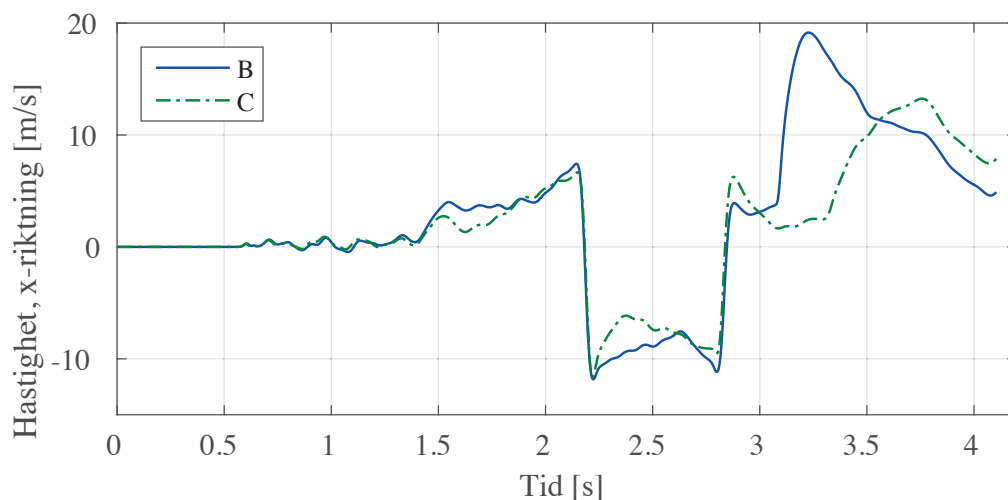
Ur simuleringarna kan man också utläsa hur luften rör sig. I figur 12 syns hur luften rör sig i tunnelns riktning när tåget passerar. Innan tåget passerar mätpunkten

Tabell 1: Max tryckförändring för fall B och C mitt i tunneln samt i en punkt 10 m utanför tunneln.

*Maximum change in pressure for case B and C in the middle of the tunnel as well as at a point 10 m outside the tunnel exit.*

Fall	P <sub>max</sub> mitt i tunneln	P <sub>max</sub> 10 m utanför tunneln
B	1500 Pa	170 Pa
C	810 Pa	100 Pa
Skillnad	48 %	42 %

ökar hastigheten från stillastående till knappa 10 m/s. Vid tågets passage så är vindhastigheten runt 10 m/s i motsatt riktning mot tågets färdriktning. Efter tågets passage så rör sig luften återigen i tågets färdriktning. I referensfallet med närmare 20 m/s, och i fall C med dryga 10 m/s. I fall C så är sannolikt närheten till vertikalschaktet avgörande för skillnaden i vindhastighet.



Figur 12: Vindhastighet i tunnelns riktning när tåget passerar, mätt mitt mellan tåg och tunnelvägg mitt i tunneln.

*Air velocity along tunnel direction, measured half way between the train and the tunnel wall in the middle of the tunnel.*

## 4 Analys

Beräkningarna ger skäl att anta att tryckpulsens maximala värde för passage av ett ensamt höghastighetståg i en tunnel byggd enligt nuvarande specifikationer

kommer att kunna uppgå till knappa 3 kPa. Detta värde skall sättas i relation till de olika kravställningar som finns på anläggningen. Framförallt gäller EU-kommissionens beslut om teknisk specifikation för driftskompatibilitet [2], som sätter 10 kPa som gräns för den högsta tänkbara tryckvariationen i en tunnel i trafik. Detta gäller för alla fall, inklusive tågmöte. 3 kPa är betryggande långt från gränsen, men det är inte orimligt att den transienta tryckpulsen vid tågmöte överskrider detta med mer än en faktor 2.

Tryckpulsen är emellertid väldigt kort. Tåget passerar en punkt i tunneln på mindre än en sekund i beräkningarna, men även ett tåg med 180 meters längd passerar snabbare än de 4 sekunder som nämns i trafikverkets tekniska systemstandard [3]. Där anges tillåtna tryckförändringar i form av komfortkravet 3 kPa på 4 sekunder, som gäller även vid möte.

