

Filnamn OLP3-04-025-34-0_0-0209

Projektnamn

Ostlänken

Ärendenummer

TRV 2014/19364

Skapat av (Leverantör)

Mehdi Bahrekazemi

Granskat av (Leverantör)

Martin Stenbock

Godkänt av (Leverantör)

Karolina Sanell

Godkänt datum

2019-09-03

Sidor

1(14)

Rev Datum

Version

-



TRAFIKVERKET

OSTLÄNKEN

OLP3 NYKÖPING

Nyköpings resecentrum

Bandel 506

PM Beräkningar Vibrationer

Bilaga 2

Beräkning av kritisk tågfart med hjälp av 3D FEM modell

SYSTEMHANDLING



Innehåll

1	Bakgrund och syfte.....	3
1.1	Sammanfattning.....	3
1.2	Inledning.....	3
1.3	Bakgrund och syfte.....	3
1.4	Underlag.....	3
2	Metod.....	3
2.1	Metodbeskrivning.....	3
2.2	Geometri.....	3
2.3	Materialegenskaper.....	6
2.4	Laster som har använts vid 3D FEM simuleringarna.....	7
2.5	Avgränsningar.....	9
3	Resultat.....	9
4	Referenser.....	14

Ändringslogg

PDBi version	Revisionsdatum	Ändring	Namn
-	2019-09-03	Första publicerade version	Mehdi Bahrekazemi



1 Bakgrund och syfte

1.1 Sammanfattning

Översiktliga bedömningar av kritisk tågfart har visat att risk för höga vibrationsnivåer i spår inte kan uteslutas för delar av sträckan ca KM 58+200 – 59+426 (stambanan), 15+900 – 16+100 (TGOJ-banan) där järnvägen kommer att anläggas som nya spår över tidigare obebyggd mark. För den aktuella sträckan har 3D FEM beräkningar tillämpats för närmare bestämning av den kritiska tågfarten (även kallad den kritiska hastigheten).

De utförda 3D FEM simuleringarna av tågpassager med olika hastigheter som presenteras i föreliggande PM visar att den kritiska tågfarten beräknas till ca 280 km/h. Det i sin tur innebär att TK Geo:s krav med avseende på STH kan uppfyllas för tågfart upp till 168 km/h.

1.2 Inledning

På uppdrag av Trafikverket har Golder Associates AB utfört utvärdering av risk avseende höga vibrationsnivåer i spår på grund av tågpassage för planerad ny järnväg över befintlig åkermark vid västra anslutning av Nyköpings resecentrum inom ramen av projekt Ostlänken.

1.3 Bakgrund och syfte

En översiktlig bedömning av kritisk tågfart baserat på resultat från befintliga geotekniska undersökningar på sträckning ca KM 58+200 – 59+426 (stambanan), 15+900 – 16+100 (TGOJ-banan) har inte uteslutit risk avseende oacceptabelt höga spårvibrationer på grund av tågpassage där ny järnväg planeras byggas på lös undergrund över tidigare obebyggd åkermark.

Syftet med föreliggande PM är att presentera sammanfattande resultat från 3D FEM beräkningar som har utförts för bedömning av kritisk tågfart för ovan nämnda delsträcka.

1.4 Underlag

- TK Geo 13
- SS-EN 1991-2
- Resultat från geotekniska undersökningar

2 Metod

2.1 Metodbeskrivning

För den fördjupade analysen av den kritiska tågfarten längs med den aktuella sträckningen har beräkningar utförts med 3D FEM modell. En tredimensionell FEM modell har byggts upp i programvaran MIDAS, GTS NX version 2016 (v.2.1) och därefter använts för 3D numeriska simuleringar av tågpassage med olika hastigheter på järnvägsbanan.

2.2 Geometri

En förenklad geometri och jordlagerföljd baserad på resultat från utförda geotekniska undersökningar ligger till grund för det modellnät som visas i Figur 1.

Filnamn OLP3-04-025-34-0_0-0209

Projektnamn

Skapat av (Leverantör)

Godkänt datum

Rev Datum

Ostlänken

Mehdi Bahrekazemi

2019-09-03

Ärendenummer

Granskat av (Leverantör)

Sidor

Version

TRV 2014/19364

Martin Stenbock

4(14)

-

Godkänt av (Leverantör)

