SBUF

PROJEKTNR. 13693

Dimensionering av järnvägsöverbyggnad

Betydelsen av underballast

Bo Johansson
NCC Sverige AB

2023-11-27

NCC Sverige AB
Infra Sverige

Rapport

Järnvägsöverbyggnad – betydelse av underballast

Förord

NCC bygger i konsortium med spanska OHLA fyra nya järnvägsspår mellan Arlöv, strax norr om Malmö åt Trafikverket. Projektet omfattar utöver 8 km spår ombyggnad av 3 stationer och en ny station.

Spåren byggs i befintlig sträckning och på en delsträcka byggdes därför två provisoriska spår för att kunna färdigställa den nya anläggningen. Dessa var i bruk från 2020 till hösten 2023 och tankar om att utnyttja spåren i utvecklingssyfte väcktes tidigt i projektet. Ett projekt skapades därför för att studera underballastens betydelse och efterlikna krav som ställs på andra sidan Öresund i Danmark.

Projektet genomfördes av en arbetsgrupp som förutom av författaren bestod av följande:

- Lars Persson, NCC
- Anders Dahlberg, TRV

Följande har medverkat i en referensgrupp för att inledningsvis forma utformningen av projektet.

- Magnus Karlsson, Trafikverket
- Tomas Winnerholt, Trafikverket
- Nils Ryden, PEAB
- Jan Englund, Skanska

Eventuella synpunkter fångades även upp efter kallelse till ett avslutande referensgruppsmöte.

Projektet har finansierats av följande organisationer:

Trafikverket
NCC
SBUF

Ett stort tack till all personal på arbetsplatsen som hjälpt till, ingen nämnd ingen glömd. Utan deras engagemang hade det inte varit möjligt att genomföra.

Ett tack till Håkan Carlsson VTI som höll ihop instrumenteringen, gjorde mätningarna och sammanställde resultatet.

Göteborg 2023-11-27

Bo Johansson

Sammanfattning

Två provisoriska spår byggdes på en delsträcka för att kunna färdigställa fyra järnvägsspår mellan Arlöv strax norr Malmö och Lund. Dessa instrumenterades i fyra provsträckor för att kunna studera betydelsen av underballasten tjocklek, 0,3m, 0,4m, 0,5m och 0,6m tjocklek. Provsträckorna byggdes på en delsträcka med fyllning av lermorän, materialtyp 4b och tjälfarlighetsklass 3.

Banan instrumenterades med EMU-spolar i profiler med någon dm avstånd, vilket gör det möjligt att studera utvecklingen av permanenta deformationerna men även att registrera elastiska deformationen som uppstår vid tågöverfarter. En viktig faktor vid dimensionering av bana är tjäle och tjälstavar installerades därför i tre överbyggnader för att under kunna följa tjäldjupet under tre vintrar, 2021, 2002 och 2023.

Instrumenteringen nollmättes i samband med trafikpåsläpp och därefter ytterligare 3 gånger, en gång per år, för att kunna följa en eventuell förändring. Efter en inledande total förändring på några millimetrar mellan övre och undre EMU-spole så erhölls sannolikt stabila förhållande inom mätnoggrannhet. Tunnare överbyggnader erhöll initialt en hävning och tjockare ungefär samma komprimering, men den iakttagelsen ska inte övertolkas, kan lika väl förklaras av mindre skillnader i utförande vid instrumenteringen.

Mätningen av deformationen i samband med tågpassage visade sig vara svår att utvärdera då resultatet stördes av magnetiska fält. Mätningarna visar trots svårigheten att resultaten var repeterbara vid jämförelse av tågöverfarter och även övertid, olika mätår.

När det gäller tjälstavarna så har det varit milda vintrar och tjälnedträngningen var som djupast någon dm ned i underballasten, vilket visar svårigheten med att studera tjäle då en sträng vinter återkommer med ca 10 års mellanrum, senaste 2010.

Resultatet visar med tydlighet att underballastens tjocklek i detta fall har en underordnad betydelse trots att det var upp till 0,5 m tunnare än gällande regelverk. Försöken visade att det kohesiva terrassmaterialet egenskaper inte påverkades negativt vid som här fungerande dräneringsförhållanden, diken med gott fall utan växtlighet som reducerar vattenföringen. Tjälen har inte varit en faktor i dessa försök, men är förstås något som måste beaktas vid projektering.

Dimensioneringen av en banas tjocklek baseras nästan uteslutande till att erhålla en konstruktion som inte påverkas negativt av tjäle, lossning och lyft. Det finns en stor möjlighet till flexibilitet genom t.ex. en mindre grov indelning i klimat eller att vid goda dräneringsförhållanden, fall, bank eller skärning, göra en mer nyanserad design med hänsyn till tjälfarlighetsklass.

Innehåll

1. Bakgrund 5
1.1 Inledning 5
1.2 Syfte 5
1.3 Genomförande 6
2. Dimensioneringsaspekter 7
2.1 Tjäle 7
2.2 Bärighet 7
2.3 Deformation 8
2.3.1 Vertikalt 8
2.3.2 Horisontellt 8
2.4 Dynamiska aspekter 9
2.5 Sammanfattning 9
3. Fältförsök - utformning 10
3.1 Utformning av provsträckor 11
3.1.1 Instrumentering av provsträckor 12
3.2 Utförande av provsträckor 12
3.3 Kontroll av utförande 13
3.4 Program för uppföljning 13
3.4.1 Mätningar vid uppföljningstillfälle 13
4. Resultat 14
4.1 Permanenta deformationer 14
4.2 Elastiska deformationer 15
4.3 Tjäle 16
4.4 Summering- diskussion 17
5. Rekommendationer 19

Bilaga 1 Mätningar
Bilaga 2Terrassnivå
Bilaga 3 Geoteknisk undersökning

1. Bakgrund

1.1 Inledning

Järnvägsöverbyggnadens utformning bestäms för olika förhållanden, bank, berg- eller jordskärning av detaljerade typsektioner. Den dimensionering som utförs är i huvudsak att grovt anpassa underballastens tjocklek till terrassmaterial och klimat, enligt TRVAMA DCH.1 där terrassmaterial indelas som icke tjälfarligt och tjälfarligt. Typsektioner återfinns för nybyggnad, upprustning samt industrispår men i övrigt görs ingen anpassning till t.ex. livslängd, hastighet eller terrassmaterial, BVS1585.005 - Typsektioner för bana.

Dansk Banenorm ger att underballasten ska ökas från 0,1 m till 0,3 m med stigande hastighet på banan vid terrassmaterial av god kvalitet, vilket ger att Sveriges minimått på 0,5 m kan vara onödigt konservativt. Vid sämre terrassmaterial av materialtyp 3-5 är minimåttet 0,8 m i södra Sverige medan det i Danska Banenorm görs utskiftningar på 0,2 m med grus. Sammantaget indikerar det att det kan finnas möjlighet att i högre grad anpassa överbyggnaden till rådande förhållanden.

Avsaknaden av kristallint berg i Danmark gör att drivkraften varit att bygga med naturliga material medan Sverige baserat sin konstruktion på den goda tillgången på berg som finns. Det är därför svårt att direkt överföra erfarenheter till svenska förhållanden, speciellt då naturliga grusmaterial och grövre krossmaterial har olika värmeledningsegenskaper, vilket har stor betydelse för när tjälfri terrass åstadkoms för de olika konstruktionerna. I Sverige uppstod t.ex. tjälskador när banor började byggas med grova öppna krossmaterial, vilket gjorde att krav på konstorlekfördelning infördes, AMA DCH.16.

Byggandet av nya spår mellan Lund och Arlöv medför att ett dubbelspår byggs parallellt för att kunna bygga fyra nedsänkta spår i befintligt läge. Spåren är tillfälliga och har en lägre dimensionerande hastighet, vilket gör att det i projektet fanns goda förutsättningar för att under kontrollerade former studera betydelsen av underballastens tjocklek under några år.

1.2 Syfte

Projektet avser därför på utvalda teststräckor med olika tjocklek hos underballasten studera:

- elastiska deformationer i underliggande terrassmaterial
- kvarstående deformationer i underliggande terrassmaterial
- frostnedträngning i terrassmaterialet

Målsättningen är att projektet ska bidra med en ökad kunskap så att underballastens tjocklek i en framtid bättre kan anpassas till rådande förhållande, terrassmaterial, klimat, livslängd, hastighet, etc.

1.3 Genomförande

Projektet utfördes som ett rent fullskaleförsök där terrassmaterialet instrumenteras så att deformationen i terrassen kan studeras vid olika tjocklek hos underballasten. Ett provområde valdes för att erhålla så homogena förhållanden som möjligt för indelade provsträckor. Byggnationen dokumenterades och egenskaperna hos befintlig och nybyggd bana verifieras genom projektets egenkontroll.

Direkt efter färdigställande mäts den elastiska deformation som uppstår i terrassen vid tågpassage och den kvarstående deformation som hittills uppstått. Dessa mätningar har därefter upprepat under entreprenadtiden vid ytterligare 2 tillfällen. Den instrumenteringen som utfördes för detta utgjordes av så kallade EMU-spolar som installerades på olika nivåer i överbyggnaden.

Tjälnedträngningen uppmättes också på 3 st provsträckor för att kunna studera eventuella samband med underballastens tjocklek.

2. Dimensioneringsaspekter

Nedan diskuteras hur tjäle, terrassens bärighet och deformation hos terrass påverkar banans funktion och hur det kan eller hanteras vid design.

2.1 Tjäle

Tjäle påverkar banans funktion genom ojämna hävningar och genom att bärighetsproblem kan uppstå under tjällossning. Den spårbundna trafikens känslighet för deformationer har hanteras genom att banan grundläggs på tjälfritt djup, vilket innebär dryga metern i södra delen av landet och ca 3 m i norr.

En tjälberäkning för provområdet ger enligt PMS-objekt som används för vägbyggnad att en krossöverbyggnad måste vara minst 640 mm för att det inte ska ske någon tjällyftning, Malmö Ö (1210), vilket ska jämföras med 1,3 m för bana, (0,8+0,5). Beräkningen indikerar att man med hänsyn till tjäle kan ha betydligt tunnare underballast. Vidare stämmer den beräknade tjockleken bättre med den danska, ca 500+300 mm för 160<V<250 km/h på andra sidan sundet.

Dimensionering av vägar med hänsyn till tjällyftning baseras på historiska data från väderstationer runt om i landet och kan förstås även för bana utnyttja för att fånga lokala variationer. Här finns således en utveckling eller optimerings möjlighet.

2.2 Bärighet

Utformningen av ballast och underballast ska säkerställa att inget bärighetsbrott sker i såväl ballast som underliggande terrass av naturlig undergrund i skärning eller på fyllning i bank. Krav måste därför ställas på ballastmaterial, ballasttjocklek, slipersmått och slipersavstånd för att inte brott ske.

Ett överslag på säkra sidan ger att ett bärighetsbrott inte kommer att ske under en enskild slipers om avståndet från underkant sliper till terrass är minst halva slipersavståndet, (antagande lastspring på 2:1 i ballasten). Normalt är slipers 300 mm breda och avståndet är 600 till 800 mm, vilket ger att om underballast är minst 200 mm så kommer inget brott ske i terrass.

En tjälfri terrass säkerställer att det inte i samband med tjällossning uppstår en vattenöverskott och vattenmättad jord på terrassytan, vilket påverkar bärigheten negativt genom lägre effektivspänningar. Ett sådant brott innebär även att underliggande jord riskerar att ”pumpas ” upp i underballasten.

Bärighetsbrott vinkelrätt banan omfattar en större jordvolym och fler sliprar, vilket i det fallets är stabilitetsbrott som kan inträffa vid svag undergrund och hög bank. Detta totalstabilitetsbrott kontrolleras genom krav och anvisningar i TRVINFRA-00230 Geokonstruktion samt utifrån vald normalsektion och rådande förhållande, bank, underbyggnad och undergrund.

