

Tunnelmätning

- en metodstudie för upprättande av tunnelnät



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Teknik och samhälle / Geomatik**

Examensarbete:
Jens Holgård Cordua
Christian Alnerud

© Copyright Jens Holgård Cordua, Christian Alnerud

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2015

Sammanfattning

Detta examensarbete omfattar en studie av mätmetoder för etablerandet av geodetiska referensnät i tunnlar. Studien begränsas till endast mätningar i det horisontella planet. Verklig mätdata från projekt Hallandsås används, men även datorsimuleringar av stomnät utförs.

Tunnelbygget genom Hallandsås är en del i utbyggnaden av Västkustbanan mellan Göteborg och Malmö. Två parallella tunnlar, ca 9 km långa, byggs. Tunnelarna byggs med delvis konventionell tunneldrift (drill & blast) och med en tunnelbormaskin (TBM).

Eftersom det sätts höga krav på noggrannhet i de geodetiska referensnäten i tunnlar, är det viktigt att optimera mätförfarandet. Refraktion längs tunnelväggarna kan medföra stora problem i flygande polygontåg. I detta examensarbete kommer två olika metoder för mätning av byggnät att granskas och jämföras. En metod baseras på att mätning utförs från väggmonterade mätpunkter medan den andra baseras på mätning från fasta stålpelare, nära tunnelcentrum.

Resultaten från vår fältstudie i Hallandsåstunneln antyder att stomnätet närmast tunnelcentrum påverkas mindre av refraction. Datorsimuleringar av samma metoder förutspår det motsatta.

Det går dock inte att dra några definitiva slutsatser eftersom det kan finnas andra faktorer som påverkar resultatet. Rörelser i tunnelväggar, eller en liten vridning av anslutningsnätet kan misstolkas som en effekt av refraction.

Nyckelord: Tunnelmätning, stomnät, refraction

Abstract

This thesis studies different methods of surveying geodetic reference networks in tunnels. The study is limited to surveys in the horizontal plane. Real survey data from project Hallandsås is used, but computer-aided simulations are also done.

The tunnel through Hallandsås ridge is a part of the extension of Väst kustbanan, an important railway connection between Gothenburg and Malmö. Two parallel tunnels, about 9 km long, are being constructed. The tunnels are built with different methods, partly by drilling and blasting and with a tunnel-boring machine (TBM).

As there are high demands on accuracy in the geodetic reference networks in tunnels, it is important to optimize the methods for surveying. Refraction along the tunnel lining can cause trouble in open-ended traverses. In this thesis, two different methods for measuring the tunnel construction networks are reviewed and compared. One method is based on fixed wall points, while the other one is based on surveys made from stable steel pillars close to the tunnel center.

The result from our field study in the Hallandsås tunnel indicates that the reference network surveyed close to the tunnel center causes less refraction effects. Computer simulations of the same methods predict the opposite results.

We cannot however make certain conclusions; other factors may have influenced our results. Movements in the tunnel walls, or a small twist in the connection network may be misinterpreted as an effect of refraction.

Keywords: Tunnel surveying, geodetic reference networks, refraction

Förord

Detta examensarbete skrevs som en del av vår utbildning ”Geomatik” vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet motsvarar 22,5 högskolepoäng.

Vi vill tacka vår handledare Lars Ollvik, vår examinator Sven Agardh och Danny Applegate på Skanska för all hjälp och tips under arbetets gång.

Jens Holgård Cordua
Christian Alnerud
juni, 2015

Begreppsförklaring

Refraktion – Ett fenomen som sker då ljusstrålar bryts, då de färdas genom olika material. Brytningen sker vid övergången mellan material med olika brytningsindex. Då olika material ligger som vertikala skikt, kallas motsvarande fenomen med ljusbrytningen för ”lateral refraktion”.

Helmertransformationsmetoden – Den vanligaste transformationsmetoden. Finns både som en 7-parametersmetod för tredimensionella system (X, Y, Z) , samt en 4-parametersmetod för plana system (X, Y) . Består av förflyttning, vridning samt skalförändring.

Unitär transformation – Består av en förflyttning av origo samt en vridning. Ingen skalförändring sker.

Flygande nät – Ett stomnät som inte är fullständigt anslutet. Oftast bara anslutet i ena änden.

Helsats – En totalstation eller teodolit kan vridas till två olika cirkellägen. En helsats motsvarar ett medelvärde av två mätningar, en för varje cirkelläge.

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsning	2
1.4 Metod	2
2 Teori	3
2.1 Felklasser	3
2.1.1 Grova fel	3
2.1.2 Systematiska fel	3
2.1.3 Slumpmässiga fel	3
2.2 Refraktion	4
2.2.1 Refraktion i tunnlar	5
2.3 Stomnät	6
2.3.1 Planering och konfiguration	6
2.3.2 Beräkning av stomnät	6
2.3.3 Analys av stomnät	6
2.3.4 Simulering	7
2.4 Stompunktsmarkering	7
2.4.1 Polygonspade	7
2.4.2 Unikonsol	8
2.5 Totalstation	9
2.5.1 Vinkelmätning	9
2.5.2 Mätning i båda cirkellägena	10
2.5.3 Avståndsmätning	10
3 Fallstudier	12
3.1 Väla	12
3.1.1 Metod	12
3.1.2 Resultat	12
3.2 Projekt Hallandsås	14
3.2.1 Historik	14
3.2.2 Tunnelbormaskin	15
3.2.3 Bakgrund	15
3.2.4 Referenssystem	16
3.2.4.1 Parametrar	16
3.2.5 Instrument	17
3.2.6 Programvara	18
3.2.7 Stomnätskonfigurationer	18
3.2.7.1 Byggnät typ 1	19
3.2.7.2 Byggnät typ 2	20
3.2.8 Bearbetning av mätdata	21

3.2.9 Nätutjämnning - Beräkning av mätdata	21
3.2.10 Resultat	23
3.2.10.1 Byggnät typ 1	25
3.2.10.2 Byggnät typ 2	26
3.2.11 Utvärdering av resultat	28
3.2.11.1 Felfortplantning	28
3.2.11.2 Jämförelser av differenser - trendlinjer.....	28
3.2.11.3 Felellipser.....	29
3.3 Datorsimulering.....	30
3.3.1 Programvara.....	30
3.3.2 Parametrar.....	30
3.3.3 Resultat	30
3.3.3.1 Byggnät typ 1 – simulerad.....	31
3.3.3.2 Byggnät typ 2 – simulerad.....	32
3.3.3.3 Utvärdering av resultat.....	33
4 Slutsats.....	34
5 Referenser	35

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Innan ett tunnelbygge påbörjas, krävs det att ett överordnat geodetiskt stomnät etableras över tunnelområdet. Detta stomnät etableras med syfte att, under hela byggtiden, utgöra en stabil uppsättning av referenspunkter för alla underordnade stomnät i projektet.

Anslutningsnätet är nästa steg i nathierarkin, där det överordnade stomnätet förtätas vid tunnelmynningarna. Dessa anslutningspunkter utgör sedan utgångspunkter för byggnätet inne i tunnlarna.

Byggnätet är det stomnät som används för styrning av tunneldriften.

Efter att en tunnel är färdigställd kommer ett så kallat bruksnät upprättas. Bruksnät i tunnel används för lägeskontroll av tunnel samt upprättande av underlag för relationshandling.

Byggtoleranser för tunnlar, i synnerhet järnvägstunnlar, är stränga. Sällan inte mer än ± 50 mm relativt referenslinjen för tunneln. Därför är det viktigt att upprättandet och inmätningen av ett stomnät, görs på ett sådant sätt att effekten av sidorefraktion minimeras.

Refraktion är, i tunnlar, en av de större källorna till systematiska fel i bestämningen av precisa avstånd och riktningar. Effekten av lateral refraktion har varit känt länge, men är fortfarande ett problem i tunnelmiljöer. Som Chraznowski (1981) påpekade, så kan även små laterala temperaturskillnader införa stora fel i ett stomnät, om det mäts på ett olämpligt sätt. Exempelvis om mätningar görs längs med tunnelväggarna, eller mäts med ett instrument med för låg noggrannhetsgrad.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är undersöka två olika mätkonfigurationer vid upprättande av ett stomnät i en tunnel, och jämföra vilken som påverkas minst av sidorefraktion.

Den ena mätmetoden baserar sig på mätningar, som görs från fasta väggkonsoler på tunnelväggen, medan den andra mäts från fasta stålpelare närmare tunnelcentrum.

1.3 Avgränsning

Studien begränsas till att endast omfatta mätningar i horisontalplanet.

1.4 Metod

För att kunna göra en jämförelse mellan två geodetiska tunnelstomnät är det självklart bäst att kunna göra en fältstudie i en verklig tunnel. I utgångsläget, våren 2005, så hade vi ingen tillgång till en tunnel.

Vi bestämde oss då för att konstruera ett stomnät i en fiktiv tunnel, ovan mark, på en rak vägsträcka vid ett industriområde i Helsingborg.

Denna studie gav oss en möjlighet att praktiskt öva på de olika moment, som krävs vid etablering av ett stomnät.

På grund av olika brister i vårt tillvägagångssätt, fick vi ej tillförlitliga resultat i denna första fältstudie.

Mätdata för vår andra fältstudie, insamlades under åren 2006 till 2008, då en av oss anställdes vid tunnelprojektet genom Hallandsås. Ett stort antal observationer utgör två stycken oberoende stomnät med olika mätkonfigurationer. Dessa nät mättes på samma sträcka, ca 2500 meter, i södra delen av östra tunneln genom Hallandsås.

De två stomnäten mättes vid samma tillfällen och separerades därefter ut i två skilda stomnät. På så sätt är de två näten alltid mätta under samma atmosfäriska förhållande. Detta är en viktig aspekt, då förhållanden i tunneln kunde variera kraftigt. Vid produktion ökade in- och utflödet av kylvatten, och temperaturen längs tunnelväggarna varierade kraftigt. Under produktionsuppehåll minskade detta flöde och gav mindre temperaturvariationer.

De två mätta stomnätens respektive slutningsfel kunde verifieras med hjälp av att använda oss av ett stomnät som är anslutet i båda ändar. I södra änden av Hallandsåsen, samt vid mellanpåslaget upp genom en ca 800 meter lång arbetstunnel, till fasta punkter ovan mark, ungefär mitt mellan Hallandsåstunnelns två påslag.

Innan all verklig mätdata beräknades gjordes en nätanalys där man kan simulera stomnät för att optimera dess konfiguration. Två simulerade nätverk upprättades enligt de två konfigurationer som skulle jämföras.

Båda stomnäten, verkliga samt simulerade, är beräknade i SBG Geo:s nätutjämningsmodul och har utgångspunkter med identiska koordinater. För upprättande av stomnät har vi använt oss av totalstation, Leica TCA2003.

