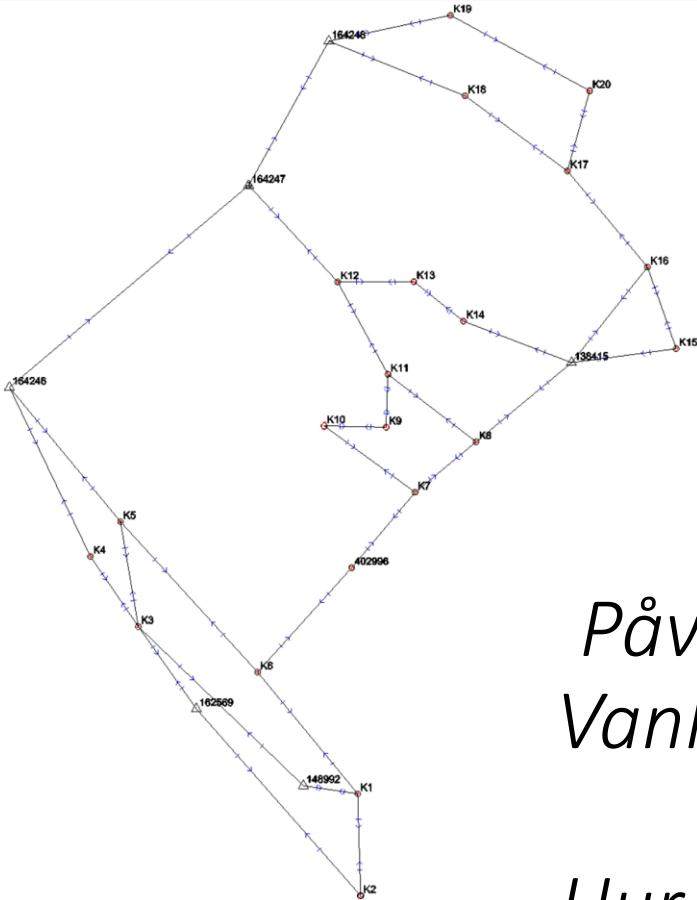


Hur optimerar man ett stomnät?



*Planering av nätet
Kontroll och val av utrustning
Välplanerad konfiguration*

*Påverkan på resultatet från olika felkällor
Vanliga felkällor, hur och varför de uppstår
Hur mycket felen påverkar ett nät
Hur man kan upptäcka och eliminera felen*



Thomas Dubois, Kartotek AB

Geodesidagarna, Upplands-Väsby 2026-02-04

Frågeställningar

Ett välplanerat nät , hur kan vi skapa och optimera det?

Vad innebär ett optimerat nät?

Varför behövs det, vi mäter väl ändå alltid tillräckligt bra?!



Felkällor



Vad mäter vi med?

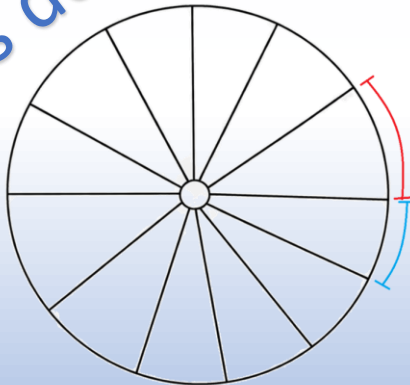


Totalstationer

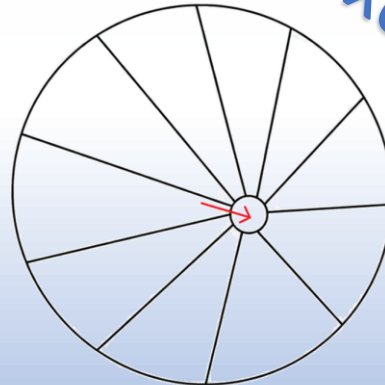
Många fel eliminerade av tekniken numera!