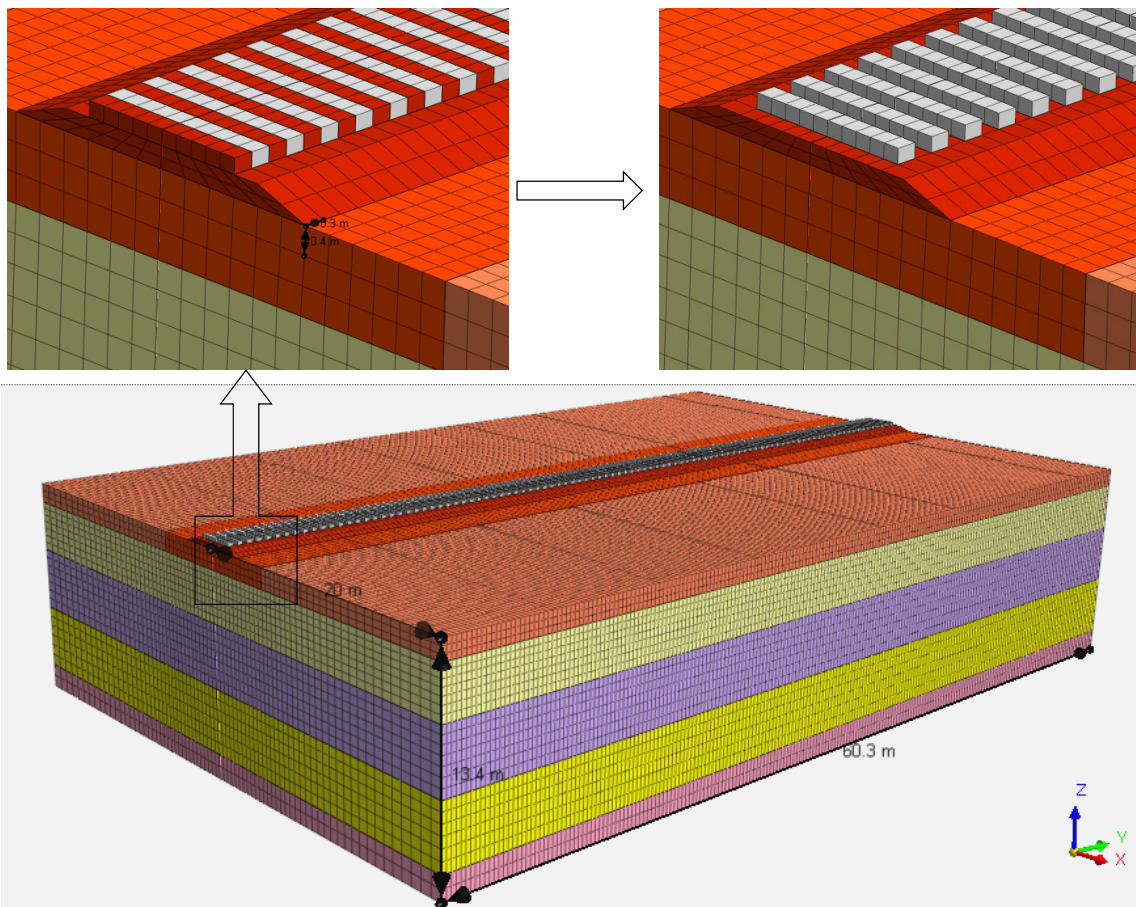
Karolina Sanell



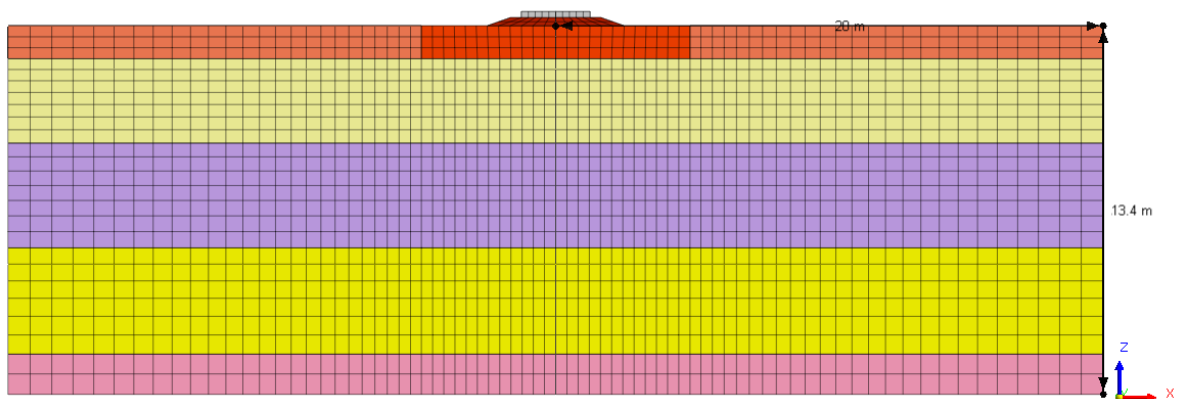
TRAFIKVERKET

Dynamiska beräkningar med en 3D numerisk modell är mycket tidskrävande trots dagens datorkapaciteter. För att minska erforderlig körningstid måste därför antalet frihetsgrader i modellen minskas. Ett av de främsta sätten att minska körningstiden är att begränsa modellens storlek och därmed antalet element och frihetsgrader. Modellens bredd begränsas därför till endast 40 m (se Figur 1). Modellens längd begränsas till ca 60 m. Detta motsvarar den sammanlagda längden av ca 3 vagnar i en tåguppsättning. Begränsad modellstorlek möjliggörs genom att använda "absorberande" randvillkor på sidorna och därmed undvika beräkningsfel som är av betydelse. I djupled begränsas modellen till drygt 13 m vilket bedöms räcka med tanke på jordlagerföljden. Ytterligare åtgärder för att minska antalet element i modellen är att utnyttja symmetriplanen och endast använda halva den sektion som visas i Figur 2 för FEM beräkningarna.

3D solida element av typen Hexahedron har använts för modellering av både bankmaterial, jordlager och betongsliprar i modellen. För att minska antalet frihetsgrader av modellen ska så stora element som möjligt användas. Å andra sidan ska elementstorleken anpassas till det intressanta frekvensområdet vid modelleringen. Vid tågpassage på järnvägsbank alstras huvudsakligen vibrationer med frekvens mellan ca 1-100 Hz (se t.ex. [2]). De höga frekvenserna brukar visas mindre i tidsförlopp för partikelrörelse än motsvarande tidsförlopp för partikelacceleration. Dessutom är avståndsdämpningen för de högfrekventa vibrationerna större än de lågfrekventa, särskilt i lerområden. Därför bedöms frekvensområde upp till 20-30 Hz som intressant för de numeriska beräkningar som presenteras i föreliggande PM. Med en lägsta skjuvvågshastighet på ca 61 m/s i lerlagret under järnvägsbank (se Tabell 1) och maximum vibrationsfrekvens på 25 Hz beräknas den minsta våglängden till ca 2,5 m. För att få som minst ca 8 element per kortaste våglängd beräknas därför ca 0,3 m som lämplig elementstorlek i översta lerlagret (se Figur 1).