2 Teori

2.1 Felklasser

Alla mätningar innehåller någon form av fel, härstammande från små fel i instrument, mänskliga misstag eller från miljön mätningen utförs i. Det är viktigt att vid mätning eliminera alla grova fel, samt att identifiera och anpassa mätningen för de systematiska och slumpmässiga fel, som uppstår vid mättillfället.

De olika feltyper som uppstår vid en mätning brukar vanligtvis delas upp i följande klasser:

- Grova fel
- Systematiska fel
- Slumpmässiga fel

(Lilje, 2004)

2.1.1 Grova fel

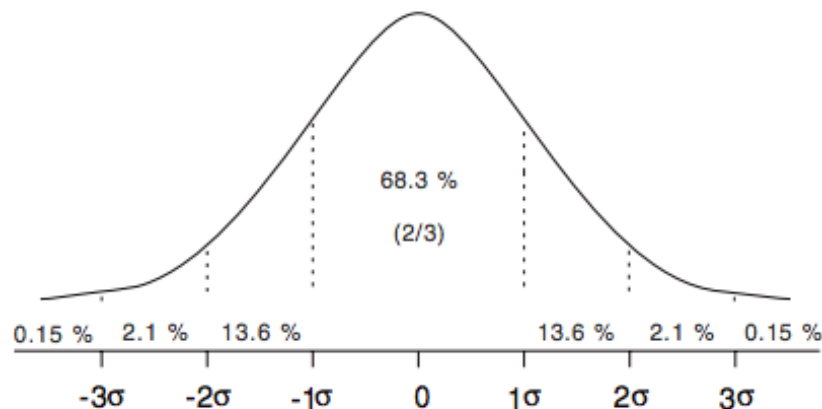
Grova fel är till exempel fel avläsning av instrument, eller dåligt nivellerad trefot. Dessa fel går till stor del att undvika genom noggrannhet. (Lilje, 2004)

2.1.2 Systematiska fel

Systematiska fel är de fel som orsakas av instrument, operatör eller yttre faktorer. De följer någon fysisk lag och kan i vissa fall korrigeras för i databehandlingen. (Lilje, 2004)

2.1.3 Slumpmässiga fel

En mätning kommer alltid att innehålla en del slumpmässiga fel. Dessa fel förutsätts vara normalfördelade. Med denna vetenskap kan man i vidare analys av mätvärden avgöra i vilken risknivå dessa fel befinner sig i. Desto lägre risknivå, ju större chans är att det rör sig om naturlig variation inom normalfördelningen. (Lilje, 2004)



Figur 1 - Normalfördelningens frekvenskurva (HMK Stomnät)

2.2 Refraktion

Mätning påverkas av temperaturgradienter och i fallet med tunnlar är det framförallt den laterala refractionen som är den stora felkällan. Dessa fel är svåra att korrigera för i databehandlingen.

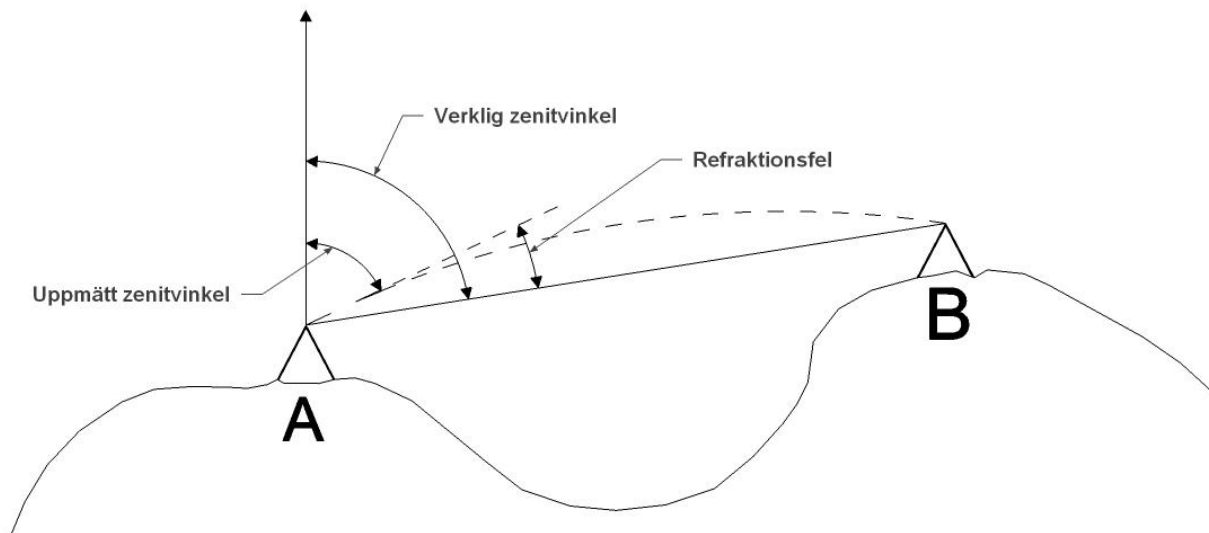
Ljus färdas genom vakuum i en hastighet av cirka $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. Ljus kan också färdas genom många olika material, såsom luft, vatten och glas.

Atomerna i de olika materialen absorberar, återstrålar och sprider ljuset och minskar på så sätt hastigheten av ljuset. (Hewitt, 2002)

Därför färdas ljuset i olika hastigheter genom olika material.

Refraktionseffekter orsakas generellt av ett inhomogent fortplantningsmedium för den optiska mätstrålen.

Antag en mätning mellan två punkter A och B:



Figur 2 – Refraktion

Atmosfäriska förhållanden leder till att temperaturen sjunker i takt med att höjden ökar. Detta är en så kallad vertikal temperaturgradient. (DT/DH). Även trycket minskar när höjden ökar. Således är luftens densitet relaterat till temperatur och tryck. Densiteten ρ :

$$\rho = \frac{P}{T \cdot R}$$

(P = Tryck, T = temp, R = gas (luft)) (Shelquist, 2015)

Med tanke på att R i vårt fall är konstant, kommer luftens densitet minska när höjden ökar. Alltså ju närmare jordens yta man är, desto tätare är luften.

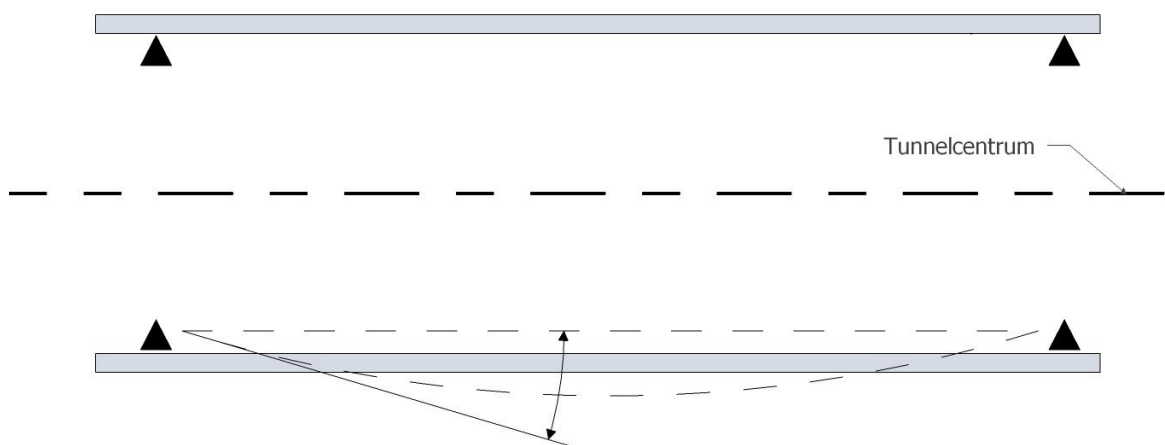
En stråle av ljus, kommer att ta den snabbaste vägen till det observerade objektet, och därför i det luftlager där densiteten är som lägst. Därmed kommer den observerade ljusstrålen vara krökt och ej gå som en rät linje. Vi kommer därför få en uppmätt zenitvinkel som är mindre än den verkliga zenitvinkeln, mellan punkterna A och B.

I en tunnel gäller samma princip för sidorefraktion. I en underjordisk miljö kan det finnas en stor temperaturskillnad mellan väggarna i tunneln (i kontakt med berg eller betong) och den omgivande luften.

I allmänhet är trycket konstant i tunneln för en viss höjd. I vårt fall bör luften närmast tunnelväggen vara varmare än den kalla betongliningen. Således är luften tätare nära tunnelcentrum, och mätningarna tenderar att gå ut från tunnelcentrum.

2.2.1 Refraktion i tunnlar

Refraktion är, i tunnlar, en av de större källorna till systematiska fel. I tunnlar kan refraktion uppstå på grund av t.ex. temperaturskillnader. Exempelvis när uppvärmd luft stiger från kylvattenrör som möter kall luft från tunnelväggarna. Eller när, beroende på årstid, kall eller varm ventilationsluft blåses in i tunnelrören.



Figur 3 – Lateral refraktion i tunnlar

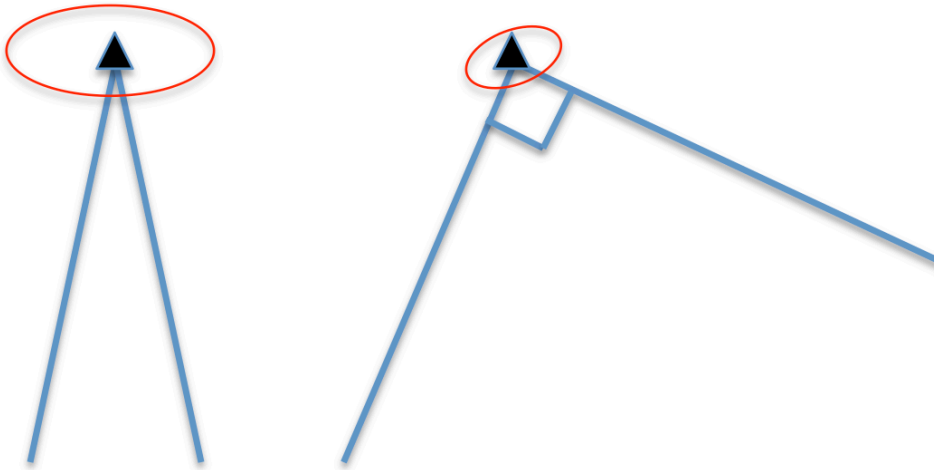
Refraktion i tunnlar kan generellt antas vara som störst längs med tunnelväggarna. Vilket åskådliggörs i figur 3 ovan, är det viktigt att inte använda dessa mätningar i närheten av väggarna, eftersom de skulle kunna införa stora fel i tunnelnätverken.

2.3 Stomnät

Ett geodetiskt stomnät är en samling punkter, som är bestämda genom någon form av beräkning på mätningar av vinklar, höjdskillnader och numera även avstånd, mellan punkterna. Dessa punkter används som utgångspunkter vid mätning och utsättning av till exempel vägar, järnvägar eller fastigheter.