Cirkelns delningsfel

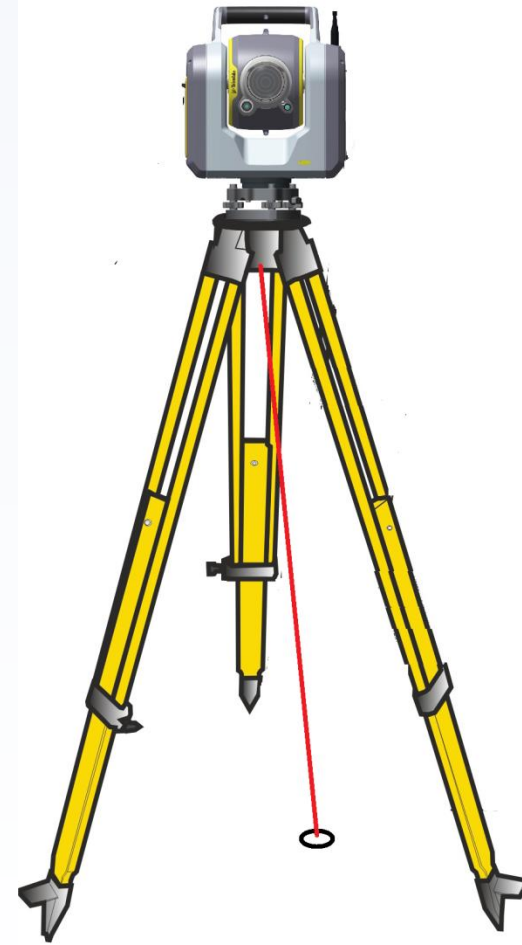
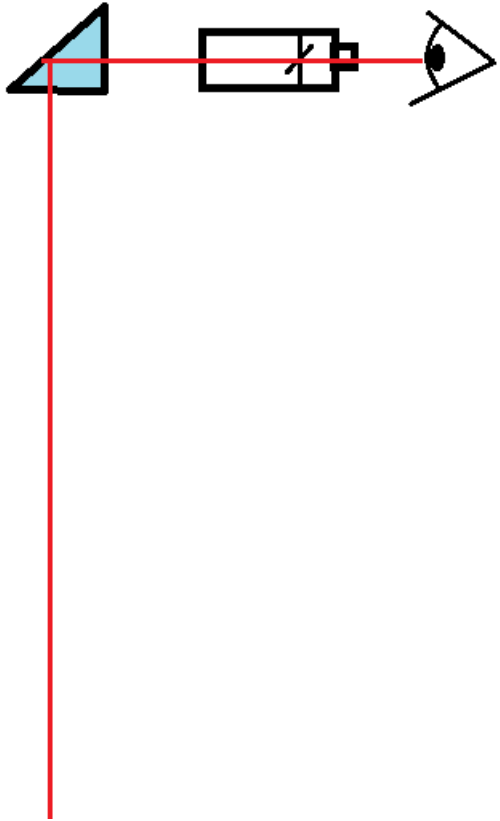


Cirkelns excentricitet



Optiska lodet

- Vanligaste "lilla felet" vid stommätning!



Atmosfären



- Tryck och temperatur
- 1 mm/km per grad fel
- 1mm/km per 3 mbar fel
- Extremfallen
 - "Svinkallt", högtryck på havsnivå
 - Varmt, lågtryck på hög höjd
 - Skillnad på längdkorrekturen på cirka 1 decimeter per km mellan extremfallen
- Luftfuktighet irrelevant förutom för mycket långa mätningar (flera km)

$$K_w = 273.61 - 79,31 \left[\frac{p}{273.15 + t} \right] + 11,27 \left[\frac{p_w}{273.15 + t} \right]$$

$$p_w = \frac{h}{100} \cdot 6.1078 \cdot e^{\left(\frac{17.269t}{2373+t} \right)}$$

with p = Air Pressure [hPa]
 t = Temperature [°C]
 p_w = Partial vapor pressure [hPa]
 h = Relative humidity [%]

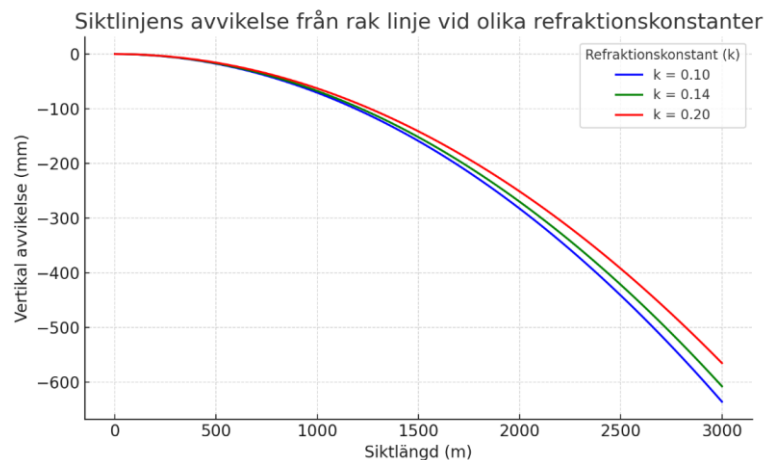
Trigonometriska höjder

- Stångens lutning

SH	1,500
Rörelse	0,050
dH	-0,0008

1,5 m prismahöjd och 5 cm centreringsfel för prisma ger mindre än millimeterfel i höjd. Högre prismahöjd ger mindre höjdfel om man svajar!