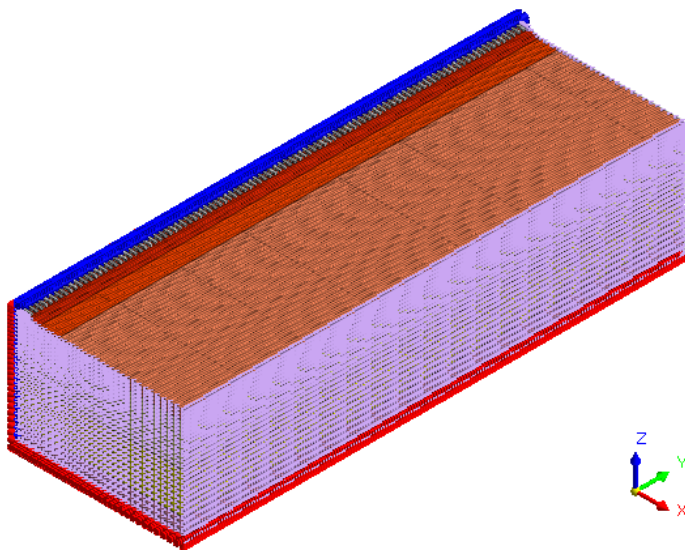
Figur 1. Modellnät som har använts för 3D FEM beräkningarna. Se också Figur 2. För bättre visualisering döljs ballast mellan sliper och visas endast i en av de in-zoomade bilderna ovan, för övrigt döljs dessa element vid visualiseringar i denna PM.



Figur 2. Sektion av 3D FEM som visar förenklad jordlagerföljd som har använts för 3D FEM beräkningarna. Uppifrån består modellen av sliper, ballast och järnvägsbank (totalt ca 1,7m var av 1,2 m järnvägsbank), lerlager 1 (ca 3m), siltig lera (ca 3,8m), lerlager 2 (ca 3,9m) och silt (ca 1,5m). Ytligt jordmaterial har antagits bestå av fyllning/torrskorpelera utanför järnvägsbank med samma lagertjocklek som underballast (visas med ljusare rödfärg i bild).



Frihetsgrader av noderna i modellen har anpassats för att återspegla modellens olika randvillkor (se Figur 3). Alla frihetsgrader i undersidan av modellen har låsts vilket motsvarar relativt fast botten medan översidan av modellen har modellerats som fri yta. Ena sidan av modellen är ett symmetriplan (se Figur 2) och randvillkoren i detta plan har anpassats genom att förhindra deformation i X-riktning och rotation i Y-riktning och Z-riktning. De övriga tre sidorna har modellerats med absorberande ränder (enligt Lysmer och Wass, se [1]) som ska förhindra de inkommande vågorna från att reflekteras tillbaka in i modellen eftersom dessa tre kanter inte finns i verkligheten.



Figur 3. Bilden visar modellens randvillkor som har använts vid FEM beräkningarna. Röd färg visar låsta frihetsgrader map deformation, blå färg visar låsta frihetsgrader map rotation och rosa färg visar absorberande ränder.

2.3 Materialegenskaper

Linjärelastisk materialmodell har använts för 3D FEM modellens alla ingående delar. Utöver tunghet, γ , är E-modul och tvärkontraktionstal, ν , de två parametrar som behövs för att definiera ett linjärelastiskt material.

Inga mätningar av jordmaterialets skjuvvågsfarter har utförts inom det aktuella området. De materialparametrar som används för 3D FEM beräkningarna baseras därför på empiriska samband i kombination med resultat från geotekniska undersökningar i detta område.

E-modul och tvärkontraktionstal för betongsliparna baseras på ett konservativt val från tabellvärden.

E-modul för ballast/ underballast och bankmaterial har satts till 100 MPa vilket anses vara i underkant av förväntat värde.

Tabell 1 presenterar en sammanfattning av de materialparametrar som har använts för modellens olika delar. Materialdämpningen (Rayleigh dämpning) har antagits till 2 % för alla ingående material förutom för betong vars materialdämpning i modellen har satts till 1 %.



Tabell 1. Sammanfattning av materialegenskaper som har använts för den 3D FEM modell som presenteras i föreliggande PM. I tabellen visas även motsvarande c_s .

Material	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	w_L (%)	E (MPa)	ν	c_s (m/s)
Betongsliper	24	-	-	20000	0,2	-
Ballast	17	-	-	100	0,3	ca. 150
Järnvägsbank	19	-	-	100	0,3	ca. 142
Ytjord*	18	25	40	50	0,3	ca. 103
Lera 1	16	14	120	17,5	0,495	ca. 61
Siltig lera	18	10	60	25	0,495	ca. 68
Lera 2	16	19	90	31,8	0,495	ca. 82
Silt	20	-	-	50	0,3	ca. 98

* E_0 för ytjord har begränsats till 50 kPa som ett konservativt indata för att hänsyn till variation i ytjord.

2.4 Laster som har använts vid 3D FEM simuleringarna

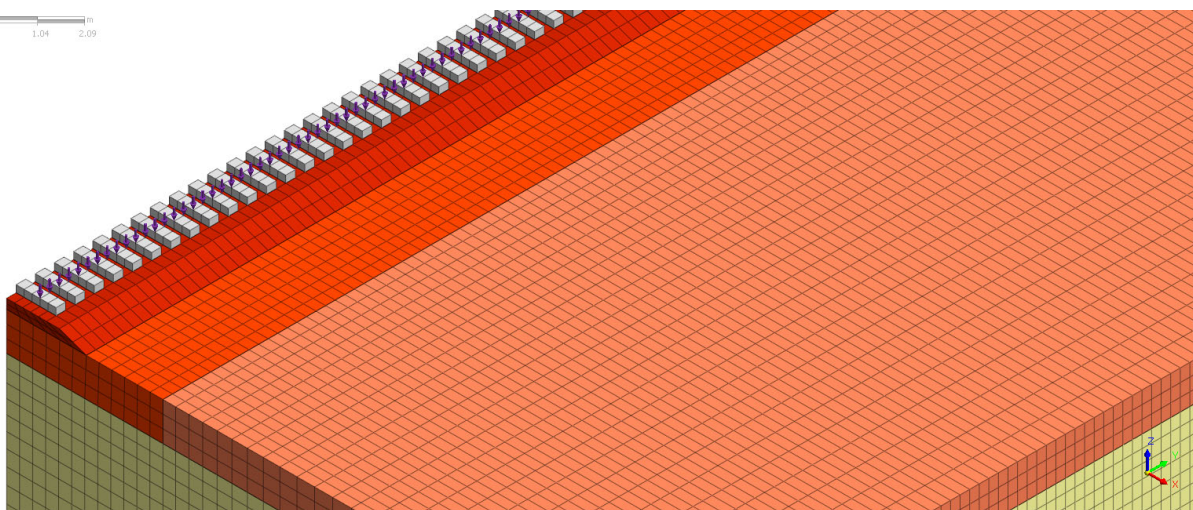
För tåglasten har punktlaster motsvarande 170 kN axellast (85 kN hjullast) använts på de noder som motsvarar lastöverföringspunkterna mellan räls och sliprar, se Figur 4. Avstånd mellan axellasterna och tidsförloppet motsvarande en tåghastighet av 200 km/h för de tre första vagnarna visas i Figur 5. För jämförelse visar Figur 6 en tåguppsättning motsvarande HSLM-A1 enligt SS-EN 1991-2, (se [3] för mer information om HSLM last).