2.3 Deformation

2.3.1 Vertikalt

Vid en axelpassage så ska normalsektionen säkerställa att deformationen vid en överfart får acceptabel storlek och är återgående, elastisk. Eftersom lasten är dynamisk och materialens styvhet är tids- och töjningsberoende så krävs det avancerade beräknings- och materialmodeller för att uppskatta deformationen någorlunda korrekt.

Enkla överslag visar dock att det är undergrundens deformationsegenskaper som är helt dominanta i systemet. I tabellen nedan redovisas den deformation som erhålls för en boggilast (TRVINFRA-00230 Geokonstruktion avsnitt 6.2.6.2.1.2.2) vid olika mäktighet hos underballasten och E-modul hos undergrunden vid sättningsfri undergrund på 8 m djup. 20 MPa motsvarar den statiska E-modul som kan förväntas hos t.ex. en fast lagrad sand eller lermorän medan 5 MPa motsvarar en löst lagrad sand eller lös lera. En tjockare överbyggnad har således en marginell effekt på elastiska deformationer.

Tabell 1 Statisk deformation under boggilast vid olika överbyggnadsmäktighet och undergrundsmodul

	20 MPa	5 MPa
800 mm	4 mm	15 mm
500 mm	5 mm	17 mm
300 mm	5 mm	19 mm

2.3.2 Horisontellt

För att en bana ska vara stabil erfordras även ett tillfredställande sidostöd, vilket indirekt säkerställs genom krav på släntlutning och bankettens bredd. Enligt BVS1585.005 - Typsektioner för bana ska avståndet från spårmitt till bankettens släntkrön nominellt vara 3,7 m och det kan variera mellan 3,25 m och 4,0 m. Vid banupprustning är avståndet nominellt satt till 3,25 m och för industrispår 2,75 m. Ballasten är i samtliga fall satt till att vara 3,3 m bred vid användande av betongslipers.

Grundläggningsdjupet på slipers gör att sidostödet är helt beroende av ballasten bredd och kvalitet. Det innebär att underballast och underbyggnad ska läggas med en släntlutning som gör att inga horisontella deformationer sker, eftersom det indirekt kan ge en sättning som underminerar sidostödet från ballasten.

Den erfarenhet som finns är att en släntlutning på 1:1,5 erfordras i krossmaterial för att en

slänt långsiktigt ska anses vara stabil utan att större horisontella krypdeformationer uppstår. I övergången intill broar där även mycket små krypdeformationer påverkar funktionen negativt så har det visat sig att en flackare slänt 1:1,7 kan vara nödvändig. Med ett sådant resonemang, dvs släntlutning 1:1,7, så kan bankettens släntkrön läggas 2,5 m från spårmitt. Beaktas även att en något bredare bankett kan behövas i ytterkurva så är det ställda kravet på industrispår 2,75 m rimligt. Släntlutningen i underbyggnaden ska anpassas till det fyllnadsmaterial som används enligt TRVINFRA-00230 Geokonstruktion. Krossmaterial ska dock läggas i 1:1,7.

2.4 Dynamiska aspekter

Upprepade axelpassager kan bygga upp portrycksökningar som kan göra att terrassen förlorar sin bärighet, vilket dessutom kan orsaka materialvandring även vid användande av t.ex. geotextil. Portrycksökningarna som kan orsaka brott uppstår i jordar som inte är fridränerande och inte har en odränerad hållfast, dvs friktionsjord med mer än ca 10% finjordshalt. Jordar klassificerade som lera har en odränerad hållfasthet som gör att brott inte uppstår utan leran kommer med tiden att konsolideras för en högre spänningsnivå.

Studerar man vertikalspänningen från boggilasten ovan så minskar vertikalspänningen på terrass med i snitt 15% om man går från 300 mm till 800 mm underballast, vilket gör att problematiken inte kan säkerställas genom att öka underballastens tjocklek. För friktionsjordarna där problem kan uppstå (t.ex. siltig sand, silt, siltmorän) under grova krossmaterial så är det helt avgörande att jorden inte är vattenmättade upp till terrassytan, dvs att banans dränering har en god funktion. Nyttan med en tjockare överbyggnad är att effektivspänningarna på terrassnivån är större och därmed bärigheten, vilket gör att konstruktionen blir mindre känslig om dränering och avvattning under kortare tider inte fungerar tillfredställande.

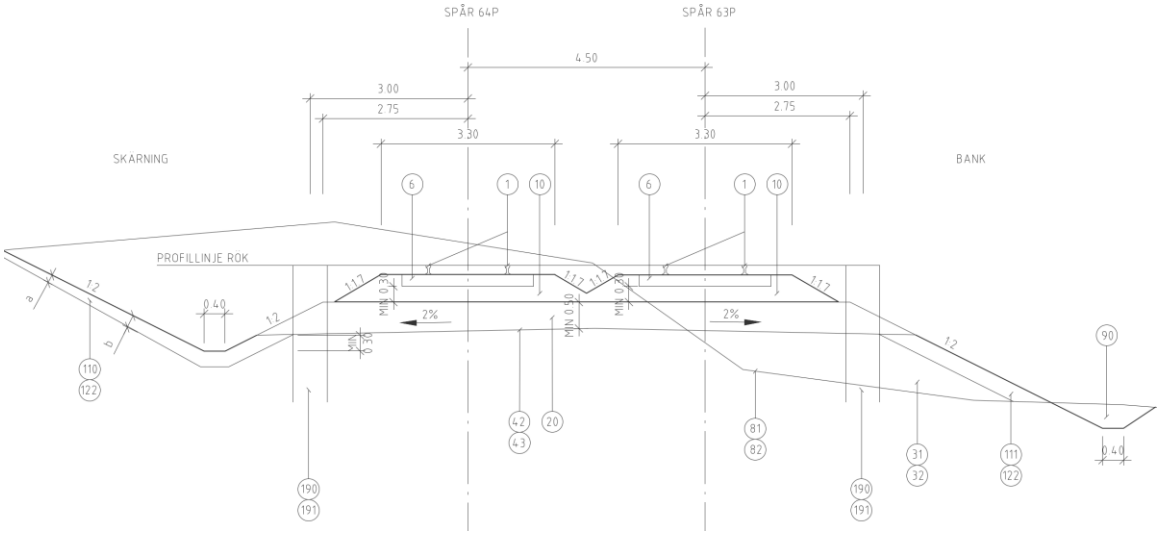
2.5 Sammanfattning

Den enkla genomgången av dimensioneringsaspekter visar att underballastens tjocklek som förväntat har en avgörande betydelse för dimensionering med avseende på tjäle. Dräneringen av terrass har stor betydelse för banans funktion och en tjockare underballast gör att en undermålig dränering eller svårigheter med avvattning i området får ett lägre genomslag när det inträffar.

För övriga aspekter är undergrundens egenskaper dominanta och underballastens tjocklek har därför en underordnad rent av marginell påverkan.

3. Fältförsök - utformning

Fältförsöken utgörs av ett ca 100 m långt provområden som indelades i två provsträckor för vardera spår, upp- och nedspår, dvs totalt 4 provsträckor. Normalsektion för temporärt spår framgår av figuren nedan, vilken visar att avsteg gjorts från gällande regelverk gjorts genom att underballasten är 500 mm mot kravställda 800 mm för materialtyp 3b till 5, >15% finjordshalt. Inom varje provsträcka återfinns två instrumenterade profiler för att mäta elastisk deformation vid tågpassage och den kvarstående deformation som uppstår över tid. Tjälnedträngning mäts även vid 3 olika överbyggnadstjocklekar.

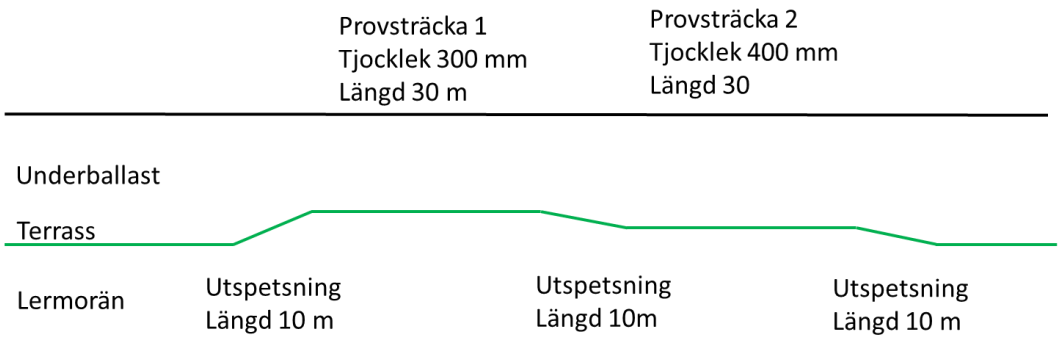


NR	BENÄMNING	KOD AMA 10	MATERIAL/TYP	ANMÄRKNING
1	RÄL		60E1 (h=172 mm)	
6	SLIPER		BETONG	
10	BALLAST	DCH.311	MAKADAMBALLAST KLASS I	FÖRSTÄRKNING, MIN 30 CM UNDER SLIPERS
20	UNDERBALLAST	DCH.15	BERGKROSSMATERIAL	FÖRSTÄRKNING
31	BANKFYLLNING	CEB.321	MATERIALTYP 2 ELLER 3B	
32	UNDERBALLAST	CEB.322	MATERIALTYP 4 ELLER 5A	
42, 43	MATERIALSKILJANDE LAGER	DBB.132	GEOTEXTIL, BRUKSKLASS N2-N2	UTFÖRS VID BEHOV
60	FYLLNING FÖR BÄDD UNDER FUNDAMENT	CEB.46	JORD- ELLER KROSSMATERIAL	MATERIALTYP 2 TJOCKLEK MINST 300 MM
63	LEDNINGSBÄDD FÖR KABELRÄNNA	CEC.22	JORD- ELLER KROSSMATERIAL	MATERIALTYP 2 ELLER 3B
66	KRINGFYLLNING FÖR FUNDAMENT	CEB.53	JORD- ELLER KROSSMATERIAL	MINST MATERIALTYP 2
68	KRINGFYLLNING FÖR KABELRÄNNA	CEC.32	BERGKROSS-, JORD- ELLER GRUSKROSSMATERIAL	MATERIALTYP 1 ELLER 2
81, 82	BORTTAGNING AV MARKVEGETATION OCH JORDMÅN	BFE.1	KULTUR/SKOGSMARK	UTFÖRS VID BEHOV
90	JORDSCHAKT FÖR BANKDIKE	CBB.611		UTFÖRS VID BEHOV
110	EROSIONSSKYDD PÅ JORDSLÄNT	DCK.211/212	JORD- ELLER KROSSMATERIAL	UTFÖRS VID BEHOV
111	EROSIONSSKYDD PÅ BANKFYLLNINGSSLÄNT	DCK.212	JORD- ELLER KROSSMATERIAL	UTFÖRS VID BEHOV
122	VÄXTETABLERING	DDB.13	SPRUTSÅDD	ANLÄGGS VID EROSIONSSKYDD AV JORDMATERIAL. BANKSLÄNT UPP TILL 2.2 M UNDER RÖK YTTERSLÄNT ÖVER 2.0 M ÖVER RÖK

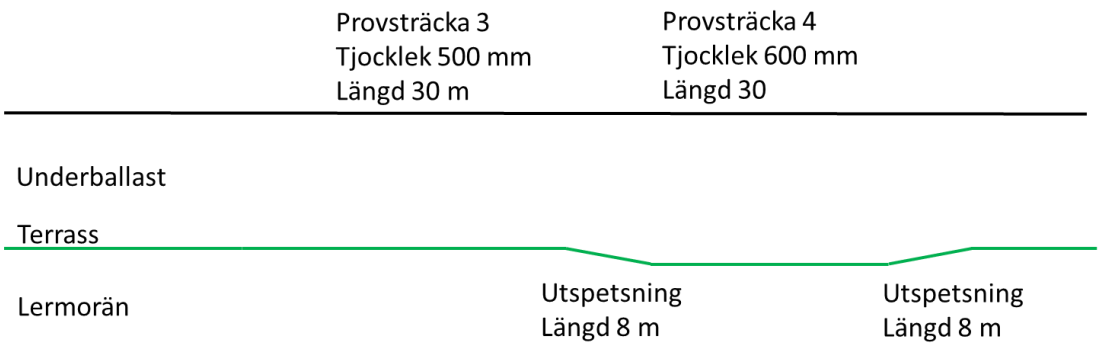
Figur 1 Normalsektion temporärt dubbelspår

3.1 Utformning av provsträckor

Försöken avser att studera deformationerna i järnvägsöverbyggnader med 4 olika tjocklekar av underballast 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m och 0,6 m. Tjockleken överensstämmer med dansk och svensk norm samt ett mellanting för terrassmaterial av god kvalitet.