- Refraktion och jordkrökning



5 mm skillnad i höjd mellan extremvärdena för refraktion på 500 m avstånd.

$$(1 - k) \cdot \frac{(LL \cdot \sin Z)^2}{2 \cdot R}$$

Längd	500
R	6389000
k	0,05
dH	0,019

Längd	500
R	6389000
k	0,30
dH	0,014

Förhållanden	Typiskt intervall för k	Kommentar
Normala, stabila atmosfäriska förhållanden	0,12 – 0,16	Vanlig variation i Sverige under neutralt skiktad luft.
Stark temperaturinversion (kall mark, varm luft)	0,18 – 0,25	Ljuset böjs mer nedåt → siktlinjen kröks extra mycket.
Instabil atmosfär (varm mark, kall luft ovanför)	0,05 – 0,10	Ljusstrålen böjs uppåt → refraktionskorrigeringen underskattas.
Extrema förhållanden (snabba gradienter nära marken)	-0,05 – +0,30	Kan förekomma lokalt vid t.ex. soluppvärmda ytor eller kustzoner.

Avvägningsinstrument

- Kollimationsfel

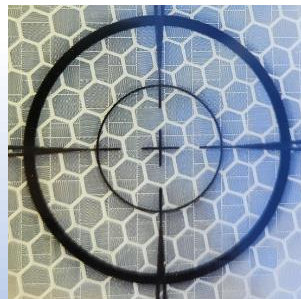
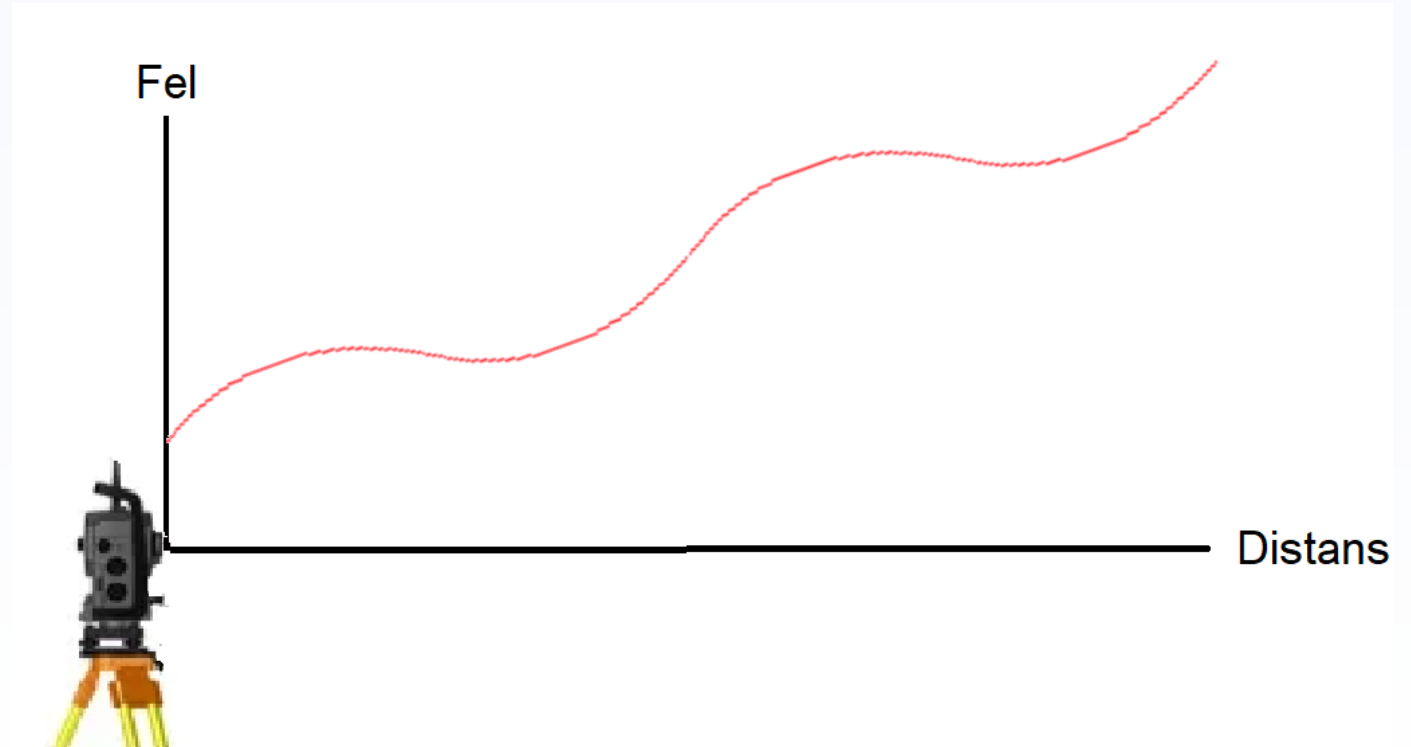
Varning för mätning i
uppforsbacke där sikten
går nära marken!