För bedömning av den kritiska tågfarten har beräkning med 3D modellen upprepats för flera tåghastigheter mellan 160 och 360 km/h. Medan avstånd och storlek av axellasterna är oförändrade för olika tåghastigheter ändras lastens tidsförlopp beroende på hastigheten.

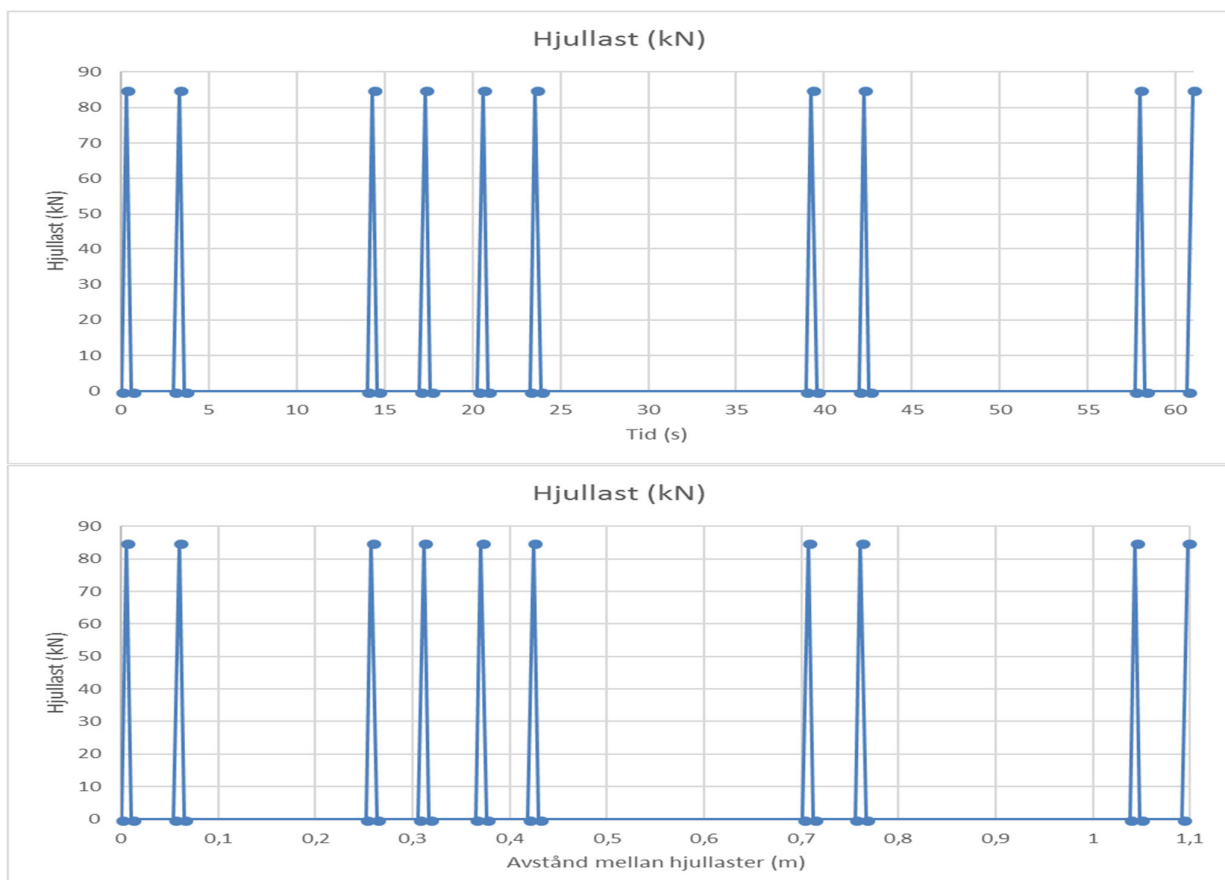
Eftersom en linjärelastisk materialmodell har använts kan motsvarande deformationsresultat för andra axellaster än det som visas i Figur 5 bestämmas, förutsatt oförändrat axelavstånd, genom att multiplicera den beräknade deformationen med lastfaktorn definierat i Ekvation 1 nedan. Detta påverkar dock inte den beräknade kritiska tågfarten.

$$\text{Lastfaktor} = \frac{\text{Aktuell Axellast (kN)}}{170 \text{ (kN)}}$$

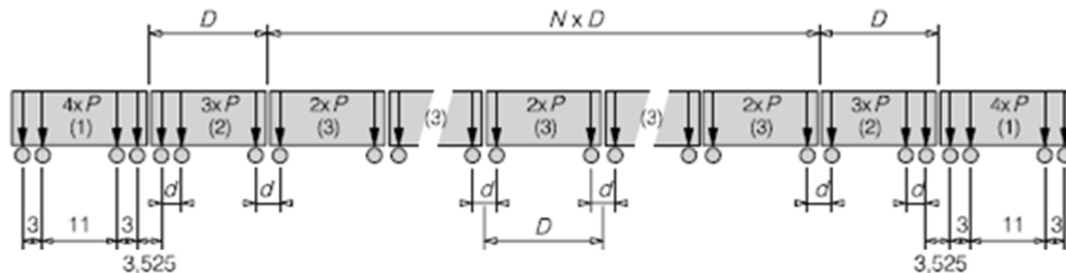
Ekvation 1



Figur 4. Nedåtriktade pilar i bilden visar den dynamiska hjullasten på varje lastöverföringsnod i kontaktytan mellan ena rälsen och betongsliprarna. Den dynamiska lastens tidsförlopp visas i Figur 5.