Figur 2 Utformning av provsträckor uppspår



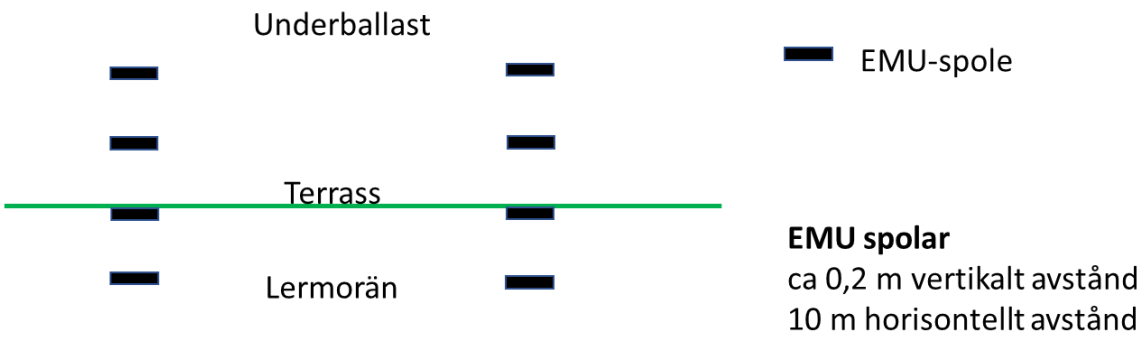
Figur 3 Utformning av provsträckor nedspår

Provsträckornas är placerade på en delsträcka där banans terrass ligger i gränsen naturlig jord av lermorän och fyllning av lermorän mellan sektion 605+300 till 605+400, se även Bilaga 3 Geoteknisk undersökning. I Bilaga 2 Terrassnivå redovisas avvikelsen på terrassnivån utifrån den önskade mäktigheten hos underballasten.

3.1.1 Instrumentering av provsträckor

Deformationer

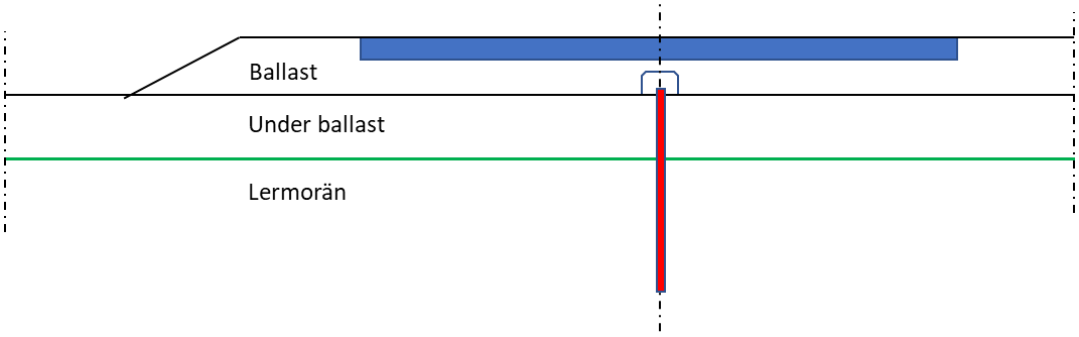
Instrumenteringen för att studera deformationerna i överbyggnaden vid en järnvägspassage och att följa den kvarstående deformationer görs genom att EMU-spolar byggs in i överbygganden och en bit ned i terrassen av lermorän, se figuren nedan. EMU-spolar installeras med 100 mm vertikalt avstånd i två profiler mitt i vardera spår.



Figur 4 Principiell instrumentering av EMU-spolar i underballast och fyllning

Tjälnedträngning

Tjälnedträngningen mäts vid 3 st överbyggnadstjocklekar, 0,3 m, 0,4 m och 0,6 m, se nedanstående figur. Efter foderrörsborrning fylldes mellanrummet runt tjälstavarna med sand. En stålhatt placerade över staven för att skydda instrumenteringen vid den mekaniska utläggningen av den grova järnvägsballasten och slipers.



Figur 5 Principiell instrumentering tjälstavar

3.2 Utförande av provsträckor

Byggandet av provsträckorna utfördes enligt nedanstående arbetsordning:

1. Schakt och fyllning av lermorän utförd och packad enligt AMA CEB.322 till

avsedd terrassnivå, se bilaga 9 inmätt avvikelse.
2. Utläggning och packning av underballast enligt AMA DCH.15
3. Lokal schakt för instrumentering av undre givare ca 20 cm ned i terrass av lermorän.
4. Undre givare placeras ut.
5. Fyllning och packning av ett 20 cm tjockt packat lager av lermorän.
6. Givare placeras ut och skyddas med 30 mm 0-18 material.
7. Utläggning och packning av tunt underballast.
8. Givare placeras ut och skyddas med 30 mm 0-18 material över och under.
9. Förfarandet upprepades till samtliga givare är installerade.
10. Den färdiga ytan för underballast packades i läget för instrumenteringen enligt AMA DCH.15.
11. Utläggning av järnvägsballast och slipers.

3.3 Kontroll av utförande

Provområdet utförandes enligt angivna AMA koder för fyllning och utläggning av underballast.

3.4 Program för uppföljning

3.4.1 Mätningar vid uppföljningstillfälle

Deformationen i överbyggnad och terrass nollmättes i samband med trafikpåsläpp augusti 2020 och bestämdes därefter vid ytterligare 3 st tillfällen, december 2020, april 2021 och mars 2023.

Tjälnedträngningen kunde kontinuerligt följas under vinterhalvåret på Trafikverkets hemsida http://tjaldjup.trafikverket.se/

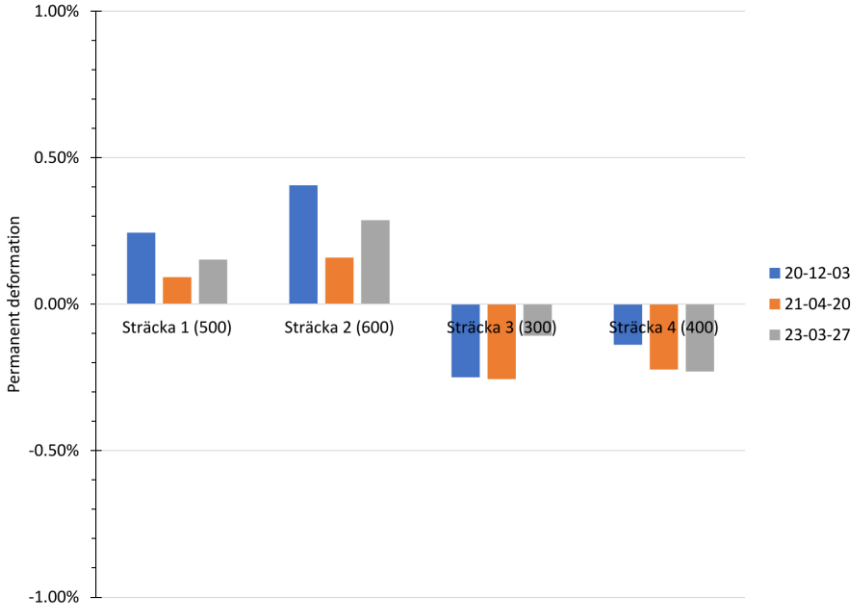
4. Resultat

Mätningarna av deformationerna i terrass och underballast utfördes och sammanställdes av VTI Håkan Carlson. Förutsättningarna för mätningar samt resultat redovisas mer utförligt i Bilaga 1 Mätningar.

4.1 Permanenta deformationer

Eftersom schakt utfördes genom den redan utlagda underballasten och via handschakt ned i terrassen så får den instrumenterade profilen sannolikt något annorlunda egenskaper. Det kan även ha visat sig genom den inledningsvis sker rörelser, vilket kan bero på den återfyllda instrumenterade profilen högre eller lägre styvhet i förhållande till omgivande terrass, se figur 5. Förändringar i mätresultatet från tillfällen efter trafikpåsläpp ligger sannolikt inom mätnoggrannhet.

Den deformationsförändring som i detta falla har uppmätts på någon millimeter mellan spolarna har sannolikt inträffat strax efter trafikpåsläpp. Studeras inverkan av under ballastens tjocklek så uppstod en hävning hos de mäktigare och en sättning hos de tunnare. Den förändringen i deformation ger ett linjärt intryck mot tjocklek, men skillnaderna är små och ligger inom eller nära mätnoggrannhet.

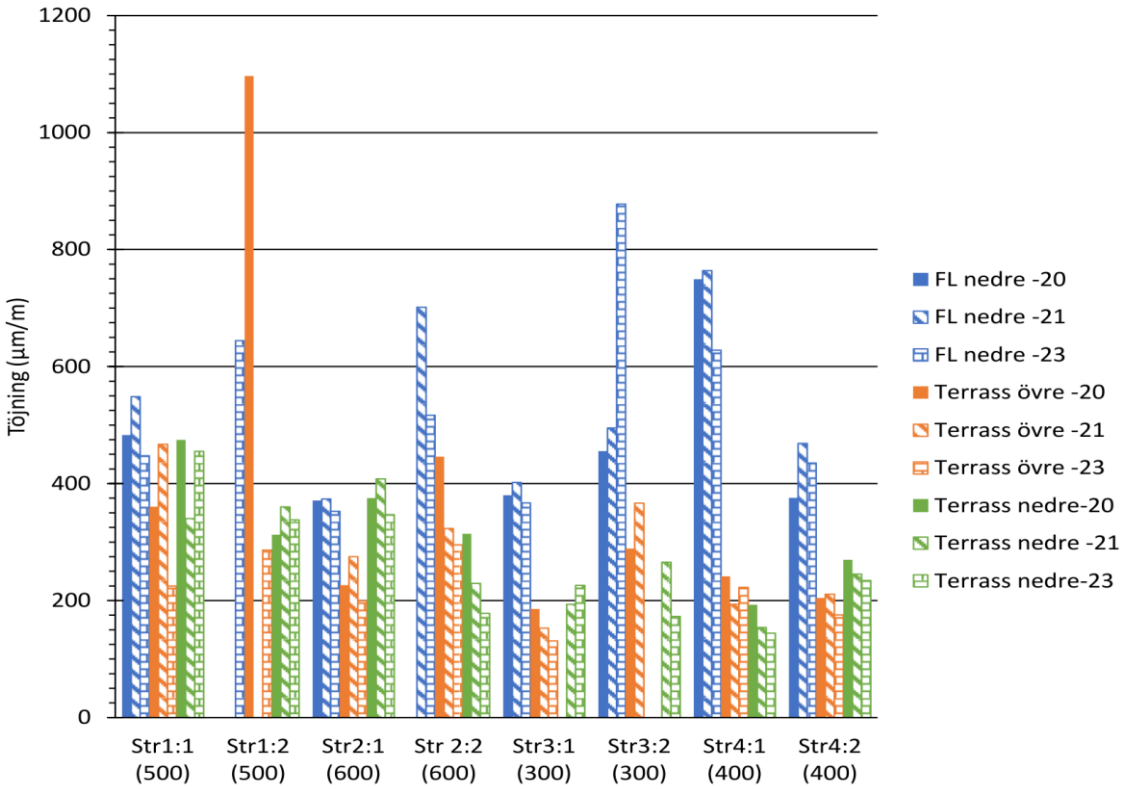


Figur 6 Permanent medeltöjning mellan övre och undre EMU-spole.