- Refraktion



Längdmätning

- Konstanta, längdberoende och cykliska fel
- Upprepad längdmätning från en uppställning mot samma prisma är inte oberoende mätningar!
- Flermätta längder – hur hanterar man dem? Olika synvinklar här!
- Reflexsignaler – smidiga men var försiktig!



Sned infallsvinkel
mot reflexsignal
ger längdfel, även
om man siktar rätt.

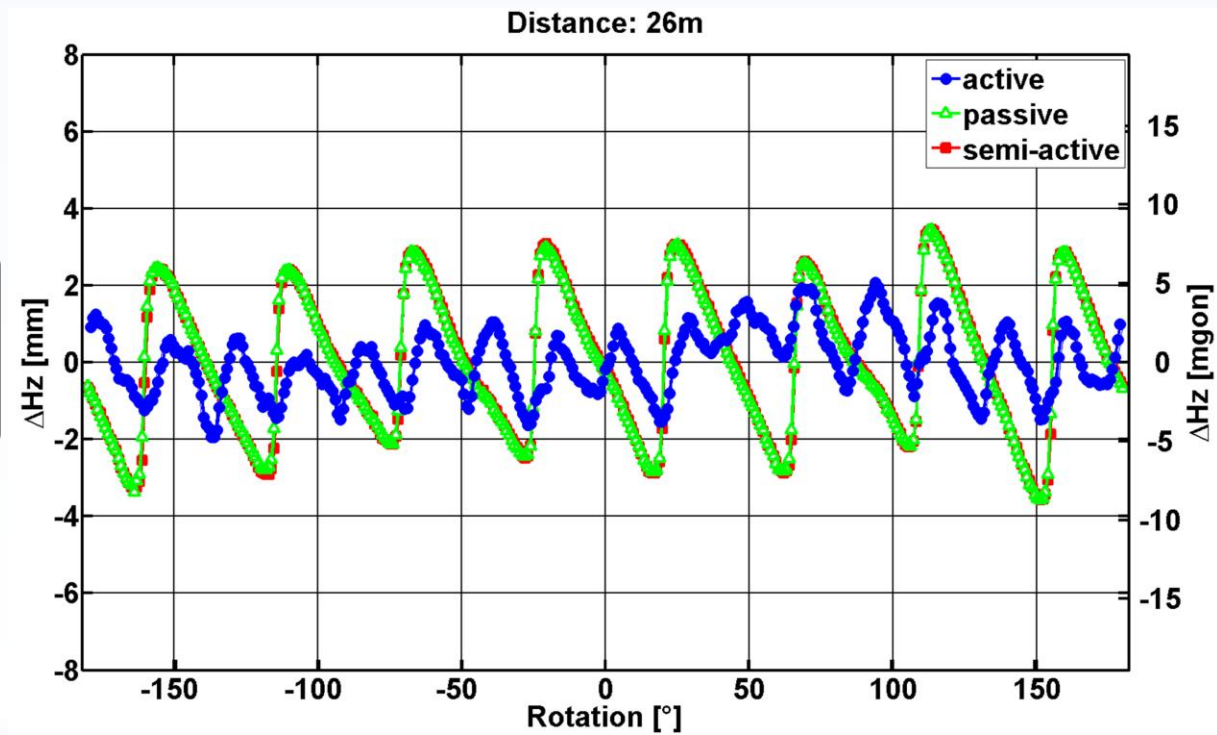
Vinkelmätning

- Distansens påverkan på vinkeln, osäkerheten ökar med avståndet
- Kalibrering av inriktning viktig, ATR mäter ibland med olika metoder i olika cirkellägen (helsatser eliminerar då inte felen)
- Riktning mot olika prismor

En totalstations bästa mätosäkerhet i vinkel motsvarar ett granbarrs tjocklek (ca 2mm) på en kilometers avstånd!