2.3.1 Planering och konfiguration

En av de viktigaste delarna i alla stomnät, och speciellt i tunnlar, är att planera för ett stomnät med optimal geometri. Det är viktigt att sträva efter att få ett stomnät uppbyggt av trianglar som innehåller få ”spetsiga” vinklar. Punkter inmätta med en liten vinkel har en högre osäkerhet än punkter inmätta med vinklar närmare 100 gon.



Figur 4 – Punkter mätta med snäv vinkel har högre osäkerhet

I en tunnel är det svårt att undvika dessa, och konfigurationen av stomnätet är således mycket viktig.

2.3.2 Beräkning av stomnät

Vid beräkning av stomnät används i regel olinjära minsta kvadratmetoden. Genom att nyttja denna metod utjämnas förbättringar på enskilda observationer. Innan beräkning krävs det god kännedom om mätningarnas a priorifel (den förväntade osäkerheten). Detta underlättar felsökningen i nätutjämnningen.

2.3.3 Analys av stomnät

Medans själva observationerna gjorda i en mätning är viktiga, så är det än viktigare att analysera resultaten från mätningen. Möjligheten finns att analysera de statistiska värdena, som gäller för en minsta kvadratutjämnning. Den största fördelen med minsta kvadratmetoden är att man har en möjlighet att ur resultatet studera förbättringarna till mätningarna och deras fördelning. Då kan

man nämligen dra en slutsats av kvalitén för enskilda observationer, och se om de uppfyller de standardiserade krav som finns.

2.3.4 Simulering

Att simulera ett stornät i en dator, innan mätning, ger många fördelar. Det ger en möjlighet att specificera vilka instrument- och geometrikrav som ställs, för att få ett stornät som uppfyller satta krav. Med en noggrann simulering kan man bestämma a priorifel, samt hur felfortplantningen kommer att påverka slutresultatet.

I SBG Geo finns en funktion för att göra en simulering av stornät. Denna kan innehålla både simulerade mätningar och verklig data. Mätningarna behöver inte ha mätvärden, men det måste finnas a prioristandardavvikelse för samtliga mätningar samt approximativa koordinater för nypunkter.

Resultatet ger en analys av nätets geometriska kvalitet, nypunkter och förbättringar beräknas. Beräknade medelfel och ellipser baseras på att ett grundmedelfel på 1 kommer att uppnås. Grundmedelfel är det beräknade medelfelet för en mätning med vikten ett (1), och ger en allmän uppfattning om den faktiska mätnoggrannheten. Om vikten har beräknats som det inverterade värdet av variansen ($1/\sigma^2$) skall grundmedelfelet bli lika med ett. Avvikelse, uppåt eller nedåt, indikerar att mätnoggrannheten är lägre respektive högre än vad som antagits.

Man kan studera observationernas kontrollerbarhet, och felellipsernas form, för att avgöra vilken mätkonfiguration som är mest gynnsam.

Nackdelen med simuleringen är att det inte går att simulera refraktion.

2.4 Stompunktsmarkering

En viktig del i upprättande av stornät är val av stompunktsmarkering.

Stompunktsmarkering: Markering som visar en stompunkts läge. Speciellt för dessa är att de har ett högt tekniskt värde – i vissa situationer, t.ex. när gränser inte markerats men utstakats med utgångspunkt från mätdata från stornät. Det skall därför fästas stor vikt vid att markeringen görs lika stabil som dess mätvärdighet. Den bör vara lätt att känna igen och att hitta, och ha en varaktighet motsvarande dess tänkta livslängd (HMK-Geodesi-Markering 1996)

2.4.1 Polygonspade

Traditionellt sätt i Sverige har så kallade polygonspadar använts för gruv- och tunnelmätningar, men de har även använts vid trånga passager i samband med väg- och järnvägsarbeten, exempelvis för broar, bergsskärningar.



Figur 5 – Polygonspade (Geoiden AB, 2015)

Markeringen består av en kraftig gänghylsa som borrar in och fästs i väggen. I hylsan skruvas sedan en arm in, som bär en instrumentplatta med en 5/8 gängad skruv. Detta förfarande medför att samma läge för instrumentet erhålls vid varje mättillfälle.

2.4.2 Unikonsol

Unikonsolsystemet är framtaget för att monteras på vertikala ytor och lämpar sig väl för en tunnelvägg. Systemet är tvådelat och består av en platta som fästs i tunnelväggen, samt av en avtagbar konsol.



Figur 6 – Platta samt Unikonsol (Geoiden AB, 2015)

Den möjliggör snabb stationsetablering då det också går att gänga fast en mätarm på konsolen. Prismat hamnar då på samma koordinater som unikonsolen (med signalhöjd = 0 på unikonsolen).

Det går även att gänga in en unifix, ett tillbehör för att förenkla avvägning av unikonsol.

2.5 Totalstation

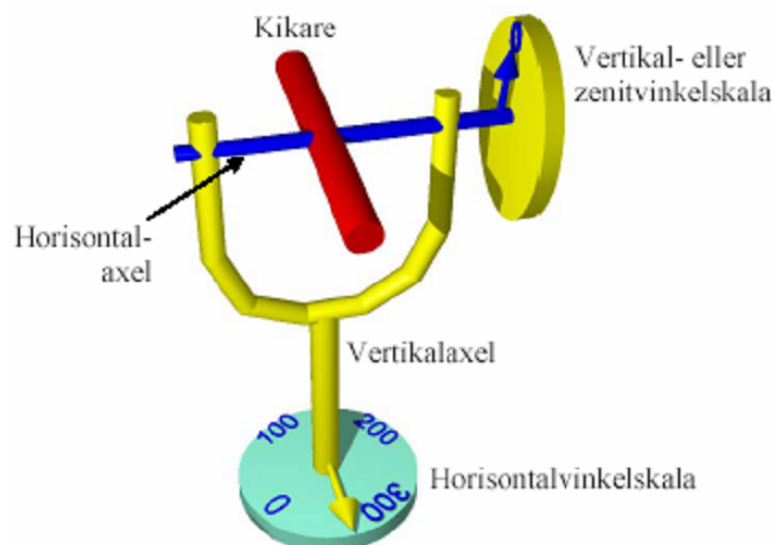
En totalstation består av en teodolit med en inbyggd distansmätare och den kan kontinuerligt mäta och lagra både vinklar och längder. Den används i många situationer där position och höjd behöver åstadkommas. Dagens instrument använder sig av en opto-elektronisk distansmätare (EDM) och en vinkelavläsare.

Vinkelavläsningen sker på en glasskiva med en kodad skala, vilken avläses elektroniskt av en CCD-array. Alla värden kan digitalt redovisas och lagras, såsom horisontell längd, höjddifferens och koordinater. Även tilläggsinformation och rådatavärden lagras oftast automatiskt i instrumentet. Numera har totalstationer nästan alltid inbyggda applikationer för vanliga geodetiska ändamål, såsom t.ex. inmätning, utsättning och stomnätmätning.

Instrumentet fästs på ett stativ eller på annan stabil plattform, som till exempel en pelare, med hjälp av en trefot. Trefoten går att vid behov centrera över en känd punkt, med hjälp av ett optiskt lod eller ett laserlod. Trefoten och totalstationen är båda utrustade med libeller för att kunna nivelleras. För att noggrant nivellera instrumentet är dagens totalstationer ofta utrustade med en elektronisk libell. I många fall finns även en elektronisk kompensator, som känner av och kompenserar eventuella lutningar som kan uppstå under en mätsession.

2.5.1 Vinkelmätning

Den del av totalstationen som står för mätning av vinklar kallas traditionellt för teodolit. Principen för teodolitens uppbyggnad framgår av figuren.



Figur 7 - Principskiss på teodolit

I nedre delen av instrumentet finns det en vinkelskala graderad i gon. När instrumentet vrids runt sin vertikala axel, flyttas ett avläsningsindex runt denna skala.

För att avläsa vertikala vinklar används ytterligare en vinkelskala, placerad på ena sidan av instrumentet.

För att mäta vinklarna riktas kikaren mot ett objekt. Vertikal- samt horisontalvinklarna läses sedan av. I dagens instrument sker avläsningen digitalt på en kodad glasskiva. Värdena sparas på instrumentets internminne eller i en separat fältdator.

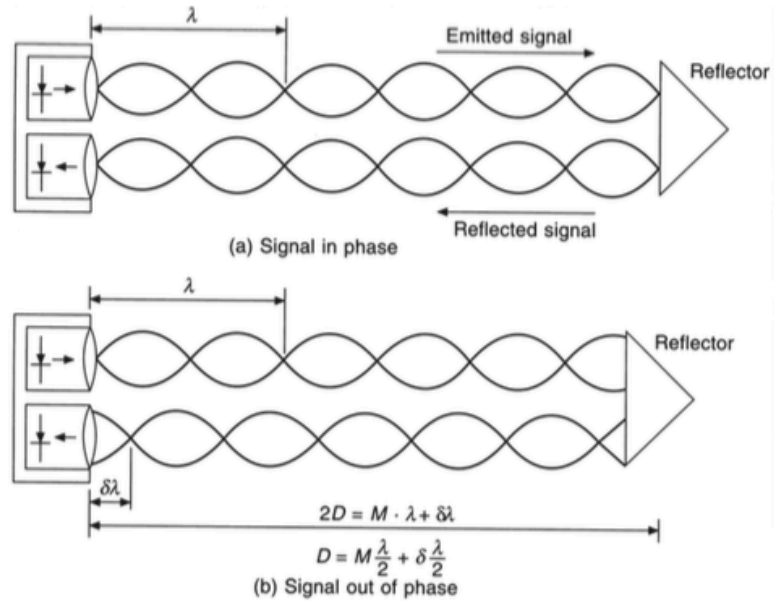
Teodoliten/totalstationen måste uppfylla en del mekaniska krav för att kunna utföra en noggrann mätning. Till exempel så behöver horisontalaxeln och vertikalaxeln i instrumentet vara ortogonala. Om så inte är fallet talar man om en kikäxelavvikelse. Den optiska siktlinjen behöver också vara ortogonal mot horisontalaxeln (kikäxel). Därefter måste den avlästa 0-gonvinkeln för vertikalcirkeln sammanfalla med den mekaniska vertikalaxeln. Annars finns en så kallad vertikalindexavvikelse. Alla dessa förutsättningar går inte fullt ut att lösa vid tillverkning av en totalstation. Detta beror på att de olika materialen i instrumentet kommer att utvidgas med olika koefficienter vid temperaturförändringar. Dock kan en modern totalstation kompensera för dessa fel via en elektronisk justering, efter att användaren utfört en fältkalibrering.