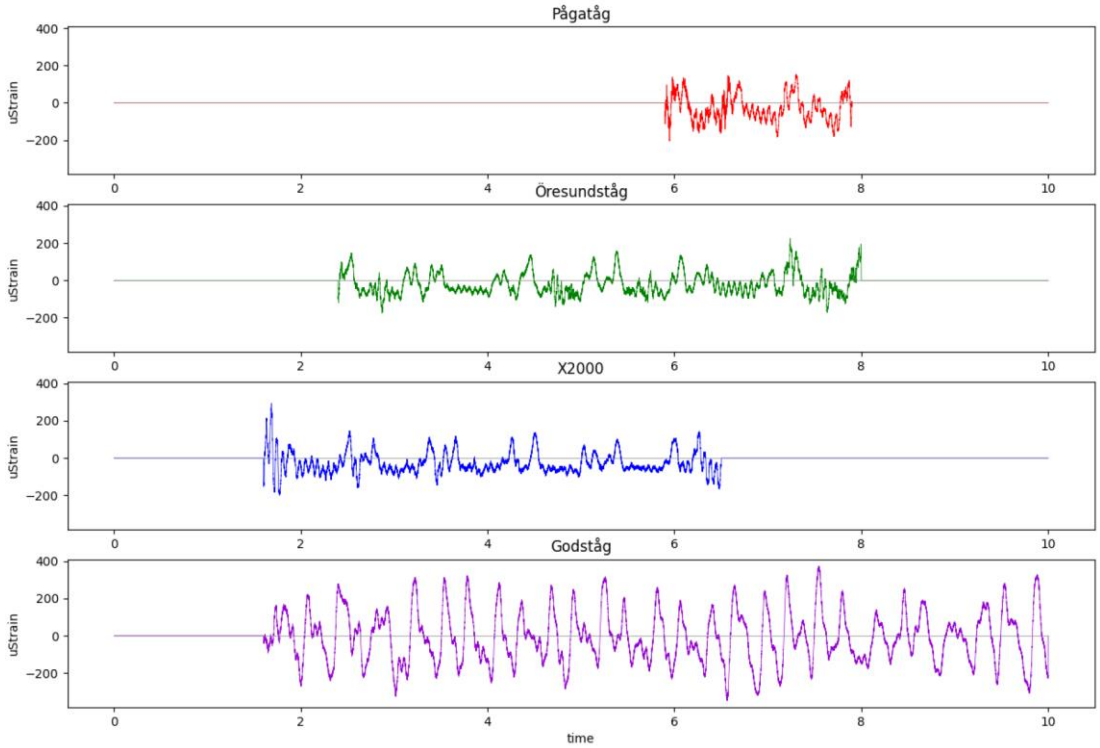
4.2 Elastiska deformationer

Deformationer i samband med tågöverfarter visade sig vara svårare då mätsystemet störs av omgivande magnetfält. Insamlade signaler måste därför ”tvättas” och resultatet har därför en osäkerhet även efter medelvärdesbildning.

Mätningarna 2020, 2021 och 2023 uppvisar i huvudsak större skillnad mellan olika provsträckor än mellan mättillfällena, se figur 6. En utjämning av uppmätt töjning kan skönjas, men mätningarna förfaller i övrigt vara förhållandevis repeterbara. Noterbart och kanske förvånande är att töjningen genomgående är större i förstärkningslagret än i den underliggande terrassen. Skillnaden till följd av lastspridning är i sammanhanget försumbar och underballast anses normalt ha en högre styvhet oberoende terrassmaterial, vilket borde resultera i lägre uppmätta töjningar i lagret. Det indikerar att materialet till följd av tågtrafiken inte är fullständigt stabilt utan kan påverkas av överfarterna.



Figur 7 Medeltöjning vid passage av Pågatåg, persontåg.



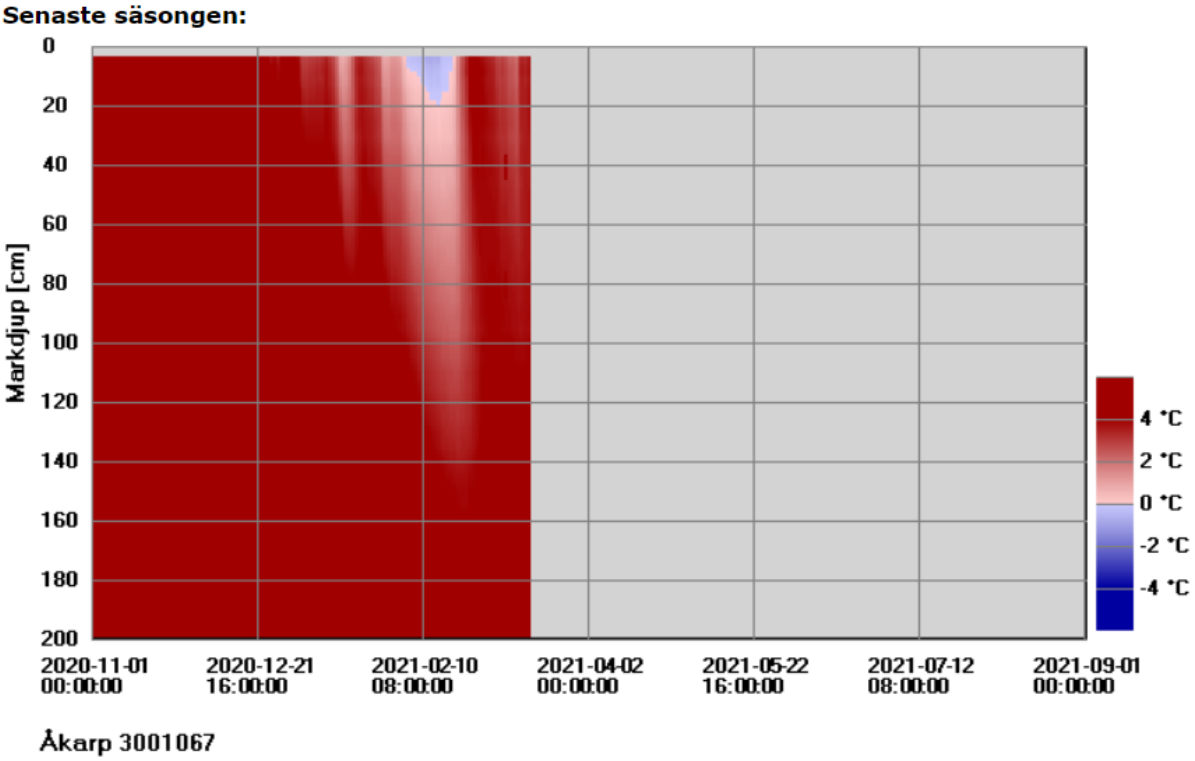
Figur 8 Uppmätta töjningar vid olika tågtyper, terrass provområde 4.

I figuren ovan redovisas uppmätta töjningar vid passager av olika tågtyper, persontåg och godståg. Som väntat ger de betydligt större axellasterna från godstågen avsevärt högre och markanta töjning, men också ett tydligt uppmätt elastiskt beteende då det uppmätta lagret (ca 0,2 m) till och med sväller mellan axelpassagerna.

4.3 Tjäle

De mycket milda vintrarna senaste åren gör att tjälnedträningen varit mycket modest, som mest ca 20 cm ned i underballastlagret vintern 2021, och den uppmätta tjälnedträningen är i det närmaste identiska för de tre tjälstavarna. Den skillnad som möjligen kan skönjas är att lagret har en isolerande effekt då temperaturen påverkas till ett något lägre djup. I bilaga 2 redovisas resultatet från samtliga tjälstavar.

En strängare vinter hade förstås blivit mer utslagsgivande och är en förutsättning för att kunna studera betydelsen av underballastens tjocklek.



Figur 9 Uppmätt tjälnedträngning vintern 2021 i underballastlager med 300 mm tjocklek

4.4 Summering- diskussion

Resultaten från detta fullskaleförsök med syfte att studera betydelsen av underballasten kan vid första anblicken tyckas vara magra då i princip inga skillnader kunde fastställas för de olika prövade tjocklekarna.

Denna typ av mätningar är svåra att utföra då givarna installeras och byggs in manuellt, vilket gör att erhållet resultatet får en spridning och det kan alltid ifrågasättas om resultatet är representativt för provytan som helhet eller ett utslag av skillnader vid instrumentering. Magnetfältet från kontaktledningarna visade sig även vara en utmaning när den elastiska responsen skulle analyseras. Försöken visar trots det att banan snabbt når ett stabilt tillstånd utan krypdeformationer och att svaret från banan vid en tågpassage även det är stabilt.

Terrassmaterialet har inte utsatts för tjäle, lyftning eller lossning, vilket skulle kunna ge deformationer genom lägre bärighet och materialvandring. Terrassen som utgörs av lermorän har ett kohesivt beteende och påverkas därför i liten grad av dräneringens funktion eller om den t.ex. överbelastas under kortare tid vid riklig nederbörd.

Försöken indikerar att överbyggnadsmaterialet och dess tjocklek har en marginell betydelse om faktorerna ovan hanteras korrekt. Överbyggnadsmaterialet måste förstås

motstå mekanisk nedbrytning samt vara så fridränerande att det inte påverkas av ett varierande vatteninnehåll med hänsyn till tjäle och bärighet.

Försöken har dock avgränsats till terrass av lermorän som har en hög hållfasthet. Moränlera behåller en hög hållfasthet även efter omröring eller störning, t.ex. när terrassen påverkas mekaniskt av ett grovt krossmaterial.

Resultaten belyser att dimensionering av överbyggnaden kan utföras mer flexibelt och sannolikt bättre anpassat till de lokala förhållandena. En sådan tillämpning ställer förstås högre krav på såväl projektering som produktion.

5. Rekommendationer

Utförda försök visar att underballasten har en marginell betydelse vid en terrass med stabil bärighet. Förhållandena längs en bansträcka varierar ofta genom olika terrassmaterial och den går omväxlande i skärningen eller på bank. Det senare har förstås stor påverkan på dräneringsförhållandena och möjligheten att förhindra att terrassmaterialet blir vattenmättat eller för den del även överbyggnadsmaterialet. När det gäller tjäle så borde den lokala väderhistoriken som finns samlad kunna utnyttjas bättre.

Tjäle
Tjäle är idag oftast dimensionerande för överbyggnadsmäktigheten även i söder. Dagens grova indelning med hänsyn till tjäle borde med ganska enkla medel kunna nyanseras genom att bättre beakta lokala klimatvariationer. Tjälfritt djup önskas för bana och det påverkas inte bara av rådande klimat utan även av överbyggnadsmaterialens värmeledningsegenskaper och vatteninnehåll.

Tjäldjupsmätningar kopplade till väderdata har utförts på i huvudsak vägnätet. Dessa borde därför utökas och kompletteras så att det omfattar fler järnvägsöverbyggnader, olika uppbyggnad och tjocklek, och över tid öka kunskapsbasen. Sannolikt ett långsiktigt arbete, vilket belyses av att den senaste riktigt stränga vintern var för över 10 år sedan, 2011.

Dränering
Partier där både väg och bana uppvisar sämre funktion sker ofta i skärning men även i flackt landskap på låg bank. Det senare försvårar avvattningen av anläggningen genom låga fall på dräneringen och långa avstånd till recipienter för vattnet. Det ger högt vatten i diken och sämre avvattning av terrassen, men förstås också översvämningar vid riklig nederbörd som på kort tid kan orsaka stor skada.

Med dessa självklarheter i minne så är det svårt att försvara att avståndet mellan terrass och dräneringsnivå alltid ska var 0,3 m. En lägre dräneringsnivån för terrassen skulle borga för en bättre funktion och minskad risk för skada vid skyfall. När detta uppmärkssammans och beaktas så görs detta ofta genom en mäktigare överbyggnad, vilket förstås även det sänker dräneringsnivå.