Figur 5. Övre diagram visar hjullastens avstånd motsvarande de tre första vagnarna i tåguppsättning som har använts för 3D simuleringarna. Nedre diagram visar tidsförloppet för ett fall med tåg hastighet av 200 km/h (55,56 m/s). På grund av symmetri används endast halva axellasten på varje räls i de noder som motsvarar lastöverföringspunkterna. Slipravstånd har satts till 600 mm i 3D modellen.

**Förklaring**

- (1) Motorvagn (identiska motorvagnar först och sist i tåget)
- (2) Personvagn närmast motorvagn (identiska vagnar främst och längst bak)
- (3) Mellanplacerade personvagnar

Figur 6.12 – HSLM-A**Tabell 6.3 – HSLM-A**

Universaltåg	Antal vagnar N	Längd av personvagn D [m]	Avstånd mellan boggier d [m]	Punktlast P [kN]
A1	18	18	2,0	170

Figur 6. Beskrivning av HSLM-A1 tåglast enligt Figur 6.12 och Tabell 6.3 i SS-EN 1991-2.

2.5 Avgränsningar

Föreliggande PM behandlar endast "höghastighetsproblem" vid tågpassage över obebyggd åkermark vid Nyköpings resecentrums västra anslutning.

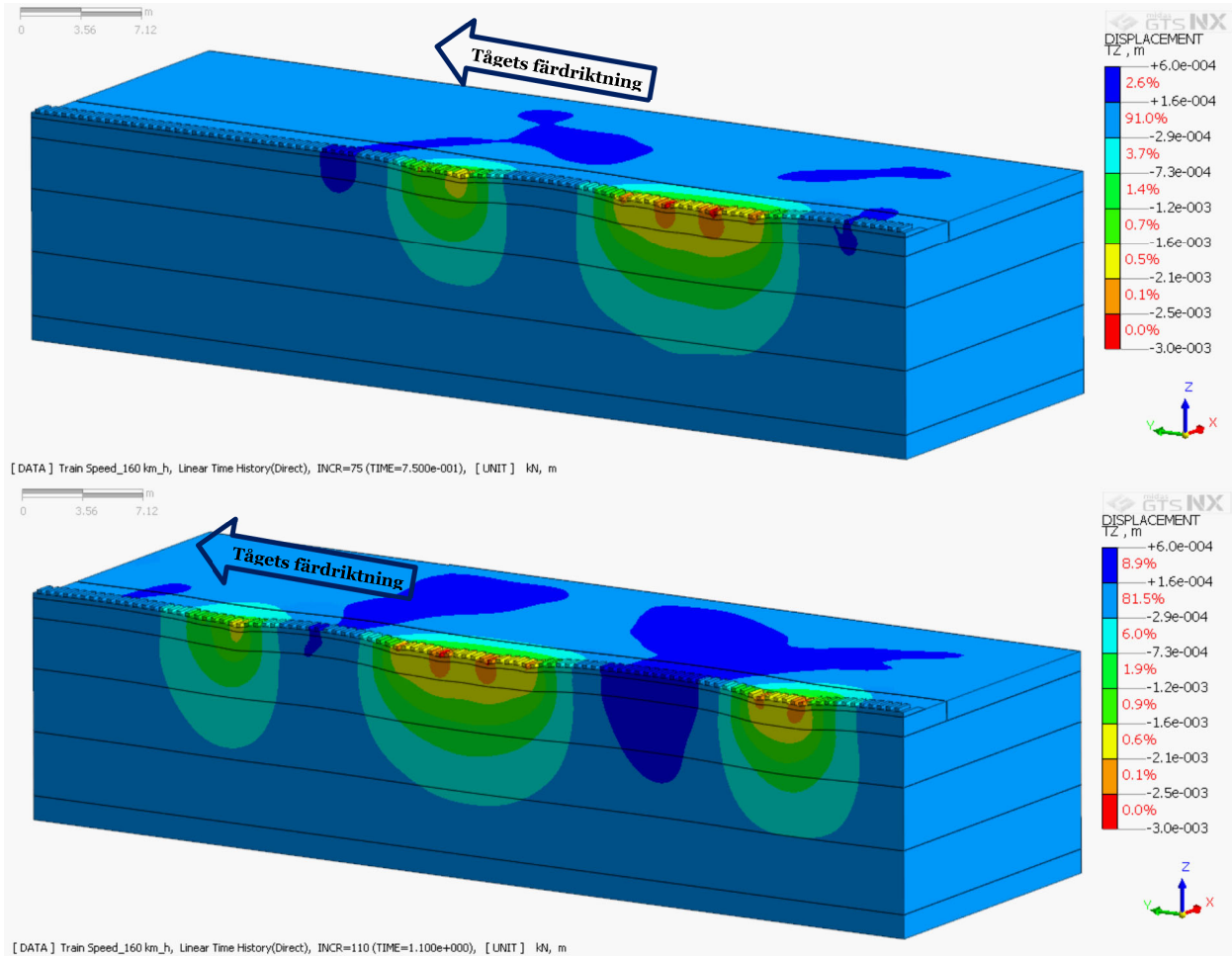
3 Resultat

Nedan presenteras ett urval av resultat från 3D-FEM simuleringar av tågpassage med tåghastighet 160 km/h respektive 280 km/h.

Figur 7 och Figur 8 visar vertikal deformation i järnvägsbanken och dess närområde under passage av ett tåg i 160 km/h. Som det ses i dessa två figurer påverkas huvudsakligen en jordvolym inom ca 5 m från spårmit i plan och ungefär 9 m i djupled. Som det framgår av deformationsfältets utseende kör tåget med hastighet som är betydligt lägre än den kritiska.

Figur 9 visar vertikal deformation i järnvägsbanken och dess närområde under passage av ett tåg i 280 km/h. En jämförelse mellan Figur 9 med Figur 7 eller Figur 8 med Figur 10 visar att betydligt större jordvolym påverkas när tåget passerar i 280 km/h. Vidare har deformationsfältet för tågpassage i 280 km/h utseende som överensstämmer med tågpassage i hastighet nära den kritiska hastigheten.