2.5.2 Mätning i båda cirkellägena

Ett annat sätt att kompensera för små mekaniska fel i instrumentet är att mäta i teodolitens/totalstationens båda cirkellägen. Efter första avläsningen vrids instrumentet 200 gon, i horisontal- och vertikalled. Efter att mätning i dessa två cirkellägen har gjorts, har man mätt en helsats. Vid noggranna inmätningar som t.ex. stomnätsmätning mäter man ofta i 3 eller fler helsatser, för att uppnå högsta möjliga noggrannhet.

2.5.3 Avståndsmätning

Avståndsmätningen i en totalstation sker vanligen elektroniskt, med en teknik kallad EDM. Majoriteten av dagens instrument använder sig av så kallad fasskillnadsmätning. En lysdiod i instrumentet sänder ut ljus i en viss frekvens, som reflekteras i en reflektor. När ljuset återvänder till instrumentet registreras ljussignalen i en fotocell. Det kommer nu finnas en skillnad i fas mellan utsänd signal och mottagen signal, en så kallad fasskillnad. För att kunna bestämma antalet hela våglängder skickar instrumentet ut signaler med olika frekvenser.



Figur 8 – Princip för fasskillnadsmätning (Schofield, Breach, 2007)

3 Fallstudier

3.1 Väla

Eftersom det var svårt för oss att få tillgång till en verklig tunnel att utföra vår fältstudie i, beslutade vi oss för att först göra en simulering av ett tunnelstomnät med ett fiktivt anslutningsnät.

3.1.1 Metod

Lämplig plats för att utföra denna studie, var en rak ofrafikerad väg minst 500 meter lång. På Andesitgatan i Helsingborg upprättade vi ett anslutningsnät i båda ändarna av den 500 meter långa vägen, samt ”tunnelpunkter” var 150 meter.

Både anslutningsnätet och ”tunnelpunkterna” markerades med hjälp av spik som vi slog ner i asfalten. Stativ med tvångscentreringar ställdes upp över samtliga punkter.

Instrumentet som användes vid denna studie var en Leica TCA1800.



Figur 9 – Flygfoto över mätområde i Väla. (Google Earth, 2010)

3.1.2 Resultat

Ur denna fallstudie fick vi framförallt med oss en djupare insikt om hur pass mycket kunskap och praktisk erfarenhet det krävs för att kunna etablera ett stomnät med hög noggrannhet.

Vi ser denna fallstudie mer som en praktisk övning och förberedelse inför en mer realistisk fallstudie i en verklig tunnel.

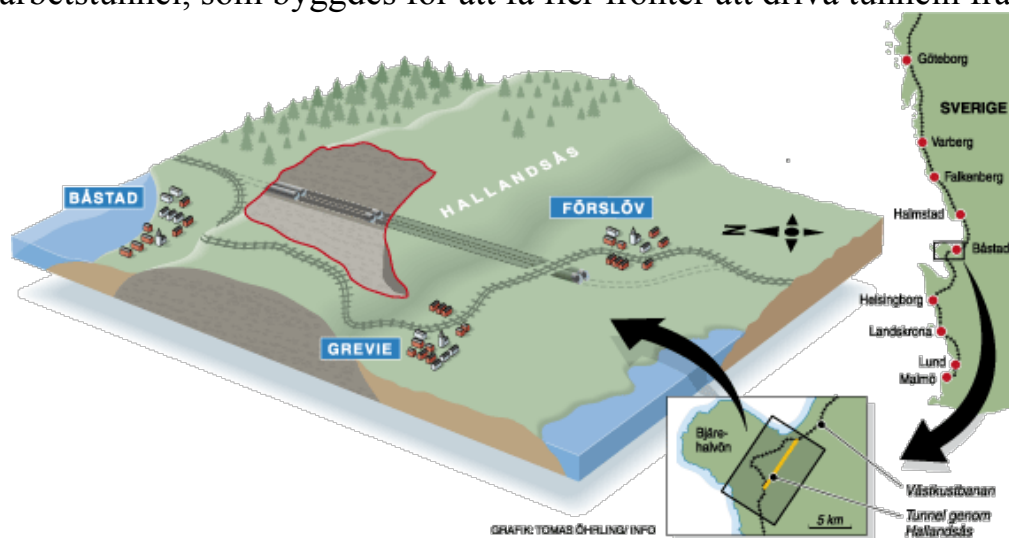
Vi har valt att inte redovisa några mätresultat från denna fallstudie, då de inte uppnådde vår önskade kvalité.

3.2 Projekt Hallandsås

3.2.1 Historik

1992 påbörjades tunnelbygget genom Hallandsås. Kraftbyggarna inledde tunnelprojektet med att använda sig utav en öppen tunnelbormaskin. Denna maskin var byggd för användning i hårt berg. Eftersom berget i Hallandsås är uppsprucket och vittrat och med stor mängd grundvatten, misslyckades denna teknik. 1993 övergick man till att borra och spränga berget.

Sammanlagt byggdes det ca 3 km tunnel, innan bygget stoppades 1995 på grund av ekonomisk tvist med Banverket. 1996 tog Skanska över bygget och fortsatte att borra och spränga sig framåt. Vid denna tid påbörjades även bygget av ett mellanpåslag mitt på åsen. Mellanpåslaget består av en ca 1 km lång arbetstunnel, som byggdes för att få fler fronter att driva tunneln från.



Figur 10 – Bild över Projekt Hallandsås (Öhrling, 2012).

Eftersom man hade stort vattenläckage in i tunnarna provade man en mängd tätningsprodukter för att injektera i berget. Det beslutades att använda ett kemiskt tätningsmedel, Rhoca Gil. En av komponenterna i detta medel är akrylamid som är giftigt innan det reagerar med vatten, polymeriserar. På grund av det mycket höga vatteninflödet och vattentrycket polymeriserades inte all akrylamid. Detta ledde till en förorening av vattnet i bäckar på hallandsåsen. Djur blev på så sätt förgiftade och detta ledde slutligen till att tunnelbygget avbröts igen. Mellan åren 1998 – 2003 stod bygget stilla till följd av sanering och utredning av regeringen. 2003 återupptogs byggandet återigen av Skanska, men nu i samarbete med det franska byggföretaget Vinci.

3.2.2 Tunnelborrmaskin

Skanska-Vinci använde sig av en tunnelborrmaskin, TBM, för att färdigställa de två tunnarna. Denna maskin hade ett borrhuvud med en diameter på 10,6 meter. När denna maskin borrade, lämnade den efter sig ett vattentätt betongrör, en så kallad lining. Liningen är uppdelad i ringar som är 2,2 meter långa. Varje ring är uppdelad i 8 segment.

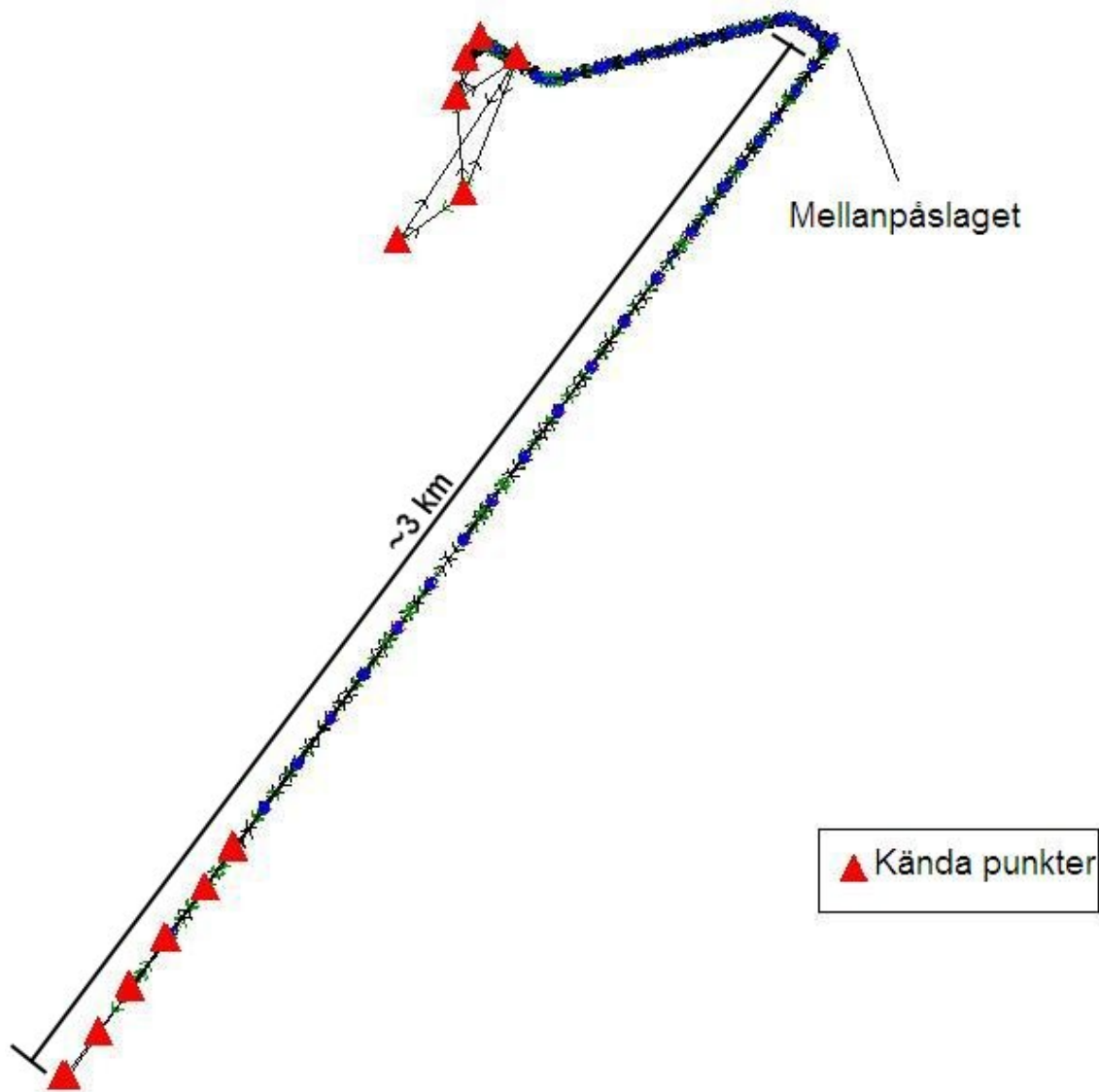


Figur 11 – Tunnelring med 8 segment

3.2.3 Bakgrund

I denna studie har två helt skilda nät upprättats i tunneln. Mätningarna har utförts under åren 2006 - 2008. Samma 10 fasta utgångspunkter används i de två stomnäten. Dessa är placerade cirka 2 km in i den västra bergtunneln söderifrån sett. De två näten sträcker sig ca 3 km in i den betonginklädda delen av tunneln, fram till det så kallade mellanpåslaget.