Överbyggnadsmaterial
För terrassmaterial som inte kan anses frídränerande (ca 10% finjordshalt) så kommer terrassen vatteninnehåll att variera och därigenom också terrassens bärighet. Mycket talar för att den undre delen av överbyggnader med fördel ska utgöras av material med mindre stenstorlek så att ett jämnare tryck uppstår, minskar risken för bärighetsproblem och även att material pumpas upp till följd av höga kontaktryck. Den äldre lösningen som förr tillämpades på väg med ett kombinerat materialskiljandelager/skyddslager i botten av överbyggnaden är sannolikt en bättre lösning som helhet. Att materialet även fortsättningsvis inte är tjällyftande och är fridränerande är förstås centralt.

Konceptet har även stora fördelar när terrassen utgörs av lös lera där det visat sig att grövre fraktioner genom omröring förstör den övre delen av leran så att hållfasthet och bärigheten där helt försvinner.

Dimensionering

Dimensionering av järnväg som har spårbunden trafik i höga hastigheter måste förstås göras med försiktighet och säkerställa att den förslagna anläggningen blir robust mot klimat och varierande egenskaper hos terrass. Utförda försök där underballast var upp till 0,5 m tunnare än gällande regelverket indikerar att mycket finns att vinna om lokala anpassningar kan göras till klimat, dräneringsförhållanden och terrass. På samma förbispår uppstod även lokalt bärighetsproblem, vilket belyser att en större flexibilitet kan behövas även åt andra hållet.

H. Carlsson

Linköping 2023-06-19

Järnväg Malmö-Lund

Responsmätningar på provsträckor vid Flackarp

Inledning

På järnvägssträckan Malmö-Lund, vid Flackarp, har fyra korta provsträckor anlagts på den tillfälliga järnvägsdragningen i samband med den större ombyggnaden av det befintliga dubbelspåret mellan Malmö och Lund. Provet utgörs av fyra olika tjocklekar på underballasten som består av förstärkningslagermaterial 0-150 mm och som ligger mellan terrassen och överballasten (32-63 mm) med slipers. Provsträckorna är 30 m långa med 8 m övergångssträcka.

I södergående riktning, mot Malmö, ligger sträcka 1 och 2 med 500 respektive 600 mm underballast. I norrgående riktning, mot Lund, ligger sträcka 3 och 4 med 300 respektive 400 mm underballast.

Figur 1. Provsträckor med ballastmaterial vid Flackarp.

För uppföljningen av sträckorna genom mätning av deformationer, permanenta och dynamiska vid belastning av tåg, installerades i februari 2019 sensorer av typen EMU-spolar i bankropen. EMU-spolar är induktiva spolar som används för att mäta avståndet sinsemellan spolarna. Spolarna placerades i bankroppen i en vertikal serie (stapel) så att de mäter avståndet i de understa ca 15 cm av underballasten och de översta ca 30 cm (15+15 cm) av terrassen. På varje sträcka installerades två serier av mätspolar, X:1 och X:2 i olika sektioner i spårets mitt. På de fyra sträckorna betyder det total 8 serier med mätspolar.

Responsmätning med spolarna sker genom en avläsning av det statiska avståndet mellan dem för beräkning av ev. permanent deformation samt genom insamling av mätsignal vid tågöverfart för mätning av elastisk deformation vid belastning av tågens hjulaxlar.

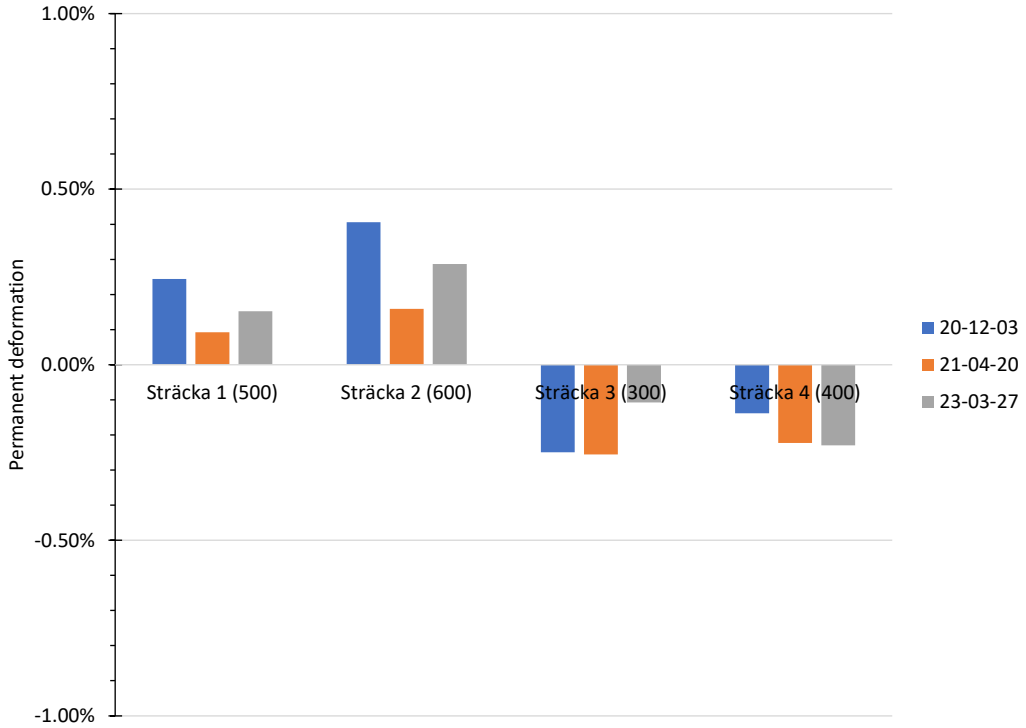
På sträcka 1 (500), sträcka 2 (600) och sträcka 3 (300) installerades även tjälgränsmätare för att kontinuerligt mäta tjäldjupet vintertid och urtjälningsförloppet under våren.

Permanent deformation

Strax innan spåret började trafikeras gjordes i augusti 2020 en s.k. nollavläsning av EMU-spolarna för att bestämma det statiska avståndet mellan dem innan någon belastning skett av tågtrafiken. Den avläsningen utgör sedan utgångsvärdet för framtida avläsningar av de statiska avstånden för att beräkna eventuella permanenta deformationer i de aktuella lagernivåerna i bankroppen.

I december 2020, efter ca 4 månaders trafik, gjordes en första förnyad avläsning av de statiska avstånden mellan mätspolarna och skillnaden mot nollmätningen beräknades. Samma mätprocedur upprepades också i april 2021, efter ca 8 månaders trafik och den första vinterperioden, samt den senaste avläsningen som gjordes i slutet på mars 2023. Generellt är det väldigt små skillnader mellan samtliga mätningarna, nollmätningen och de tre uppföljande mätningarna. Skillnaden mellan uppföljande mätningarna är väldigt liten, i storleksordningen ca 0,1-0,2 %. Vilket kan sägas ligga inom felmarginalen. I figur 2 redovisas medeldeformation per sträcka i procent, sammanställt från avläsningarna på de tre nivåerna och på två sektioner per sträcka. På sträcka 1 och 2, med tjockare lager, är det en liten deformation initialt, som skulle kunna bero på viss efterpackning av de tjockare lagren. På Sträcka 3 och 4 är det väldigt små negativa värden vilket tyder på att det inte skett någon deformation och att det därför ligger inom mätnoggrannheten. I tabell 1 redovisas de enskilda beräknade totala deformationerna från augusti 2020 fram till mars 2023 för de tre nivåerna i båda sektionerna per sträcka. Som framgår av tabell 1 är det några bortfall med osäkra data. Det är en spridning i de enskilda värdena utan några framträdande tydliga tendenser mellan sträckorna. Sammantaget är det väldigt små värden vid de uppföljande mätningarna och det finns ingen tydlig tendens till att deformationerna skulle öka med tiden, under de ca 2½ år som sträckorna trafikerats. Därför är slutsatsen att tillståndet är så gott som oförändrat sedan trafikpåsläpp.

På sträcka 1 har två avläsningar uteslutits p.g.a. mätfel av något slag, då de är väldigt osäkra och avvikande. Även på sträcka 2 har ett osäkert värde uteslutits.



Figur 2. Permanent medeldeformation från augusti 2020 till december 2020, april 2021 och mars 2023.

Tabell 1. Uppmätta totala deformationer i mm per lager från augusti 2020 fram till mars 2023

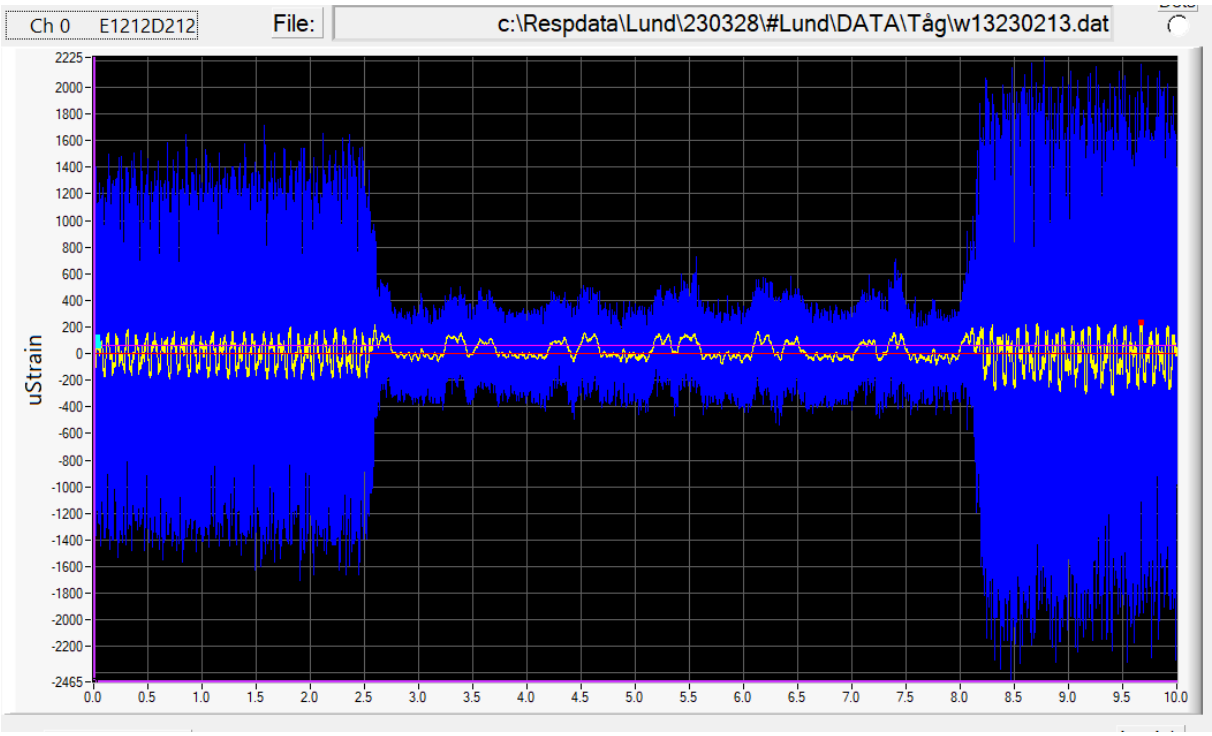
Sträcka (tjocklek)	Sträcka 1 (500)		Sträcka 2 (600)		Sträcka 3 (300)		Sträcka 4 (400)	
Position	Sekt. 1	Sekt. 2	Sekt. 1	Sekt. 2	Sekt. 1	Sekt. 2	Sekt. 1	Sekt. 2
Underballast	0,41	-	0,26	0,58	-0,14	-1,01	1,09	-1,76
Terrass	0,13	-	0,22	-	0,00	0,98	0,27	-0,91
Terrass	0,13	0,75	1,27	0,10	0,01	-0,72	0,04	-0,59

Elastisk deformation

Vid mätningarna i december 2020, april 2021 och mars 2023 gjordes även datainsamlingar av signalen för att mäta den dynamiska deformationen när tågen trafikerar över mätspolarna. Av mättekniska skäl kan bara insamling ske på en nivå och två sträckor samtidigt. Det gör att de krävs flera tågpassager för att samla i mätdata på samtliga mätspolar. Trafiken på sträckan består till väldigt stor del av lokala pendeltåg av typen Pågatåg och Öresundståg. Eftersom det kan antas vara marginell skillnad i vikt och axellaster inom respektive tågtyp kan de användas för att jämföra sträckorna. Det förekommer även en del andra tåg, exempelvis X2000 och godståg, men de är inte lika frekventa. Se nedan i figur 9 för ett exempel på insamlad mätsignal för de olika tågtyperna som en jämförelse av de påkänningar de olika tågen genererar.