Figur 11 visar sambandet mellan vertikal förskjutning i spår (top-top värde vid sliper) och tågfart. Enligt kurvan sker den största vertikala förskjutning i spår när tåget kör i 280 km/h.



Figur 7. Två ögonblicksbilder av deformation (Z-riktning) när tåget passerar i 160 km/h i Y-riktning. Tidssteg vid numeriska beräkningar har satts till 0,01 s i detta beräkningsfall.

Filnamn OLP3-04-025-34-0_0-0209

Projektnamn

Ostlänken

Ärendenummer

TRV 2014/19364

Skapat av (Leverantör)

Mehdi Bahrekazemi

Granskat av (Leverantör)

Martin Stenbock

Godkänt av (Leverantör)

Karolina Sanell

Godkänt datum

2019-09-03

Sidor

11(14)

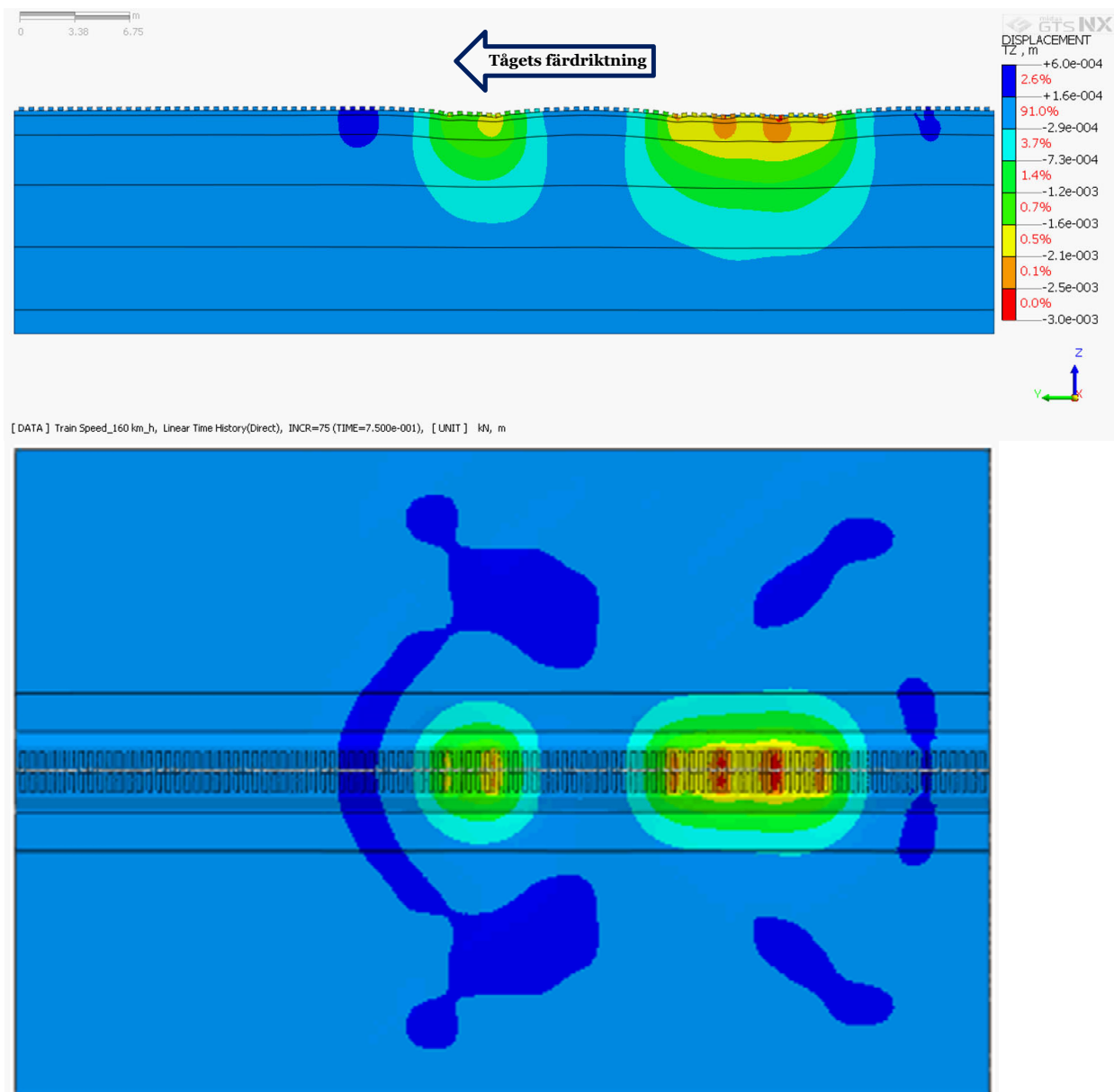
Rev Datum

Version

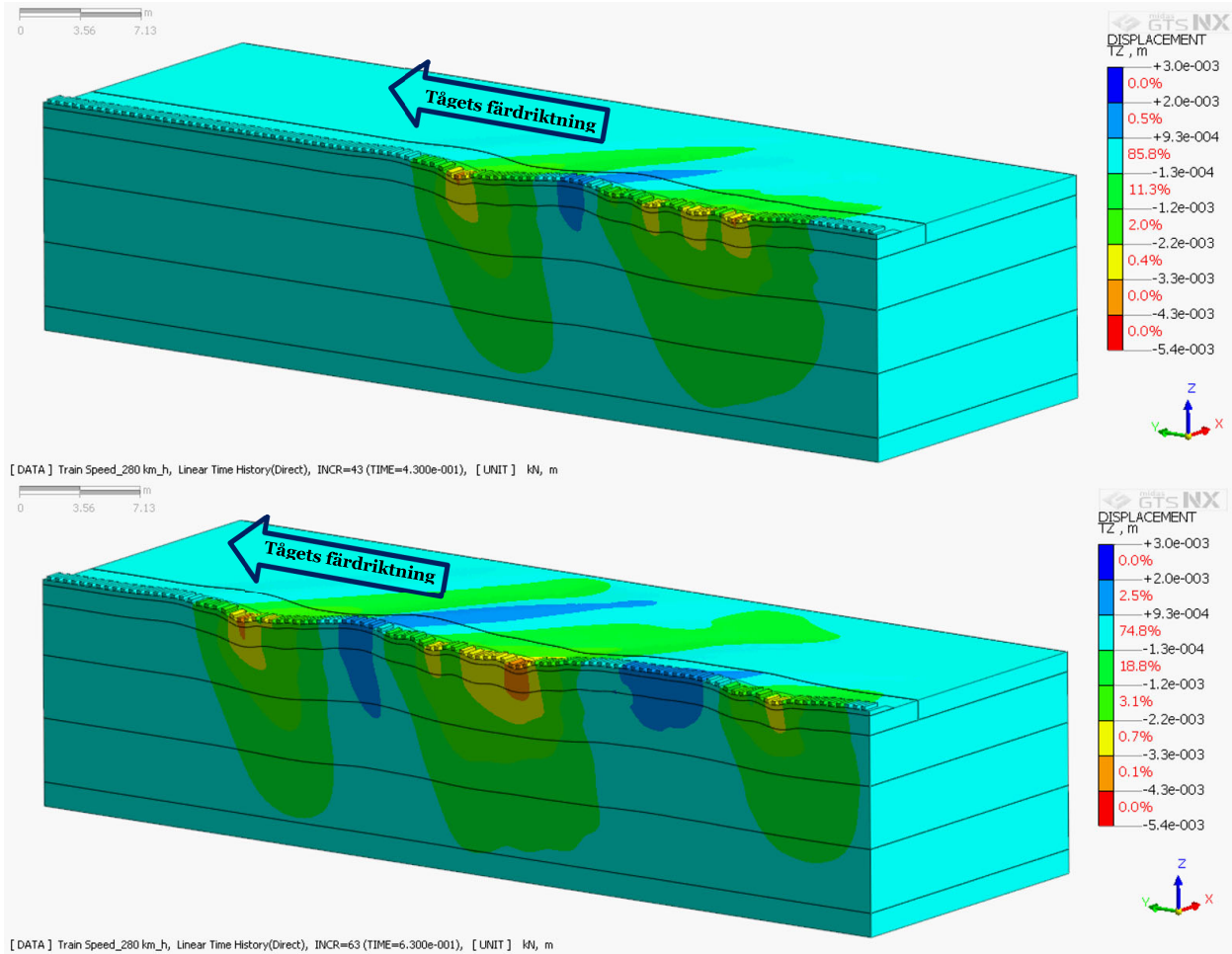
-