Näten beräknas separat och som flygande nät. Som kontroll av de två nätverken har ett stomnät, som är fast anslutet i båda ändar, upprättats. Detta stomnät är en kombination av ”byggnät typ 1” samt ”byggnät typ 2” och är således ett bra ”facit”. Beräkningarna resulterar i 16 stycken jämförbara nypunkter.



Figur 12 – Skiss på stornätens utbredning

3.2.4 Referenssystem

För att erhålla ett så spänningsfritt nät som möjligt har tunneldrivningen utförts i systemet RT 90 SHP 5 gon V 62:-1, där anslutningspunkterna är unitärt inpassade på riksnätspunkter i plan.

3.2.4.1 Parametrar

För att korrigeringar av mätdata ska bli korrekta har följande parametrar för Referenssystemet RT 90 SHP 5 gon V 62:-1 använts:

Jordradie: 6 389 000

Refraktionskonstant: 0.14

Koordinatsystem: RT90 5 gon V 62:-1

Projektionsmetod: Gauss Krüger

Projektionsskala: 1,00000000

Referensellipsoid: Bessel 1841
X tillägg: 6 200 000,000
Y tillägg: -100 000,000
Medelmeridian: 13°33'29,799999''

Alla stationer har mätts i 4 helsatser. Temperatur och lufttryck har registrerats vid varje stationsetablering.

Följande a priorifel har använts i beräkningen i stomnäten.

- Längder: 1 mm + 1 ppm (värdet från Leica TCA2003)
- Riktningar: 0,0003 gon (dubbla värdet från Leica TCA2003)
- Centrerings 0,5 mm

Det låga värdet på centrerings motiveras av stabila markeringar.

3.2.5 Instrument

I denna fältstudie har vi använt oss av en Leica TCA2003. En av de, vid tidpunkten för våra mätningar, bästa totalstationerna tillgänglig på marknaden. Detta instrument har följande specifikationer vad gällande noggrannhet.

- Medelfel i riktning (en helsats): 0,15 mgon (0,5'')
- Medelfel i längd: 1 mm + 1 ppm



Figur 13 – Leica TCA2003 (Leica Geosystems, 2015)

För att vara mer realistiska i våra beräkningar har vi valt att sätta en något sämre vinkelnoggranhet, 0,3 mgon, i inställningarna för a priorimedelfelen. Detta på grund av att den försämrade effekten av refraktion inte går att lägga in som en parameter i en nätutjämnning.

3.2.6 Programvara

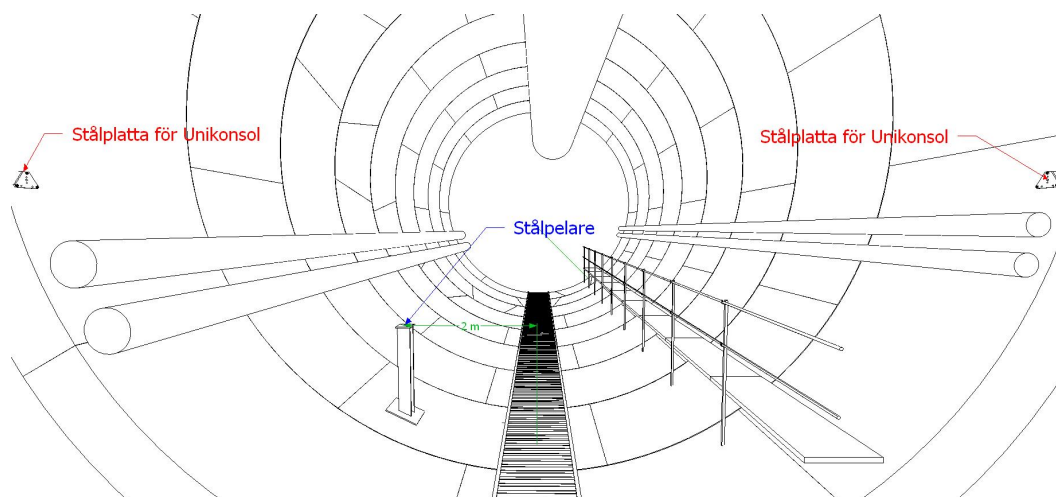
Programvaran som har använts är SBG Geo Professional. Både för nätutjämnning och koordinatjämförelser.

För att underlätta själva mätproceduren använde vi oss av SATSA, en programvara i totalstationen som automatiserar satsmätning.

Med SATSA mäter man in alla bakåtoobjekt en gång i samma cirkelläge. Därefter sker resten av mätningen helt automatiskt. Detta minskar tidsåtgången och ger ett mer noggrant resultat då man vidrör, och eventuellt rubbar instrumentet, betydligt färre gånger.

3.2.7 Stomnätskonfigurationer

För att undersöka hur man minskar refraktionens påverkan i ett stomnät, undersökte vi två olika metoder. Den ena metoden som vi kallar ”byggnät typ 1” består av enbart fasta väggkonsoler och dessa används som stationsuppställningar samt bakrikter.



Figur 14 - Typsektion i Hallandåstunneln

Den andra metoden, som vi kallar ”byggnät typ 2”, baseras på stälpelare som stationsuppställning, där samma fasta väggpunkter som används i ”byggnät typ 1”, används som bakrikter.

På detta sätt får vi två stomnät med gemensamma punkter, vars koordinater vi kan jämföra.

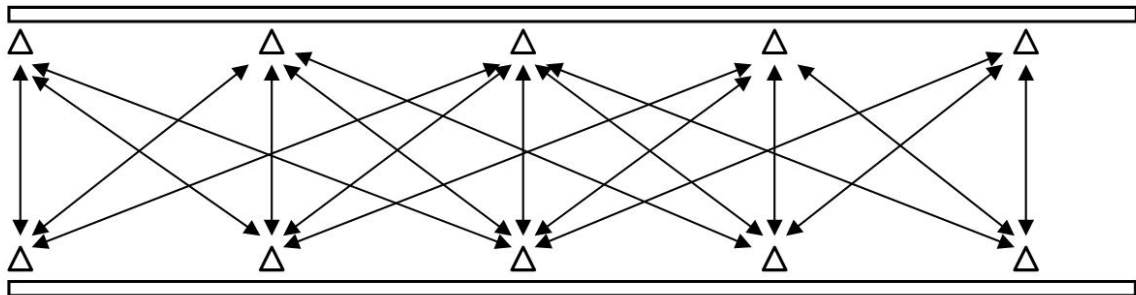
3.2.7.1 Byggnät typ 1

Denna mätmetod baseras på plattor med tillhörande ”unikonsol”. Plattorna är i rostfritt stål, med skydd, där mätarm eller ”unikonsol” monteras. Plattorna sitter fastbultade parvis på betongsegmenten i TBM-tunneln med ett avstånd på ca 150 meter mellan punktparen. På plattan kan en konsol med plats för instrument eller en Leica mätarm med prismahållare Leica GPH1 fästas.



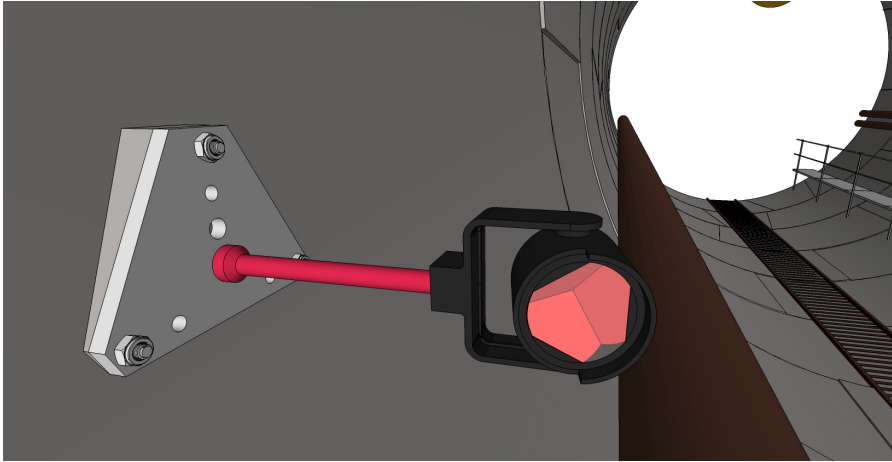
Figur 15 – Platta med Unikonsol och totalstation

Plattan och konsolen är konstruerad så att instrumentets lodaxel samt konsolens höjd sammanfaller med prismacentrum för Leica GPH1 (med prisma av typen GPR1). Plattan monteras ungefär 0.8 m under borrhcenter. Se figur



Figur 17 – Principskiss för mätmetod “byggnät typ 1”

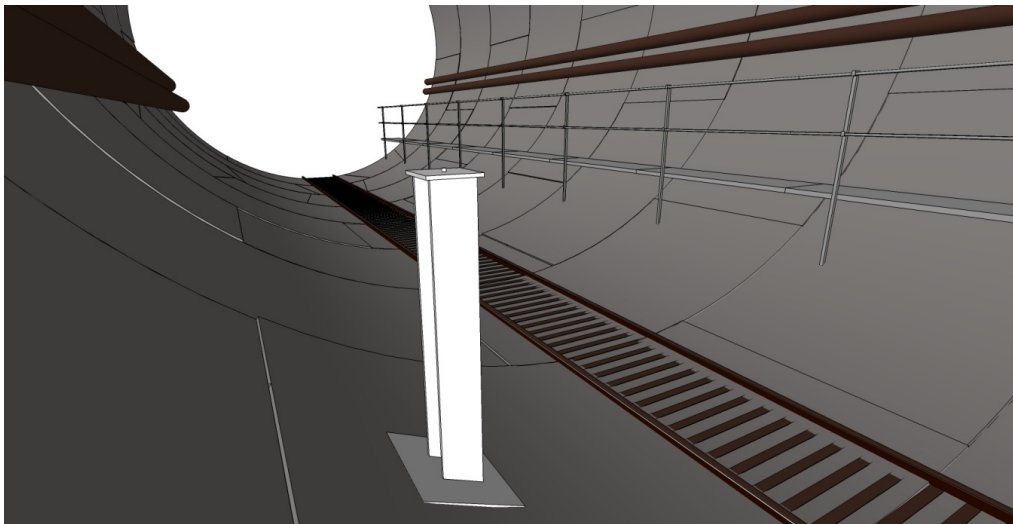
Mätning sker endast mot punkter på motsatt sida av tunneln. På så sätt mäts det aldrig längs med tunnelväggen, och effekten av refraktion minimeras. Fördelarna med detta system är att man undviker störning från produktionen, det går att mäta även om tåg passerar.