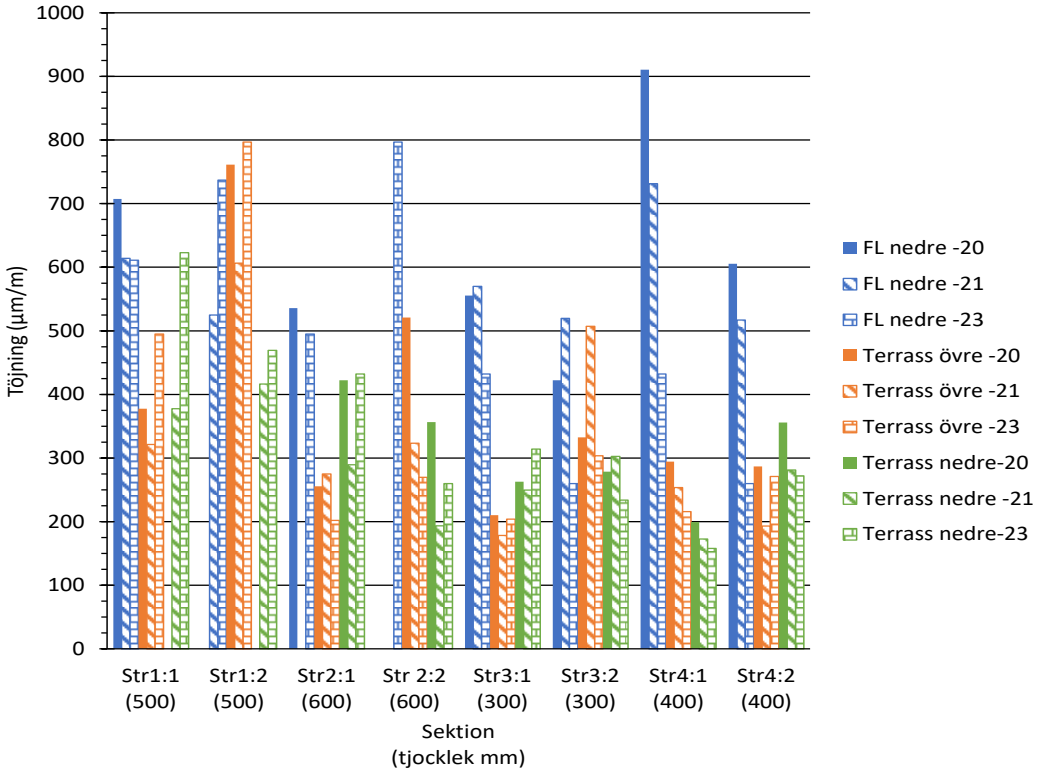
Mätteknisk är järnvägsmiljön väldigt svår att mäta i då det finns omfattande störning från bl.a. de högspänningsledningar som finns vid järnvägen och som alstrar störning i mätsystemet. Därför krävs betydande bearbetning av insamlade mätsignaler för att filtrera bort störningar som ligger som ett

brus på signalen och genom det få fram en tydlig signal av den dynamiska deformation som uppstår då tågens axlar rullar över och belastar sensorerna. I figur 3 redovisas ett exempel på en insamlad signal där det störande bruset (blå kurva) filtreras bort för att de dynamiska deformationerna från tågaxlarna ska framträda (gul kurva). Det framgår också att huvudorsaken till bruset kommer utifrån vilket visar sig tydligt när tåget kör över givaren och skärmar bort en stor del av bruset. Se det större bruset i den blå kurvar före och efter tågets passage. Från den insamlade signalen beräknas en uppmätt töjning (relativ elastisk deformation) som skillnaden mellan en obelastad basnivå mellan axlarna och maximal toppvärdet vid axelpassagen. Inom respektive enskilt tåg av typen Pågatåg och Öresundståg är det relativt liten variation i dynamisk deformation mellan axlarna. Det betyder att varje tågpassage med dessa får ett representativt värde för uppmätt töjning för den passagen.

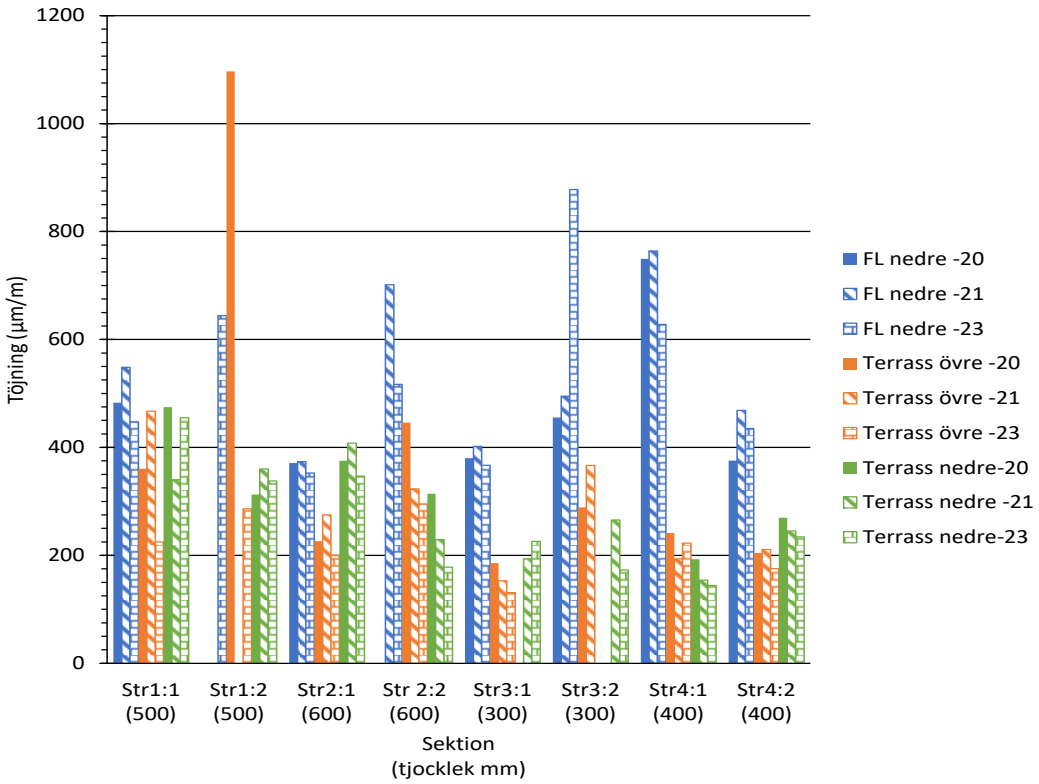


Figur 3. Exempel på uppmätt signal med brus och filtrering vid passage av Pågatåg på sträcka 2.

I figur 4 och 5 har en sammanställning gjorts av de uppmätta dynamiska deformationerna uttryckt i elastisk töjning för respektive mätgivare, fördelade på de tre nivåerna och de 8 sektionerna. P.g.a. de kraftiga störningarna på mätsignalen är det en del bortfall på data när den inte gick att analyseras med säkerhet.

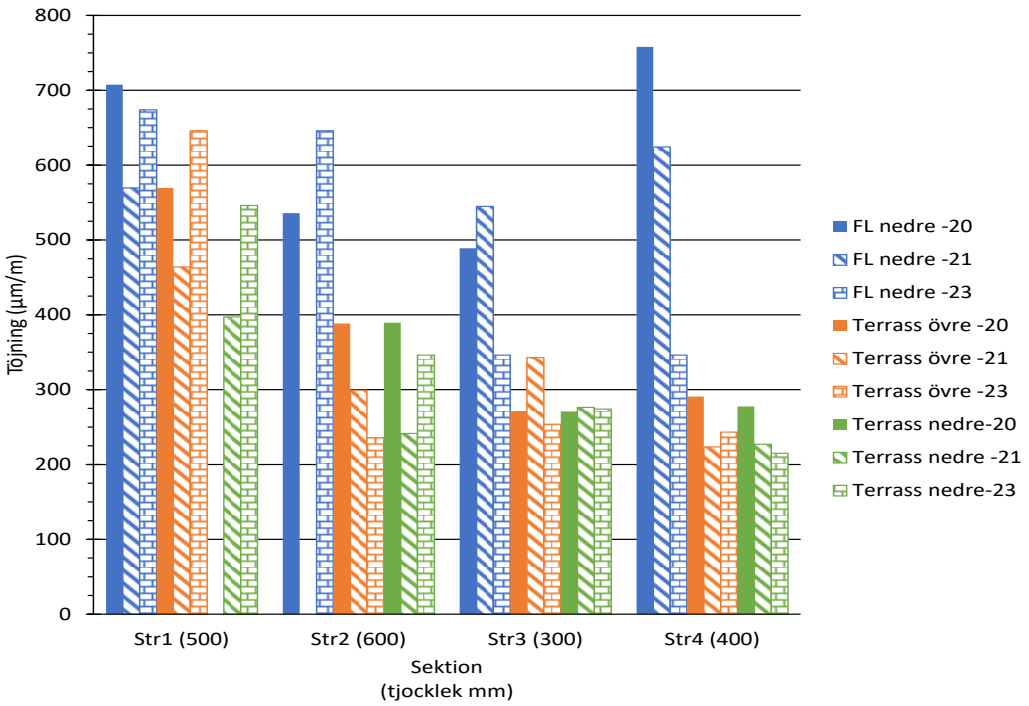


Figur 4.Uppmätta töjningar vid passage av Pågatåg december 2020, april 2021 och mars 2023.

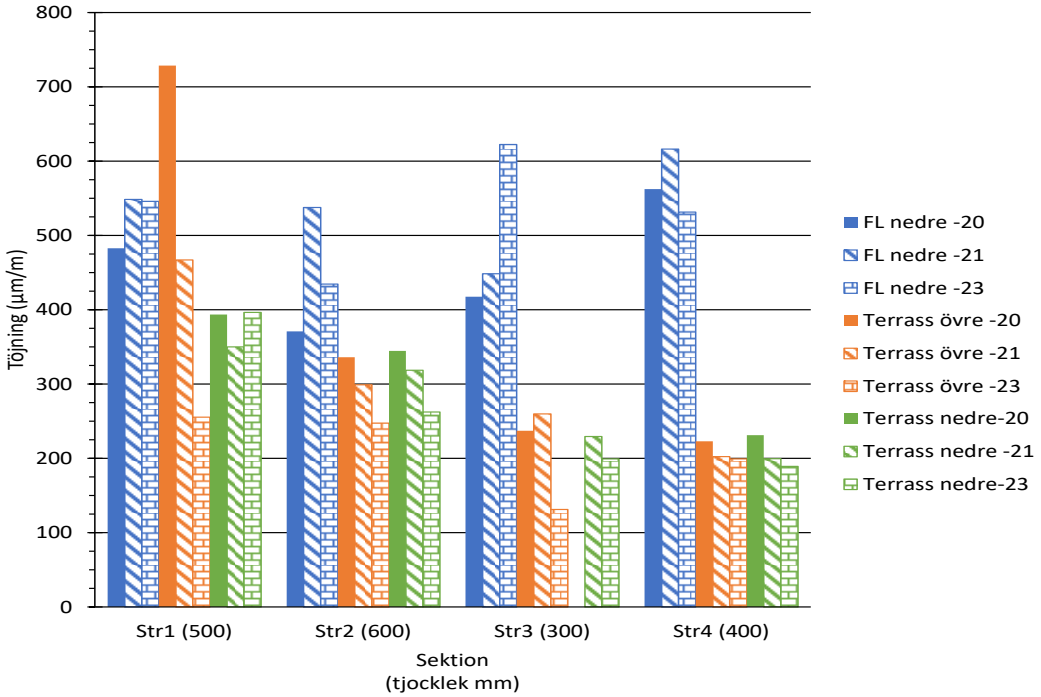


Figur 5.Uppmätta töjningar vid passage av Öresundståg december 2020, april 2021 och mars 2023.