Fel i vinkel kan uppstå vid mätning mot 360-gradersprisma beroende på vridning.



Källa: Graz University of Technology

GNSS

Instrumentella fel

- Antenntyp och fascentrum

Systematiska fel

- Satellitbanefel (ephemeris error)
- Jonosfärisk och troposfärisk refraktion
- Multipath-effekt
- Relativ geometri (DOP)

Slumpmässiga fel

- Termiskt brus i mottagare
- Fluktuationer i signalstyrka



Laserskanner

Instrumentella fel

- Kalibreringsfel i vinkelsensorer och avståndsmätare
- Scannerdrift (temperaturberoende)

Systematiska fel

- "Boresight-misalignment"- kombinerade metoder
- Atmosfärisk refraktion
- Ytreflektion och infallsvinkel

Slumpmässiga fel

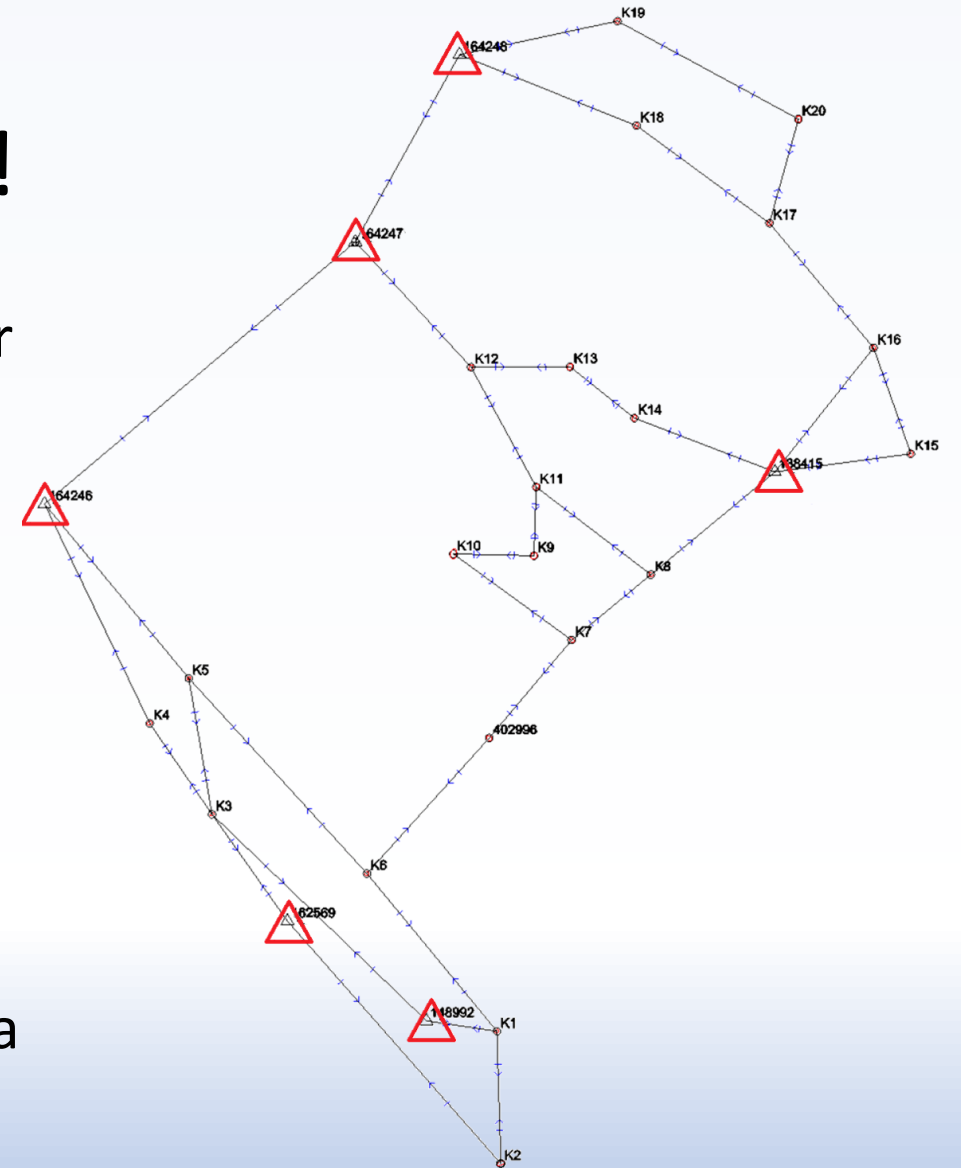
- Laserbrus och mottagarsignalbrus
- Punktregistreringsfel (alignment error, kombinerade stationer)