TRAFIKVERKET



Figur 8. Plan och profil av deformation (ögonblicksbild, Z-riktning) när tåget passerar i 160 km/h i Y-riktning. Tidssteg vid numeriska beräkningar har satts till 0,01 s i detta beräkningsfall.



Figur 9. Två ögonblicksbilder av deformation (Z-riktning) när tåget passerar i 280 km/h i Y-riktning. Tidssteg vid numeriska beräkningar har satts till 0,01 s i detta beräkningsfall.

Filnamn OLP3-04-025-34-0_0-0209

Projektnamn

Ostlänken

Ärendenummer

TRV 2014/19364

Skapat av (Leverantör)

Mehdi Bahrekazemi

Granskat av (Leverantör)

Martin Stenbock

Godkänt av (Leverantör)

Karolina Sanell

Godkänt datum

2019-09-03

Sidor

13(14)

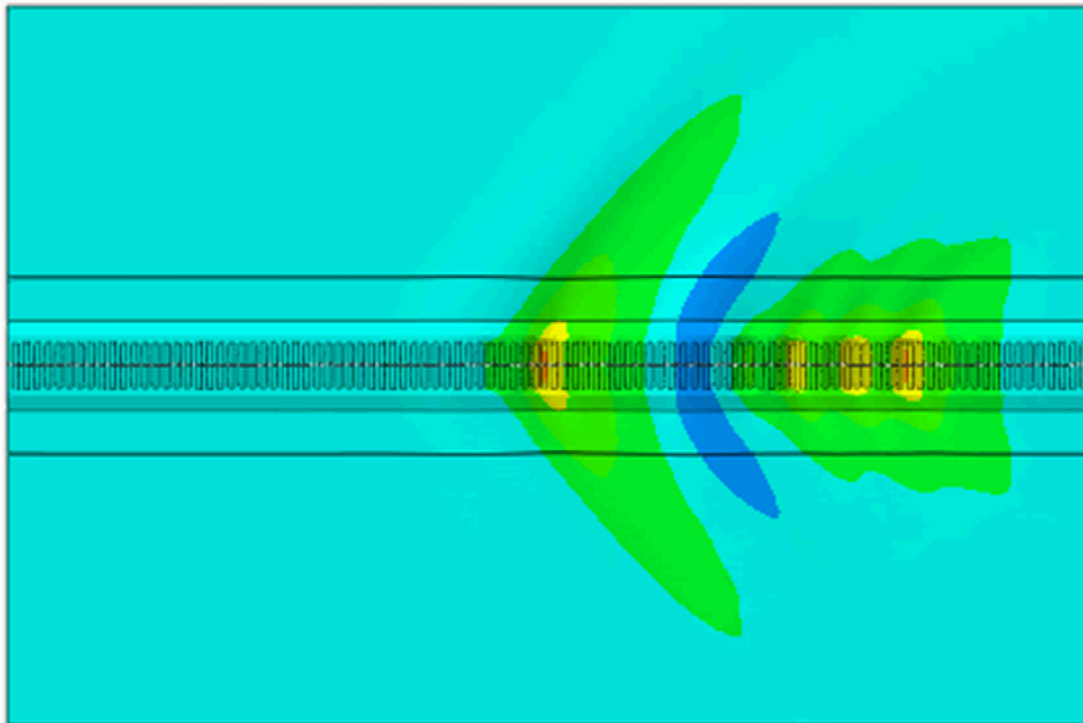
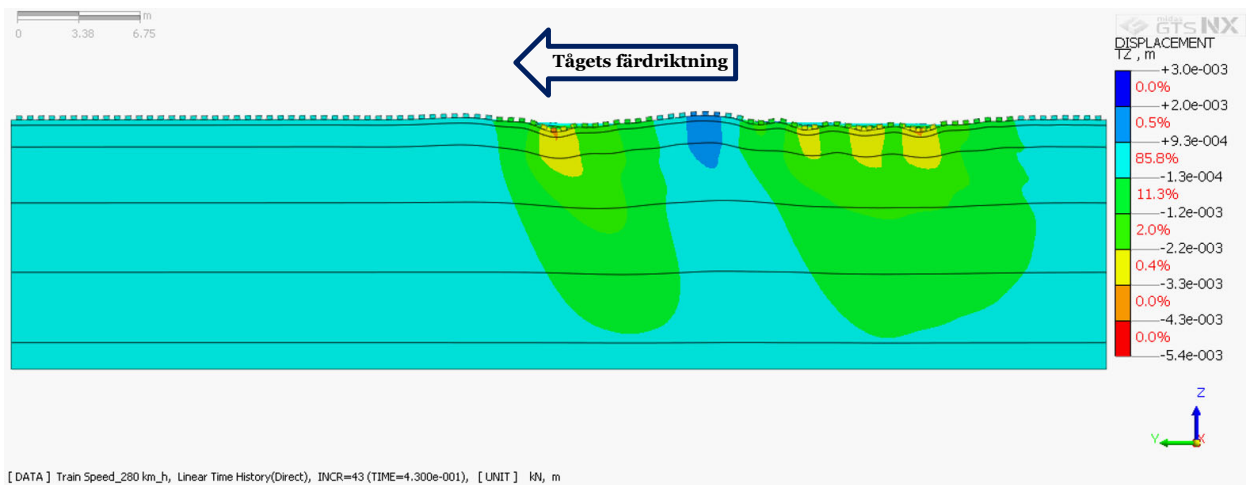
Rev Datum