Från resultaten av töjningsmätningarna går det inte att utläsa några tydliga skillnader eller tendenser mellan de olika sträckorna. För att underlätta jämförelsen mellan sträckorna beräknades utifrån värdena ovan även medeltöjning per stäcka på respektive nivå. De redovisas i figur 6 och 7.



*Figur 6. Uppmätta **medeltöjningar** vid passage av Pågatåg december 2020, april 2021 och mars 2023*

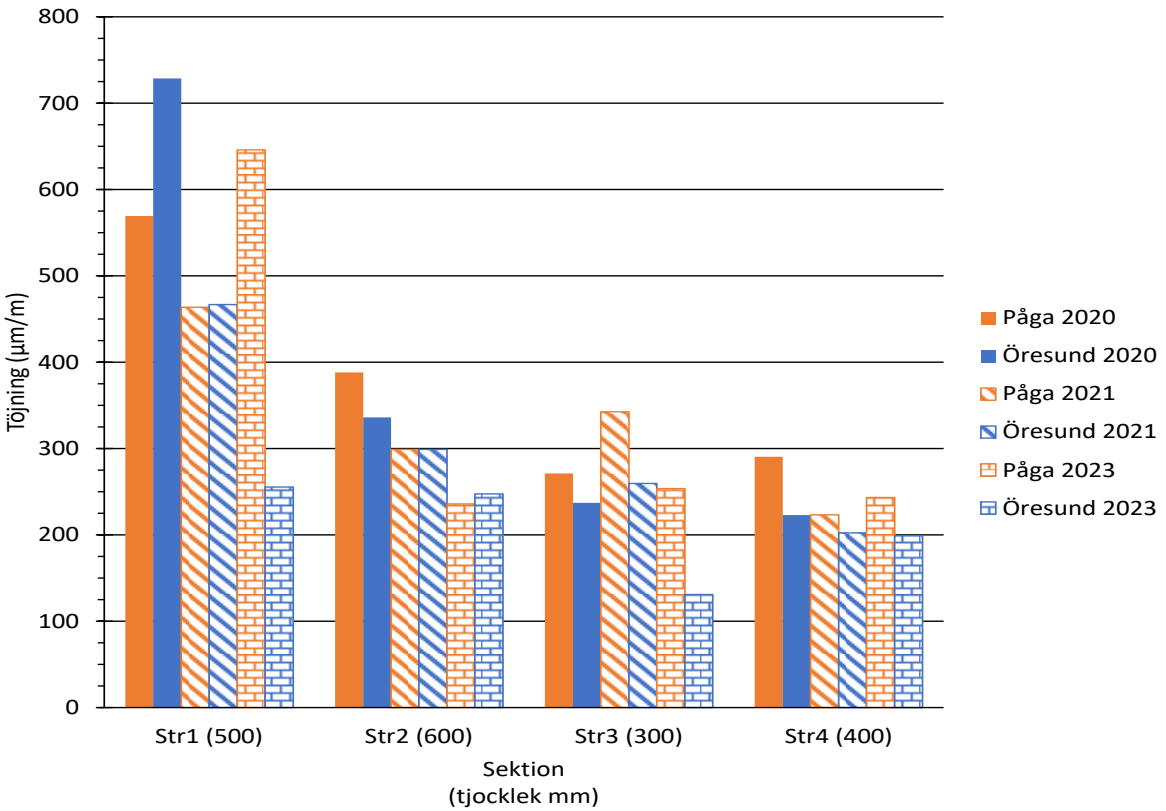


*Figur 7. Uppmätta **medeltöjningar** vid passage av Öresundståg december 2020, april 2021 och mars 2023.*

Även sett på medeltöjningarna går det inte att utläsa tydliga skillnader mellan sträckorna. Det är dock en tendens till något generellt större töjningar på sträcka 1 och 2 med de tjockare ballastlagren. Det är även något större töjningar i underkant av förstärkningslagret än i överkanten på terrassen på samtliga sträckor men främst framträdande på sträcka 3 (300) och på sträcka 4 (400). Det kan bero på att materialet inte är optimalt packat i underkant av lagret. Skillnaderna mellan sträckorna är dock små och kan sägas ligga inom variationen inom och mellan sträckorna. På flera givare är tendensen att töjningarna minskar med tiden. Möjligen skulle det kunna vara ett tecken på efterpackning men det är inget som tydligt framgår av de permanenta deformationerna.

Töjningarna från passager med Pågatåg ser ut att i genomsnitt ligga på en något högre nivå än passager med Öresundståg. I vissa fall så saknas det data p.g.a. att mätsignalen var väldigt brusig och inte med tillräcklig bra kvalité för att kunna analyseras rätt. Vid mätningen på sträcka 1 i augusti 2020 är det också ett enskilt värde som sticker ut som avvikande och får betraktas som osäkert.

I ett försök att jämföra sträckorna granskades endast påkänningen i överkant på terrassen. Det är den påkänning som kan förväntas ha störst påverkan av skillnaden i lagertjocklek från det överliggande underballast, vilket borde betyda att ju tunnare underballasten är desto större påkänning i övre delen av terrassen vi belastningen från tågpassagerna. I figur 8 presenteras töjningen i endast övre terras från samtliga tre mättillfällen vid passager med Pågatåg och Öresundståg.



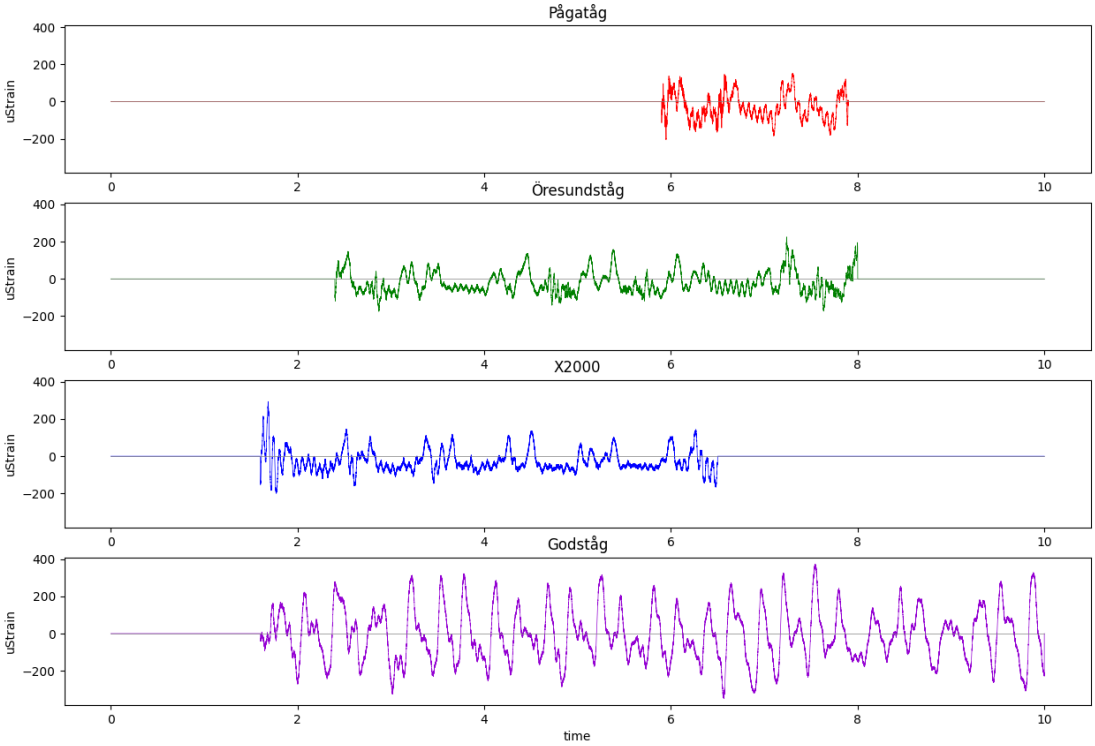
Figur 8. Uppmätta töjningar i övre terrass vid passage av Påg- och Öresundståg.

Som framgår vid granskningen av påkänningen i övre terrass som går det inte att utläsas den förväntade skillnaden mellan sträckorna där sträcka 3 och 4 med tunt lager ballast skulle ha en större

påkänning än sträcka 1 och 2 med tjockare ballast. Istället är de sträckorna med tunnare ballastlager som har lägst påkänningar. Vid något enstaka tillfälle har sträcka 2 med 600 mm ballast något lägre påkänningar än sträcka 3 och 4 med tunnare lager ballast.

Även om det är svårt att exakt värdera skillnaderna som framgår från mätningarna är troligen felmarginalen för mätmetoden en bidragande orsak. Speciellt i detta fall där mätförhållandena medför ett stort störande brus på mätsignalerna som ökar osäkerheten. Det finns dock inga tecken på att sträckorna med tunnare ballast skulle ha högre på känningar än sträcka 5 och 6 med tjockare lager vilket tyder på att det i detta fall är tillräckligt med 300-400 mm ballast för att fördela de laster som uppstår vid trafikering av tågen på det här banavsnittet.

Vid mättillfällena gjordes även ett fåtal insamlingar vid tågpassager med X2000 och godståg. För att visa på skillnader mellan tågtyperna visas i figur 9 ett exempel på insamlade mätsignaler från de fyra olika tågtyperna för en givare som ligger i övre terrass på sträcka 4.

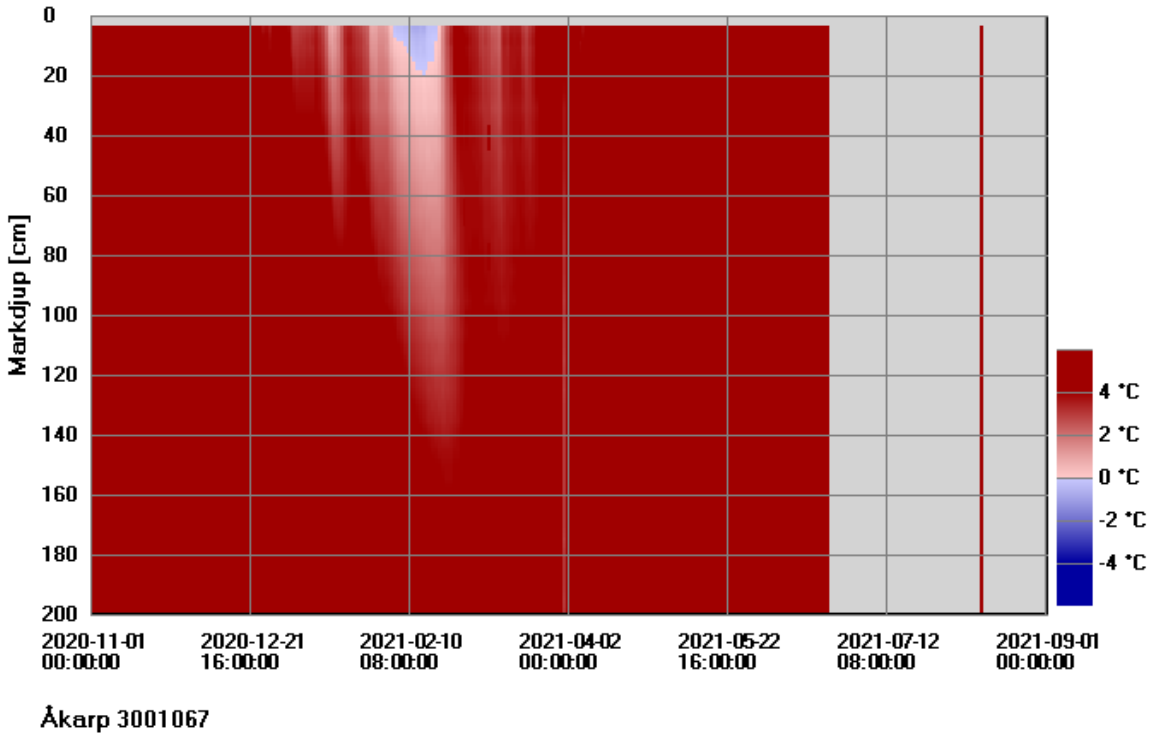


Figur 9. Insamlade mätsignaler från olika tygtyper mars 2023 med givare i övre terras på sträcka 4.