Värt att notera är dock att tryckpulsen också är negativ, med ett undertryck som är av samma magnitud som övertrycket. Den totala tryckförändringen blir därför det dubbla, 6 kPa, och på mycket kort tid. Med 6 kPa tryckförändring på bråkdelen av en sekund så är risken för att det induceras utmattningspåverkande vibrationer i utsatta anläggningsdelar inte försumbar.

En annan aspekt av beräkningarna, som inte regleras lika tydligt i regelverket, är vindhastigheten. I referensfallet är den högsta vindhastigheten i modellen 20 m/s. Med så höga vindhastigheter kan påkänningen på utstickande detaljer, så som apparatskåp och signalsystem, bli betydande även om tryckpulsen är relativt liten.

## 5 Diskussion

Resultatet från analyserna måste tolkas tillsammans med erfarenheter från andra projekt. Buller och vibrationsproblem uppstår i liknande anläggningar redan vid lägre hastigheter. För Ostlänken så har man valt att basera anläggningen på ett tunnelkoncept med dubbelspårstunnel. Den ökade tvärsnittsarean på tunneln jämfört med enkelspårstunnlarna på befintliga banor ger en lindring av många av effekterna från tågpassager i hög hastighet. Vinddraget kring fordonskroppens närhet ger emellertid fortfarande upphov till snabba tryckväxlingar och turbulenta luftströmlar i hög hastighet.

De snabba tryckväxlingarna kan skapa snabba lastväxlingar i trycktröga konstruktioner, så som dränmattor, installationsskåp och kabeltrummor. Den typen av lastväxlingar kan i sin tur ge upphov till vibrationsförlopp som kortar den förväntade livslängden på installationselement och infästningar. Särskilt prekärt blir det om tyngre inklädnadselement sätts i rörelse vid tågpassage.

Höga vindhastigheter kring tåget innebär att utstickande föremål, så som belysning, signalsystem eller skyltar, behöver dimensioneras för vindlaster motsvarande stormstyrkor men med högre återkomst än normalt. De höga vindhastigheterna har även visat sig ha andra effekter utöver de uppenbara; vid sprickbildning i betongelement så skapar turbulensen, i kombination med fina partiklar, hög erosion i sprickorna. Det är ett fenomen som konstateras i internationella sammanhang och som kan få inverkan på utformningen av den svenska höghastighetsbanan.

För tunnlar innebär detta i sin tur att de krympsprickor som normalt uppstår vid insprutade dränmattor kan komma att vidgas med tiden. Erosionen kan eventuellt även påverka själva dränmattorna, som då riskerar att tappa delar av sin funktion.

Den anläggningsdetalj som kan komma att utsättas för störst påfrestningar av de aktuella vindlasterna är ifall anläggningen fordrar någon form av innertak eller takbeklädnad. Med sin stora yta så kommer tryckskillnaden att kunna manifesteras fullt ut som en oscillerande last på infästningar och fogar. De lösningar som används i vissa vägtunnlar med nedpendlade innertak kommer sannolikt inte att bli aktuella i detta projekt. Däremot så kan det bli aktuellt med innertak som bakfylls med lämpligt material och sedan förspänns upp mot taket. En korrekt utförd bakfyllning kommer eliminera mycket av de exiterbara vibrationsmoderna i elementen. Vidare så kommer vibrationerna inte att orsaka lastväxlingar i infästningar i stag och infästningar.

## Referenser

- [1] Peric Milovan Joel H Ferziger. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] EU-Kommissionen. *teknisk specifikation för driftskompatibilitet (TSD) avseende delsystemet Infrastruktur hos det transeuropeiska järnvägssystemet för höghastighetståg*. Kravdokument. Version 2008/217/EG. 2007.
- [3] Trafikverket. *TRVK Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor*. Kravdokument. Version 2.0. 2015.