Figur 16 – Platta med Leica mätarm och prisma

3.2.7.2 Byggnät typ 2

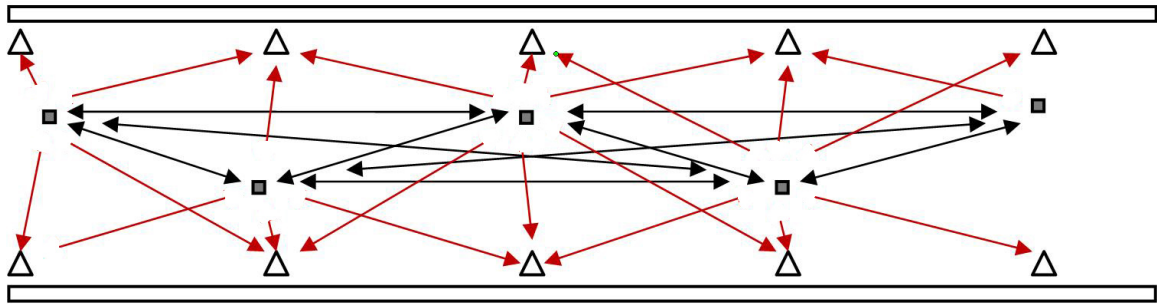
Denna metod baseras på stabila stålpelare, fastbultade i betongsegmenten. Mätning utförs mellan stålpelarna samt mot plattor med prismet på tunnelväggarna. (Leica mätarm och prismahållare GPH1 enligt figur 16).



Figur 18 - Stålpelare för etablering av mätinstrument.

Stålpelarna placeras 8-10 meter från punktparen på väggarna, samt cirka 2 meter från spårcentrum. Nästa stålpelare placeras vid nästa punktpar, men på motsatt sida spårcentrum. På så sätt är det möjligt att mäta in två stålpelare både framåt och bakåt i tunnelriktningen. Detta upprepas vid varje punktpar cc 150m.

Från varje stålpelare mäts tre punktpar in, första punktparet bakåt, punktparet närmast stålpelaren och första punktparet framåt.



Figur 19 - Principskiss för mätmetod "byggnät typ 2"

Refraktion bör påverka detta nät mindre än konsolnätet, då mätning sker mer längs tunnelcentrum. En annan fördel med detta system, med kvarvarande stationer (stälpelare), istället för det traditionella med stativ, är att nätet på ett enkelt sätt kan förlängas.

Nackdelen är att mätning sker närmare spåret, där produktion pågår vilket kan störa mätningen. Stomnätet innehåller också färre observationer än byggnät typ 1.

3.2.8 Bearbetning av mätdata

Beräkningsarbetet startar med att alla inmätningar satsreduceras. Första helsatsen inaktiverades alltid, då denna ofta är något sämre än de 3 följande. Detta på grund av att man i första cirkelläget i första helsatsen måste vrida och trycka på instrumentet för att mäta alla bakriktor.

Helsatser, vars mätningar avvek mer än 1 mgon från stationsmedel, inaktiverades.

För att kunna korrigera inmätningarna krävs det en fil med approximativa koordinater (både plan och höjd), för samtliga nypunkter.

Den satsreducerade filen kan nu med hjälp av de approximativa koordinaterna korrigeras med hänsyn till gällande projektion samt för uppmätt temperatur och lufttryck. När denna korrektion av mätdata har utförts, sparas en ny inmätningfil som utgör indata för nätutjämnningen.

3.2.9 Nätutjämnning - Beräkning av mätdata

Första steget i arbetet med att utjämna ett uppmätt stomnät är lämpligen att utföra en "fri utjämnning". Då beräknas nätet först helt fritt, och ansluts sedan med en transformation. Nätet passas på kända punkter genom förflyttning i X- och Y-led. På detta sätt kan man lättare söka efter grova fel i mätningarna. Alla observationer med en standardiserad residual över 2, men under 3, kontrolleras och behålls i utjämnningen om ingen orsak till felet konstaterats.

Standardresidualer över 3 kontrollerades och togs oftast bort. Låg värdet precis över 3,0 kan det vara att denna observations motsägelse har orsakas av till exempel refraktion. Därför lämnades dessa observationer i vissa fall kvar.

Därefter gjordes en ”absolut utjämning” där nätet deformerades för att passa exakt på de kända punkterna, vilka behåller sina ursprungliga koordinater. En ny granskning gjordes därefter av standardresidualerna.

De standardresidualer över 3,0 som inte fanns vid den ”fria” utjämningen indikerar att det finns spänningar mellan de kända punkterna. Det innebär att det kan vara mer till skada än nytta att plocka bort dessa observationer.

Var det många höga standardavvikelse, så gjordes det fler kompletterande mätningar där mätning mot utgångspunkter utökades. Här räckte det att mäta om vissa enstaka stationer.

Om alla mätningar, utom en station, är mätt bättre än vad som är förväntat, och denna enda station är mätt som förväntat, kommer dess observationer att behållas med standardavvikelse som kan vara onormalt höga, trots att mätningarna är bra.

Grundmedelfelet för hela utjämningen har stor betydelse för om något skall mätas om. Ett grundmedelfel som ligger under 1,0 visar att mätningarna är tillräckligt bra, trots någon enstaka hög standardresidual. Vid höga standardavvikelse togs hänsyn till respektive observations residualvärde i mm eller mgon.

När en mätning med kort längd flaggas med en hög standardresidual, så kontrolleras det vad detta ger för en förbättring i verkligheten, innan mätningen kasseras. Detta händer ofta med mätningar mellan två punktpar i ”byggnät typ 1”, då dessa punkter endast sitter ca 9 meter från varandra.

De slutliga utjämningarna sparades och koordinatlistor med alla nypunkter genererades. Även en nätutjämningsrapport genererades för båda näten. I denna är det möjligt att granska alla observationer och dess residualer i nätutjämningen.

3.2.10 Resultat

Resultatet av de två olika stomnäten verifieras med hjälp av ett stomnät som är anslutet i båda ändar. Detta stomnät kallar vi ”byggnät anslutet”. 16 punktpar i tunneln är gemensamma för de tre stomnäten, och kan kontrolleras. Dessa anslutna punkter redovisas i tabell 1.

Punkt	X	Y
P2V	50004,321	54754,155
P2H	50009,308	54747,460
P70V	50124,675	54843,200
P70H	50129,572	54836,536
P139V	50246,588	54933,415
P139H	50251,444	54926,710
P205V	50363,302	55019,734
P205H	50368,132	55013,069
P276V	50488,828	55112,693
P276H	50493,741	55105,989
P342V	50605,478	55199,113
P342H	50610,371	55192,484
P410V	50725,785	55288,186
P410H	50730,713	55281,486
P469V	50830,074	55365,380
P469H	50835,057	55358,762
P536V	50948,597	55453,131
P537H	50955,338	55447,760
P605V	51070,581	55543,398
P605H	51075,501	55536,740
P672V	51189,139	55631,192
P673H	51195,808	55625,800
P742V	51312,903	55722,811
P741H	51316,042	55714,835
P808V	51429,519	55809,133
P808H	51434,537	55802,518
P879V	51555,115	55902,042
P878H	51558,334	55894,094
P947V	51675,393	55991,083
P947H	51680,330	55984,501
P1018V	51800,847	56083,941
P1019H	51807,679	56078,711

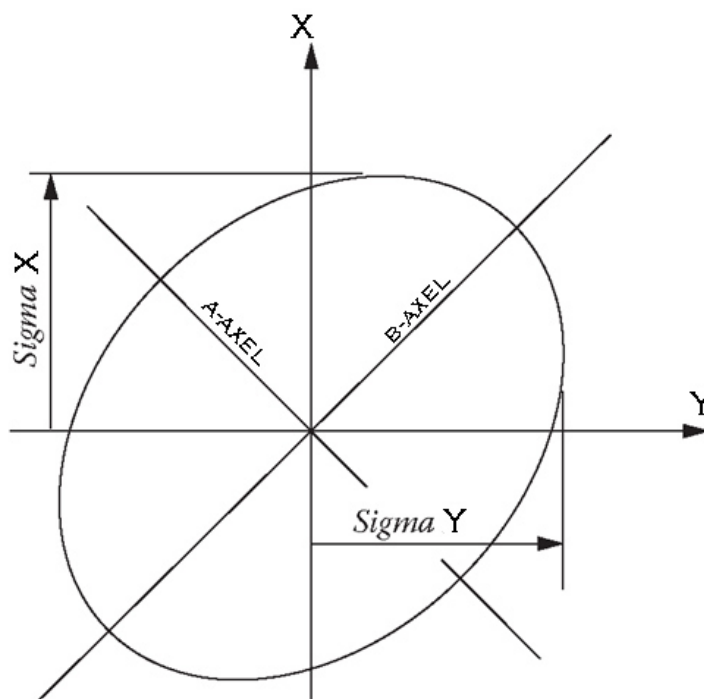
Tabell 1 – kända koordinater för “byggnät anslutet”

För att analysera de två nätverkens slutresultat jämförs deras koordinater med motsvarande koordinat från ”byggnät anslutet”. Denna jämförelse görs som en vanlig koordinatdifferens-beräkning med hjälp av Pythagoras sats:

$$\text{radiellt fel } d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (\text{ekv.1})$$

För att vidare undersöka de två stomnätens osäkerhet jämför vi även de beräknade nypunkternas felellipser.

Felen i ett mätt tunnelstomnät, har en tendens att ackumuleras allt eftersom man mäter sig in i tunneln. Den ”sanna” positionen för en av de beräknade nypunkterna ligger innanför en ellips av osäkerhet.



Figur 19 - Felellips

För att beräkna stomnätets genomsnittliga mått på kontrollerbarhet (k) dividerar vi antal överbestämningar (ö) med antalet mätningar (n) och får

$$k = \frac{\ddot{o}}{n}$$

Stomnätets grundmedelfel är en indikation till vilken grad mätdata och a priorifel överensstämmer. Ett grundmedelfel på 1.0 indikerar att kvalitén på

mätdata motsvarar de tidigare bestämda a priorifelen. Ett värde på över 1.0 indikerar att man varit för optimistisk i sina förutsägelser. För man ett väldigt litet grundmedelfel antyder detta motsvarande att man varit för pessimistisk.

3.2.10.1 Byggnät typ 1

Nedan redovisas en sammanfattning av nätutjämningsrapport för ”byggnät typ 1, samt en tabell där radiella differenser mot ”byggnät anslutet” har beräknats.