Kända punkter

Svårt med gränsvärden och regler!

- När dömer man ut en punkt som felaktig och ger den nya koordinater?
- Alla som har tillgång till koordinater för den felaktiga kända punkten påverkas!
- Bortkoppling måste oftast först bekräftas av beställaren.
- Att använda generella gränsvärden för fel i kända punkter (som för mätdata) är nästan omöjligt!

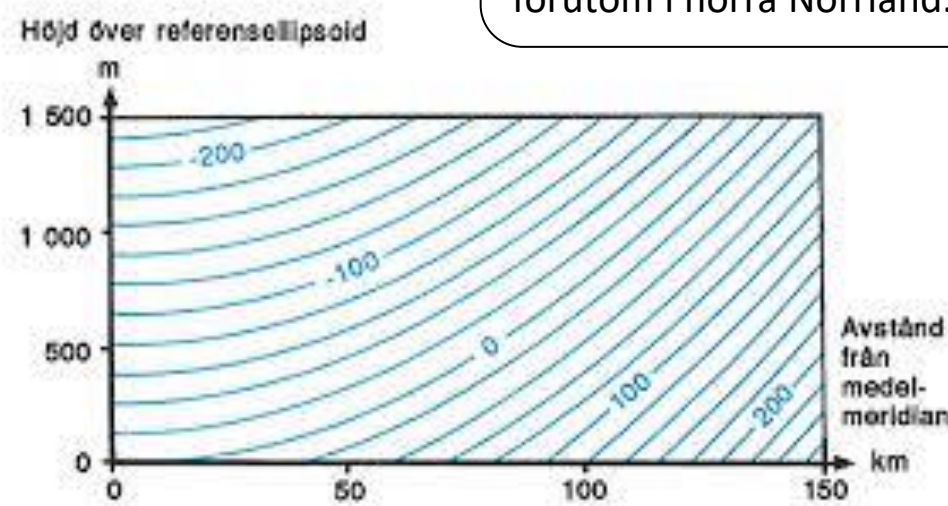


Skalfel

- Höjd- (ellipsoid-) korrektion
- Projektionskorrektion
- Felkalibrerad längdmätare

Höjden inte så noga för höjdkorrektion av nät i plan! Ett höjdfel på 64 m ger bara 1mm fel i plan för en 100-meterslängd.