Töjningarna vid passage med X2000 ligger på ungefär samma nivå som Pågatågen och Öresundstågen. Vid några passager med godståg gjordes också datainsamling av töjningarna på vissa givare på sträcka 2, 3 och 4. Som väntat var töjningarna från passager med godstågen i flera fall större än från Pågatågen och Öresundstågen och att de varierade mer inom respektive set av godståg beroende på om och hur vagnarna var lastade. I vissa fall är påkänningen från godstågen i storleksordning som lokaltågen men de maximala uppmätta töjningarna för godstågen är upp till 200-300 µm/m större än för Pågatågen och Öresundstågen, beroende på olika godståg och olika axellaster.

Tjäle

De 3 tjäldjupsmätarna på sträcka 1, 2 och 3 har registrerat tjälförloppet med tjälnedträngning och tjällossning under vintrarna från 2020 till 2023. Nivå 0 cm motsvarar överytan på förstärkningslagret/underballast på respektive provsträcka. Ballasten (32-63) som ligger ovanför tjäldjupsmätarna är av väldigt öppen karaktär varför man kan förvänta sig att kölden/tjälen snabbt passerar den ballasten och ner till övre änden på tjäldjupsmätaren. Generellt har vintrarna varit milda och tillsammans med det geografiskt sydliga läget gör att tjälnedträngningen har varit väldigt liten under de aktuella vinterperioderna på alla tre sträckor. Under vintern 2020-2021 var tjälnedträngningen som mest endast ca 20 cm under en kortare period. Det betyder att även på sträcka 3 med endast 300 mm förstärkningslager så nådde ej tjälen ned till terrassytan. Med den ringa tjälen kommer också en nästan försumbar tjällossning och som följd en nästan obetydlig bärighetsnedsättning under tjällossningen. Under vintrarna 2021-22 och 2022-23 har det endast uppmätts väldigt lite tjälnedträngning, som är mindre än 20 cm under korta perioder. I figur 10 visas tjälförloppet 2020-21 på sträcka 3 med 300 mm förstärkningslager.

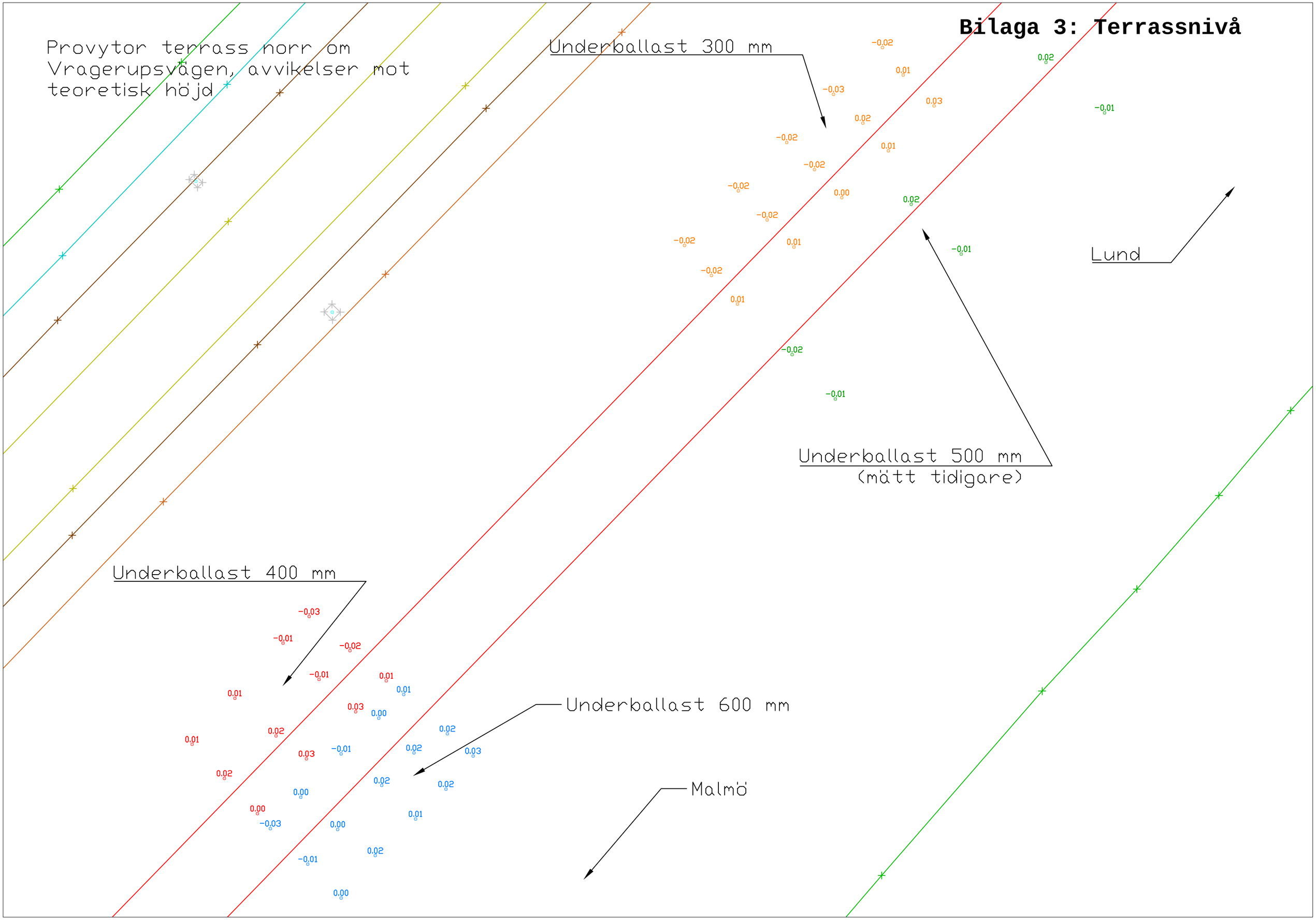


Figur 10.Uppmätt tjäldjup på sträcka 3 (300 mm) under vintern 2020-2021.

Slutsats

Resultaten från mätningarna under de här åren tyder inte på några framträdande skillnader mellan sträckorna med olika tjocklek på underballasten. Är det några tendenser så är det att större påkänningar uppmätts i sträckorna med tjockare ballastlager än i sträckor med tunnare ballastlager. Det bör dock påpekas att under den tiden sträckorna legat under trafik och mätningar har utförts har det inte varit några kalla vintrar som orsakat tjäle och tjällossning, men med hänsyn till den geografiska placeringen i södra Skåne får det anses vara normalt med milda vintrar. Det betyder att även sträcka 3 med endast 300 mm underballast så här långt fyller sin funktion, att skydda terrassen mot för stora på känningar, när det handlar om placering i den sydligaste delen av Sverige.

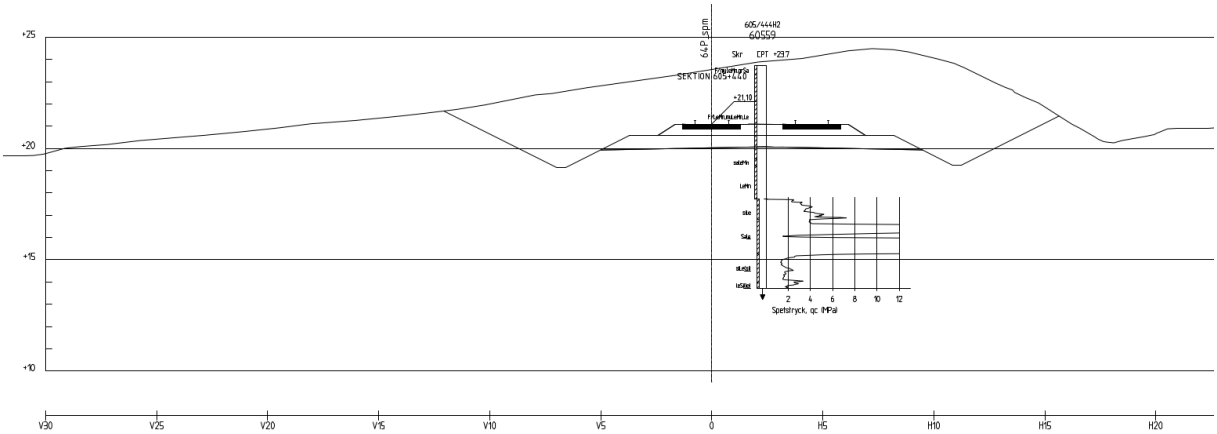
Bilaga 3: Terrassnivå



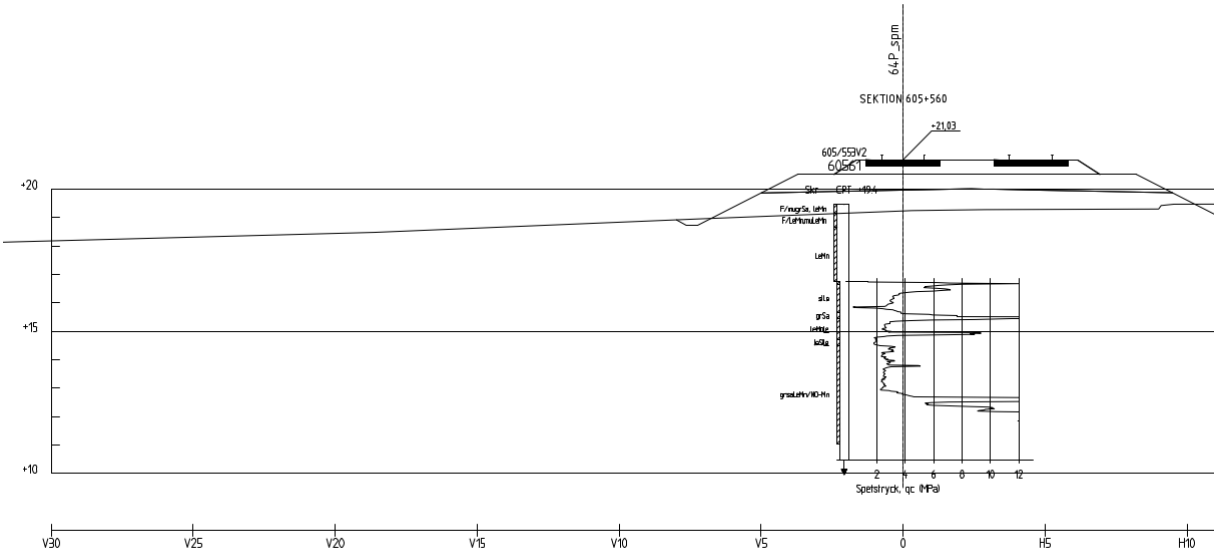
Bilaga 3 Geoteknisk undersökning

De geotekniska förutsättningarna för det provisoriska spåret är inte så detaljerat undersökt . Provområdet utfördes där stabila och jämna förhållanden kunde uppnås, befintlig mark och fyllnadsmaterial av lermorän.

Nedan sondering på vardera sida om provområdet.



TVÄRSEKTION 605/440



TVÄRSEKTION 605/560