Version

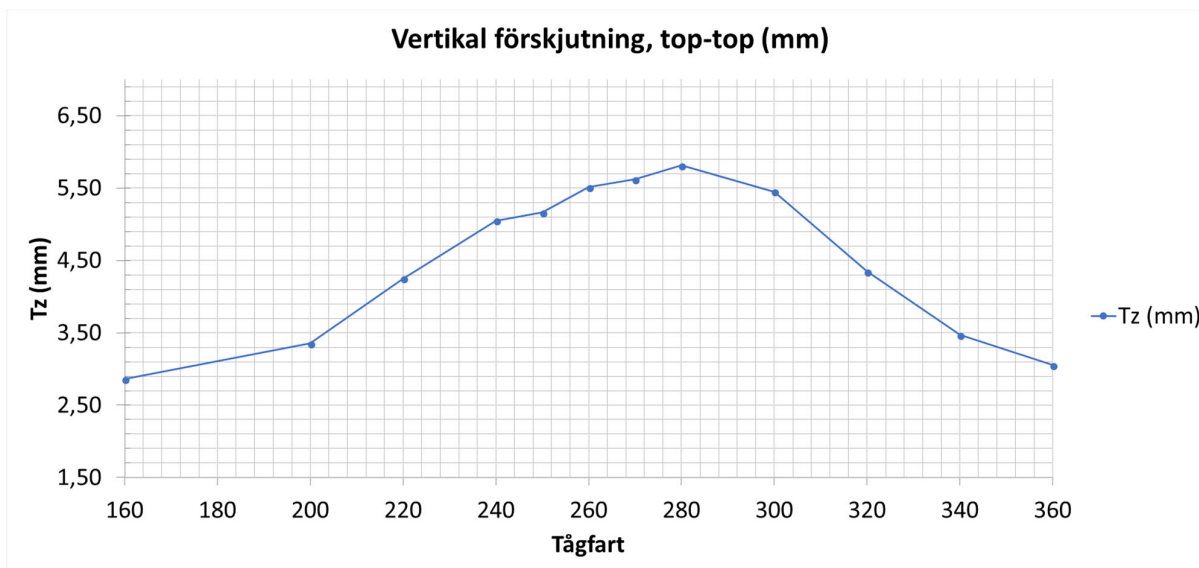
-



TRAFIKVERKET



Figur 10. Plan och profil av deformation (ögonblicksbild, Z-riktning) när tåget passerar i 280 km/h i Y-riktning. Tidssteg vid numeriska beräkningar har satts till 0,01 s i detta beräkningsfall.



Figur 11. Samband mellan vertikal förskjutning i spår (top-top värde vid sliper) och tåg fart.

Slutsatser och rekommendationer

Utförda 3D-FEM beräkningar visar att den kritiska tåg farten är ca 280 km/h för den aktuella sträckningen.

Enligt TK Geo 13 bestäms den största tillåtna hastigheten, STH, enligt Ekvation 2 nedan.

$$STH < C_d \times c_{cr}$$

Ekvation 2

Där c_{cr} är den beräknade kritiska hastigheten och C_d är en faktor som bestäms med hjälp av Tabell 18.3-3 i TK Geo och beror på metod för bestämning av jordparametrar samt utredningsnivå.

För den utredning som presenteras i föreliggande PM har jordmaterialets dynamiska E-modul valts genom tillämpning av empiriska samband vilket motsvarar nivå A1 enligt Tabell 18.3-1 i TK-Geo. Beräkningar med 3D-FEM modell med rörlig tåglast motsvarar utredningsnivå B3 enligt Tabell 18.3-2 i TK Geo.

För beräknad kritisk hastighet av 280 km/h enligt ovan och angiven STH=160 km/h enligt projektets förutsättningar erfordras därför $C_d \geq 0,57$ för att uppfylla TK Geo:s krav avseende spår vibrationer. Enligt Tabell 18.3-3 i TK Geo är $C_d = 0,6$ för utredningsnivån A1-B3. Därmed bedöms krav avseende spår vibrationer vara uppfyllt för Nyköpings resecentrums västra anslutning.

4 Referenser

- [1] MIDAS GTS manual
- [2] Zhai W. et al (2015) Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering 72 (2015) 24-36.
- [3] SS-EN 1991-2, Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 2: Trafiklast på broar.