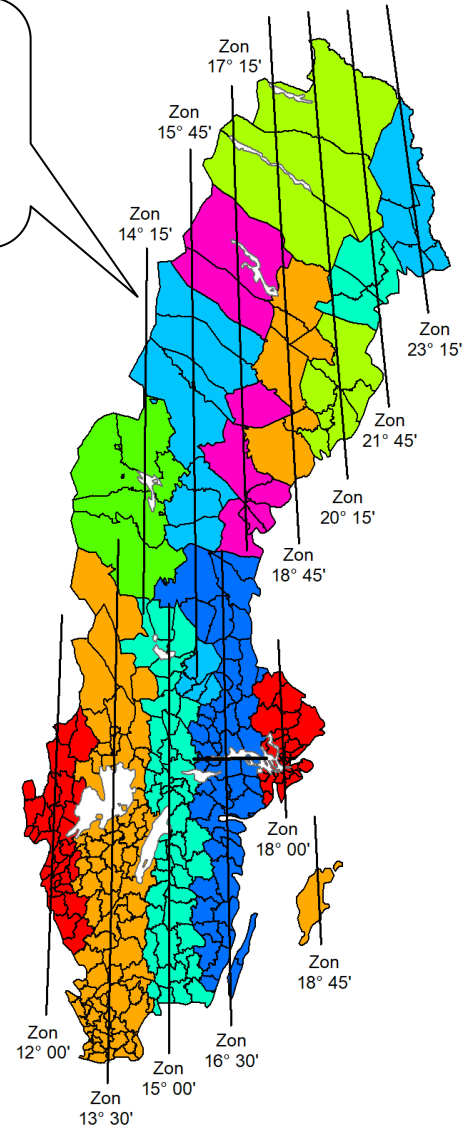
Längd	100
Höjd	64
R	6389000
dL	0,0010



18 mil från medelmeridianen är skalan 1:1 i SWEREF99 TM.

Längd	1000
E-medel	180750
R	6389000
S	0,9996
dL	0,0000

Maximalt 50mm uttänjning av längder per km i zonernas utkanter förutom i norra Norrland.



Källa för figurer:
Lantmäteriet

Hur kontrollerar vi mätningarna? Regelverk!



DokumentID
TDOK 2014:0571

Ver
5.0

K3. Byggnät i höjd för tunneldrivning ska upprättas i samband med byggnät i plan för tunneldrivning.

4.6.4.2 Mättningsprogram

K1. Upprättande av mättningsprogram för byggnät i tunnel ska upprättas enligt SIS-TS 21143:2016 avsnitt 6.5.3.2.

Teknisk specifikation SIS-TS 21143:2016

Publicerad/Published: 2016-06-15
Utgåva/Edition: 5
Språk/Language: svenska/Swedish
ICS: 91.200



Byggmätning – Geodetisk mätning, beräkning och redovisning av byggnadsverk och infrastruktur

Engineering survey for construction works – Surveying and mapping on edifice and infrastructure

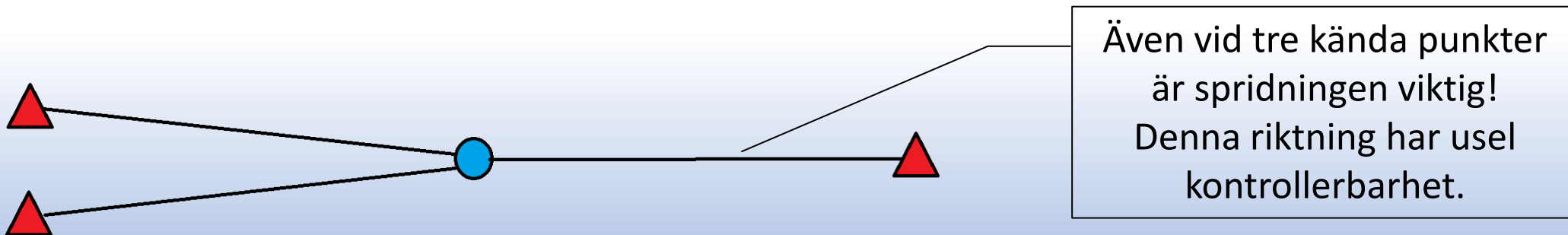
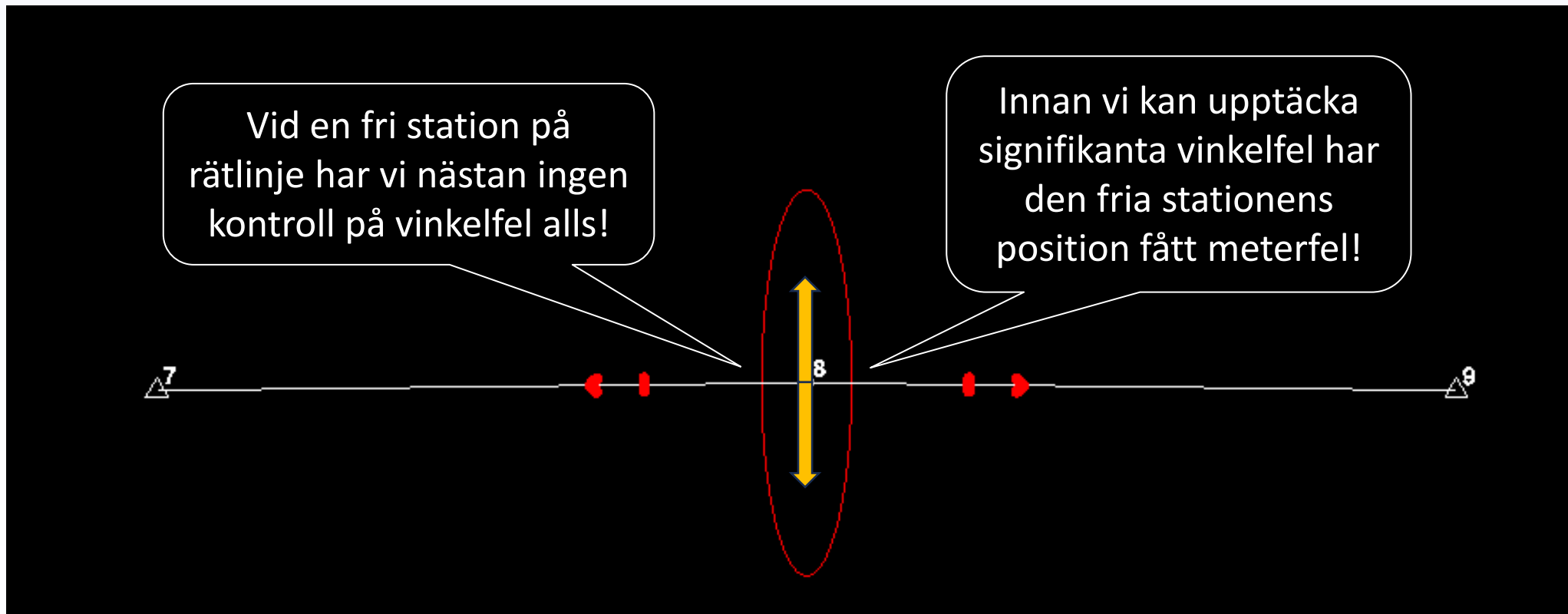
Tabell A.9 — Krav vid mätning av stornät i plan och höjd med totalstation