Beräkning:	Utjämnig	Metod	Absolut anslutning		
Antal observationer:	764		Kontrollerbarhet:	0.71	
Antal okända:	221		Minsta tillåtna (HMK):	0.50	
Rangdefekt:	0				
Redundans:	543		Grundmedelfel:	0.75	
			Max tillåtna (HMK):	1.04	
A priori standardavvikelse:					
(Notera: Dessa är de senaste använda standardinställningarna, värden kan variera för individuella mätningar)					
Riktningar:	0.0003		Antal helsatser:	3	
Orienterade riktningar:	0.0020		Antal helsatser:	2	
Längder:	0.001	+ 1,000 ppm			
Centrering:	0.000		Koordinater	0.020	
			Koordinatdifferenser:	0.005	
Fördelning av Std Res					
Sigmanivå:	Värde	Antal observationer	Ackumulerad (%)	Teoretisk (%)	
1	0.0 - 1.0	639	83.64	68.08	
2	1.0 - 2.0	105	97.38	95.65	
3	2.0 - 3.0	18	99.74	99.71	
0	0.0000	2	100.00	100.00	
?	Ej beräkningsbar	0	100.00		

Tabell 2 – Nätutjämningsrapport – Byggnät typ 1

Punkt	X	Y	Rad, differens	a-axel	b-axel	Vinkel
P2V	50004,320	54754,157	0,003	0,000	0,000	63,412
P2H	50009,307	54747,463	0,002	0,000	0,000	41,277
P70V	50124,674	54843,204	0,005	0,000	0,000	138,864
P70H	50129,570	54836,541	0,004	0,000	0,000	141,861
P139V	50246,585	54933,421	0,006	0,001	0,000	139,747
P139H	50251,441	54926,715	0,006	0,001	0,000	141,347
P205V	50363,296	55019,741	0,009	0,001	0,000	139,894
P205H	50368,127	55013,077	0,009	0,001	0,000	141,240
P276V	50488,821	55112,702	0,012	0,001	0,000	140,024
P276H	50493,734	55105,999	0,012	0,001	0,000	141,108
P342V	50605,470	55199,124	0,014	0,002	0,000	140,152
P342H	50610,363	55192,496	0,014	0,002	0,000	141,015
P410V	50725,774	55288,199	0,017	0,002	0,000	140,209
P410H	50730,703	55281,500	0,018	0,002	0,000	140,945
P469V	50830,062	55365,396	0,021	0,003	0,000	140,257
P469H	50835,044	55358,779	0,020	0,003	0,000	140,900

P536V	50948,583	55453,151	0,024	0,003	0,000	140,295
P537H	50955,323	55447,779	0,025	0,003	0,000	140,874
P605V	51070,563	55543,422	0,030	0,003	0,001	140,315
P605H	51075,482	55536,764	0,030	0,003	0,001	140,832
P672V	51189,116	55631,220	0,036	0,004	0,001	140,342
P673H	51195,785	55625,828	0,037	0,004	0,001	140,815
P742V	51312,877	55722,845	0,043	0,005	0,001	140,353
P741H	51316,016	55714,869	0,043	0,005	0,001	140,785
P808V	51429,490	55809,171	0,050	0,005	0,001	140,373
P808H	51434,507	55802,558	0,048	0,005	0,001	140,772
P879V	51555,079	55902,087	0,057	0,006	0,001	140,376
P878H	51558,298	55894,139	0,057	0,006	0,001	140,754
P947V	51675,354	55991,134	0,065	0,006	0,001	140,401
P947H	51680,290	55984,553	0,065	0,006	0,001	140,742
P1018V	51800,802	56084,000	0,074	0,007	0,001	140,419
P1019H	51807,634	56078,770	0,074	0,007	0,001	140,734

Tabell 3 – Koordinater med avvikelser samt felellipser "byggnät typ 1"

3.2.10.2 Byggnät typ 2

Nedan redovisas en sammanfattning av nätutjämningsrapport för "byggnät typ 2, samt en tabell med alla beräknade nypunkters koordinater, radiella differenser mot "byggnät anslutet" och felellipser.

Beräkning:	Utjämnning	Metod	Absolut anslutning		
Antal observationer:	486		Kontrollerbarhet:	0.69	
Antal okända:	152		Minsta tillåtna (HMK):	0.50	
Rangdefekt:	0				
Redundans:	334		Grundmedelfel:	0.77	
			Max tillåtna (HMK):	1.06	
A priori standardavvikelse:					
(Notera: Dessa är de senaste använda standardinställningarna, värden kan variera för individuella mätningar)					
Riktningar:	0.0003		Antal helsatser:	3	
Orienterade riktningar:	0.0020		Antal helsatser:	2	
Längder:	0.001	+ 1,000 ppm			
Centrering:	0.000		Koordinater	0.020	
			Koordinatdifferenser:	0.005	
Fördelning av Std Res					
Sigmanivå:	Värde	Antal observationer	Ackumulerad (%)	Teoretisk (%)	
1	0.0 - 1.0	400	82.30	68.05	
2	1.0 - 2.0	52	93.00	95.62	
3	2.0 - 3.0	16	96.30	99.70	
0	0.0000	4	97.12	100.00	
?	Ej beräkningsbar	0	100.00		

Tabell 4 – Nätutjämningsrapport – Byggnät typ 2

Punkt	X	Y	Rad, differens	a-axel	b-axel	Vinkel
P2V	50004,320	54754,155	0,001	0,001	0,000	45,312
P2H	50009,308	54747,461	0,001	0,001	0,000	18,220
P70V	50124,673	54843,201	0,002	0,001	0,001	121,556
P70H	50129,571	54836,538	0,002	0,001	0,001	138,605
P139V	50246,586	54933,417	0,003	0,001	0,001	138,755
P139H	50251,442	54926,712	0,003	0,001	0,001	173,113
P205V	50363,299	55019,737	0,004	0,001	0,001	138,503
P205H	50368,130	55013,072	0,004	0,001	0,001	142,608
P276V	50488,824	55112,697	0,005	0,002	0,001	139,589
P276H	50493,738	55105,993	0,005	0,002	0,001	149,349
P342V	50605,474	55199,118	0,006	0,002	0,001	139,372
P342H	50610,367	55192,489	0,006	0,002	0,001	141,612
P410V	50725,779	55288,192	0,008	0,002	0,001	139,415
P410H	50730,707	55281,493	0,008	0,002	0,001	141,613
P469V	50830,067	55365,387	0,010	0,003	0,001	140,287
P469H	50835,050	55358,770	0,010	0,003	0,001	143,149
P536V	50948,589	55453,140	0,012	0,003	0,001	140,135
P537H	50955,330	55447,769	0,012	0,003	0,001	141,069
P605V	51070,572	55543,409	0,014	0,004	0,001	140,345
P605H	51075,491	55536,751	0,015	0,004	0,001	142,056
P672V	51189,128	55631,205	0,017	0,004	0,001	140,117
P673H	51195,797	55625,814	0,017	0,004	0,001	141,009
P742V	51312,890	55722,827	0,020	0,005	0,001	140,394
P741H	51316,029	55714,850	0,020	0,005	0,001	141,582
P808V	51429,505	55809,151	0,023	0,005	0,001	140,286
P808H	51434,523	55802,536	0,023	0,005	0,001	140,878
P879V	51555,098	55902,062	0,026	0,006	0,001	140,350
P878H	51558,318	55894,114	0,026	0,006	0,001	140,871
P947V	51675,376	55991,105	0,029	0,006	0,001	140,434
P947H	51680,312	55984,524	0,029	0,006	0,001	141,045
P1018V	51800,828	56083,967	0,033	0,007	0,001	140,373
P1019H	51807,660	56078,737	0,032	0,007	0,001	140,783

Tabell 5 – Koordinater med radiell avvikelse för “byggnät typ 2”

3.2.11 Utvärdering av resultat

Enligt HMK stornät bör ett beräknat stornät utvärderas enligt följande parametrar:

- Nätets kontrollerbarhet
- Beräknat grundmedelfel
- Förbättringar eller slutningsfel

De två nätet har snarlika och fullt godkända resultat när det gäller kontrollerbarhet och grundmedelfel, men skiljer sig när vi jämför differenser mot det anslutna stornätet.

3.2.11.1 Felfortplantning

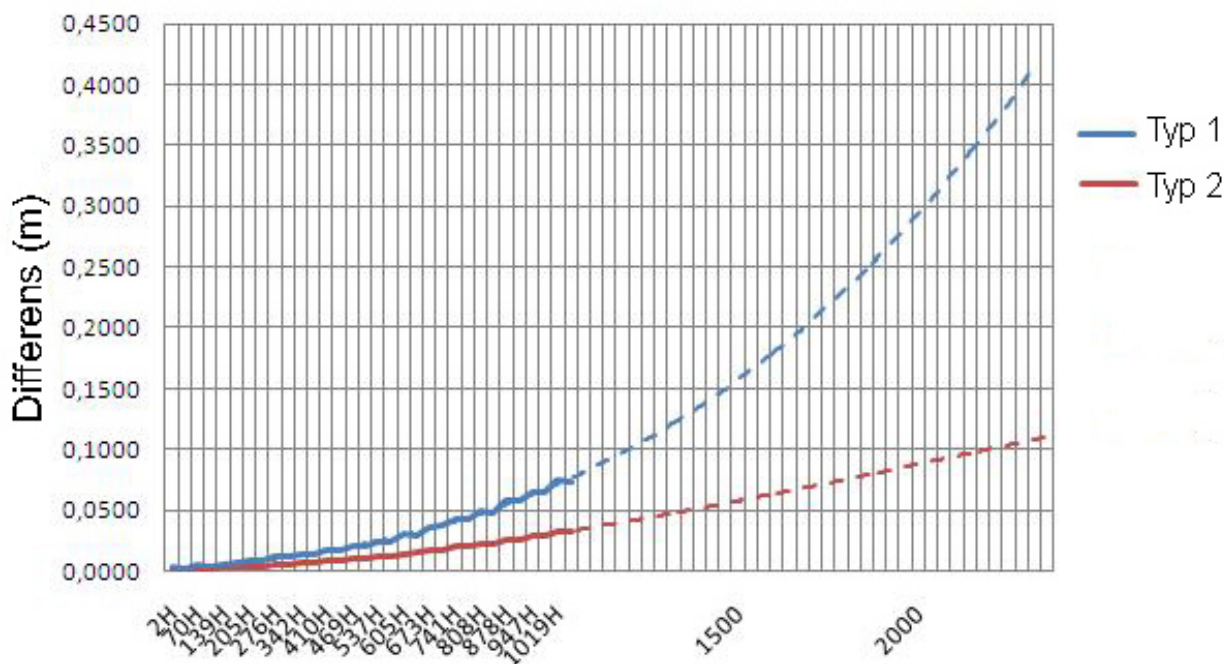
För att enkelt visualisera den verkliga felfortplantningen i de två undersökta stornäten, har vi valt att plotta resultaten av differenserna mot vårt anslutna kontrollstornät i en graf.



Figur 20 – Felfortplantning

3.2.11.2 Jämförelser av differenser - trendlinjer

Figur 21 visar de slutgiltiga genomslagsfelen, som de två stornätet skulle ha fått, om koordinatanslutning vid mellanpåslaget inte görs. Här har vi använt oss av differenserna i näten, och anpassat funktioner på dessa dataserier. På så sätt kan man med dessa trendlinjer extrapolera ett teoretiskt genomslagsfel.



Figur 21 – Felfortplantning med trendlinjer

Efter ca 5 km ser man ett genomslagsfel på över 40 cm i ”byggnät typ 1”. Ett fyra gånger så stort fel än vad som är tillåtet i byggplatstoleransen för projekt Hallandsås.

3.2.11.3 Felellipser

Vi har valt att studera felellipserna för det sista punktparet längst in i tunneln, i respektive stomnät. Här fann vi att de två beräknade stomnäten fick identiska storlekar på sina axlar. Båda med 7 mm på a-axeln, som motsvarar en riktning vinkelrät från tunnelns referenslinje.

Byggnät typ 1				Byggnät typ 2			
Punkt	a-axel	b-axel	Vinkel	Punkt	a-axel	b-axel	Vinkel
P1018V	0,007	0,001	140,373	P1018V	0,007	0,001	140,419
P1019H	0,007	0,001	140,783	P1019H	0,007	0,001	140,734

Tabell 6 – Felellipser för sista punktparen

3.3 Datorsimulering

I vårt fall upprättades två olika nätsimuleringar i SBG Geo. Målet är att i datorn rekonstruera de två byggnäten från fallstudien ”Projekt Hallandsås”. En med mätkonfiguration enligt ”byggnät typ 1” samt en enligt ”byggnät typ 2”. De fiktiva punktparen på väggarna samt pelarna är placerade i samma 150 meters intervall.

De båda näten använder sig av samma 6 anslutningspunkter och har en längd av ca 1,8 km.

3.3.1 Programvara

Samtliga simuleringar är beräknade i SBG Geo:s nätutjämningsmodul.

3.3.2 Parametrar

Beräkningen görs med samma a priorifel som i de verkliga stomnäten i fallstudie ”Projekt Hallandsås”:

- Längd 1mm + 1ppm
- Vinkel 0,0003 gon
- Centrering 0,5 mm

3.3.3 Resultat

I en stomnätsanalys går det ej att beräkna ett grundmedelfel, eller få ett slutningsfel. De parametrarna vi valt att utvärdera istället är:

- Kontrollerbarhet
- Simulerade nypunkters felellipser

3.3.3.1 Byggnät typ 1 – simulerad

Nedan redovisas en sammanfattning av nätutjämningsrapporten för det simulerade stomnätet ”byggnät typ 1”.

Beräkning:	Simulering	Metod	Absolut anslutning	
Antal observationer:	226		Kontrollerbarhet:	0.72
Antal okända:	64		Minsta tillåtna (HMK):	0.50
Rangdefekt:	0			
Redundans:	162		Grundmedelfel:	
			Max tillåtna (HMK):	1.09
A priori standardavvikelse:				
(Notera: Dessa är de senaste använda standardinställningarna, värden kan variera för individuella mätningar)				
Riktningar:	0.0003		Antal helsatser:	3
Orienterade riktningar:	0.0020		Antal helsatser:	2
Längder:	0.001	+ 1,000 ppm		
			Koordinater	0.020
Centrering:	0.000		Koordinatdifferenser:	0.005
Fördelning av Std Res				
Sigmanivå:	Värde	Antal observationer	Ackumulerad (%)	Teoretisk (%)
1	0.0 - 1.0			67.97
2	1.0 - 2.0			95.53
3	2.0 - 3.0			99.68
0	0.0000			100.00
?	Ej beräkningsbar			

Tabell 6 – Rapport från simulerad nätutjämnning av byggnät typ 1

Nedan redovisas vidare en tabell med beräknade nypunkter med tillhörande felellipser som simuleringen genererade.

Punkt	X	Y	a-axel	b-axel	Vinkel
1h	50006.994	54745.654	0.000	0.000	41.1445
1v	50001.936	54752.486	0.000	0.000	40.5446
2h	50127.553	54834.903	0.001	0.001	138.6764
2v	50122.496	54841.735	0.001	0.001	142.3039
3h	50248.113	54924.152	0.001	0.001	139.6428
3v	50243.055	54930.984	0.001	0.001	141.4338
4h	50368.672	55013.401	0.001	0.001	139.9040
4v	50363.615	55020.233	0.001	0.001	141.1971
5h	50489.232	55102.650	0.002	0.001	140.0489
5v	50484.174	55109.482	0.002	0.001	141.0664
6h	50609.791	55191.899	0.002	0.001	140.1391
6v	50604.734	55198.731	0.002	0.001	140.9823
7h	50730.351	55281.149	0.003	0.001	140.2016
7v	50725.293	55287.980	0.003	0.001	140.9240
8h	50850.910	55370.398	0.003	0.001	140.2475
8v	50845.853	55377.229	0.003	0.001	140.8808
9h	50971.470	55459.647	0.004	0.001	140.2813
9v	50966.413	55466.478	0.004	0.001	140.8489
10h	51092.029	55548.896	0.005	0.001	140.3107
10v	51086.972	55555.728	0.005	0.001	140.8209

Tabell 7 – Koordinatlista - byggnät typ 1

3.3.3.2 Byggnät typ 2 – simulerad

Nedan redovisas en sammanfattning av nätutjämningsrapporten för det simulerade stomnätet ”byggnät typ 2”.

Beräkning:	Simulering	Metod	Absolut anslutning	
Antal observationer:	224		Kontrollerbarhet:	0.66
Antal okända:	76		Minsta tillåtna (HMK):	0.50
Rangdefekt:	0			
Redundans:	148		Grundmedelfel:	
			Max tillåtna (HMK):	1.10
A priori standardavvikelse:				
(Notera: Dessa är de senaste använda standardinställningarna, värden kan variera för individuella mätningar)				
Riktningar:	0.0003		Antal helsatser:	3
Orienterade riktningar:	0.0020		Antal helsatser:	2
Längder:	0.001	+ 1,000 ppm		
			Koordinater	0.020
Centrering:	0.000		Koordinatdifferenser:	0.005
Fördelning av Std Res				
Sigmanivå:	Värde	Antal observationer	Ackumulerad (%)	Teoretisk (%)
1	0.0 - 1.0			67.96
2	1.0 - 2.0			95.52
3	2.0 - 3.0			99.68
0	0.0000			100.00
?	Ej beräkningsbar			

Tabell 8 – Rapport från simulerad nätutjämnning av byggnät typ 2

Nedan redovisas vidare en tabell med beräknade nypunkter med tillhörande felellipser som simuleringen genererade.

Punkt	X	Y	a-axel	b-axel	Vinkel
1h	50006.994	54745.654	0.001	0.001	55.4643
1v	50001.936	54752.486	0.001	0.001	11.6774
2h	50127.553	54834.903	0.001	0.001	131.8875
2v	50122.496	54841.735	0.001	0.001	143.5950
3h	50248.113	54924.152	0.002	0.001	138.1853
3v	50243.055	54930.984	0.002	0.001	142.4940
4h	50368.672	55013.401	0.002	0.001	138.7395
4v	50363.615	55020.233	0.002	0.001	141.1503
5h	50489.232	55102.650	0.003	0.001	139.6009
5v	50484.174	55109.482	0.003	0.001	141.2290
6h	50609.791	55191.899	0.004	0.001	139.6791
6v	50604.734	55198.731	0.004	0.001	140.8893
7h	50730.351	55281.149	0.005	0.001	139.9815
7v	50725.293	55287.980	0.005	0.001	140.9435
8h	50850.910	55370.398	0.005	0.001	140.0054
8v	50845.853	55377.229	0.005	0.001	140.8012
9h	50971.470	55459.647	0.006	0.001	140.1516
9v	50966.413	55466.478	0.006	0.001	140.8324
10h	51092.029	55548.896	0.007	0.001	140.1045
10v	51086.972	55555.728	0.007	0.001	140.7761

Tabell 9 – Koordinatlista - byggnät typ 2

3.3.3.3 Utvärdering av resultat

Som framgår av tabellerna 6 samt 8 så uppnår vi en något bättre kontrollerbarhet i ”byggnät typ 1”. Studerar vi felellipseerna ser vi även här att beräkningen av ”byggnät typ 1” genererar något mindre felellipser.

4 Slutsats

I vår fältstudie ”Projekt Hallandsås” fann vi att stomnätet ”Byggnät typ 2”, som baserades på stationsuppställningar nära tunnelcentrum, var det stomnät som gav oss det lägsta genomslagsfelet.

Datorsimuleringarna förutspådde det motsatta, men detta mest på grund av att byggnät typ 1 innehåller fler redundanta mätningar, i form av dubbelmätta längder. Eftersom datorsimuleringen inte kan ta hänsyn till refraktion, kommer den föredra det stomnät med flest överbestämda punkter.

Metoden i ”byggnät typ 1” resulterar i att vi får mycket fler observationer, då stationsuppställningar görs på alla väggpunkter. I ”Byggnät typ 2” ställs instrumentet uteslutande upp på stålpelarna och endast mätningar mellan pelarna blir dubbelmätta.

Trots en relativt stor datamängd kan vi inte med denna studie dra slutsatsen att byggnät typ 2 är en bättre metod för att minska effekten av refraktion vid mätning i tunnlar.

Det finns andra faktorer som troligtvis har påverkat resultaten i denna fältstudie. Allteftersom TBM-maskinen avancerade gjordes det upprepade injekteringar bakom tunnelsegmenten. Detta gjordes för att täta och stabilisera tunneln, men hade som följd att segmenten kunde röra på sig efter injekteringen.

En teori är att tunnelringen komprimerades enhetligt med riktning mot tunnelcentrum. Detta resulterar i att punkterna på väggen rör sig något i det horisontella ledet, medan pelarna endast påverkas i vertikalled.

Andra faktorer, som till exempel en liten horisontell vridning i anslutningsnätet vid södra påslaget, kan ha medfört att båda våra stomnät hamnade något fel i anslutningen vid mellanpåslaget.

Det är numera ett krav att bekräfta byggnät i långa tunnlar med hjälp av gyroteodolit. Gyroteodoliten mäter asimuter, i detta fall refererat till jordens rotationsaxel, och är till stor hjälp för att hitta fel orsakade av refraktion.

Det krävs en fortsatt studie för att bekräfta resultatet av vår fältstudie i tunneln i Hallandsås.

5 Referenser

W. Schofield, M. Breach (2007) *Engineering Surveying*
ISBN: 978-0-7506-6949-8

A. Chrzanowski (1981) *Optimization of the Breakthrough Accuracy in Tunneling Surveys*

P G. Hewitt (2002) *Conceptual Physics*
ISBN: 0-321-05202-1

Leica Geosystems (2009) *Leica TPS1200+ White paper*

Internetkällor

Lantmäteriet (2015) *HMK Geodesi, Stommätning*
http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/gamla_hmk/hmk-geodesi_stom.pdf

Lantmäteriet (2015) *HMK Geodesi, Markering*
http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/gamla_hmk/hmk-geodesi_marker.pdf
[2015-03-01]

Shelquist Engineering (2015) *An Introduction to Air Density and Density Altitude Calculations*
http://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm [2015-03-01]

Artiklar

Mikael Lilje, SINUS 2004 nr 3 – *Felteori – Vad är rätt och vad är fel?*