Exempel på felgränser.
Viktigaste tabellen i
SIS-TS?!

Benämning/utförande	Mätklass G1	Mätklass G2	Mätklass G3	Mätklass G4
Användningsområde	Nät för exceptionella anläggningar och hus- och industrikonstruktioner med prefabricerade element av betong, stål, glas ed. Kontrollmätning av exceptionella konstruktioner och anläggningar.	Nät för anläggningar och konstruktioner med höga krav på lägesnoggrannhet och orientering så som nät i plan för spåranläggning. Fackverksnät och tåg i plan för vägar, broar och övriga anläggningar. Nät för rörelse- och sättningskontroller. Trigonometrisk höjdmätning av bruksnät i höjd.	Bruksnät och nät för projektering och byggande av anläggningar med tillhörande konstruktioner.	Bruksnät och nät för anläggningar av enklare karaktär med lägre krav på lägesnoggrannhet. GNSS-teknik kan ersätta terrester mätning.
Totalstation	Klass T1, enligt tabell A.1	Klass T1, enligt tabell A.1	Klass T2, enligt tabell A.1	Klass T3, enligt tabell A.1
Spridning mellan helsatser, horisontalvinkel och vertikalvinkel, Hv och Vv	≤ 0,6 mgon	≤ 1,2 mgon	≤ 2,0 mgon	≤ 3,0 mgon
Spridning mellan längdmätningar i samma observationsset	≤ 2 mm	≤ 3 mm	≤ 5 mm	≤ 8 mm
Antal helsatser	≥ 3	≥ 3	≥ 2	≥ 2

Källa: SIS-TS 2016:21143

När påverkar mätfelen?



Mätstrategi i fält

- Helsatsmätning
- Olika uppställningar och sikter
- Fram- och återmätning
- Balanserade sträckor (lika långa mätta längder i nätet)
- Tidpunkter och miljöförhållanden (temperatur, vind, sol)

Val och kontroll av utrustning

- Totalstation, GNSS, avvägare etc. – när används vad?
- Kalibrering och instrumentkontroller:
 - Kollimationsfel
 - Kippaxelfel
 - ATR kontra manuell inriktning
 - Längdmätaren
- Kontroll av stativ, trefot
- Rutiner för daglig funktionskontroll



De gyllene parametrarna

- Kontrollerbarhet för hela nätet
- Individuella k-tal

Simulering

- Grundmedelfel – viktsenhetens standardosäkerhet
- Sigmanivåer – standardiserade förbättringar (med procenttal)

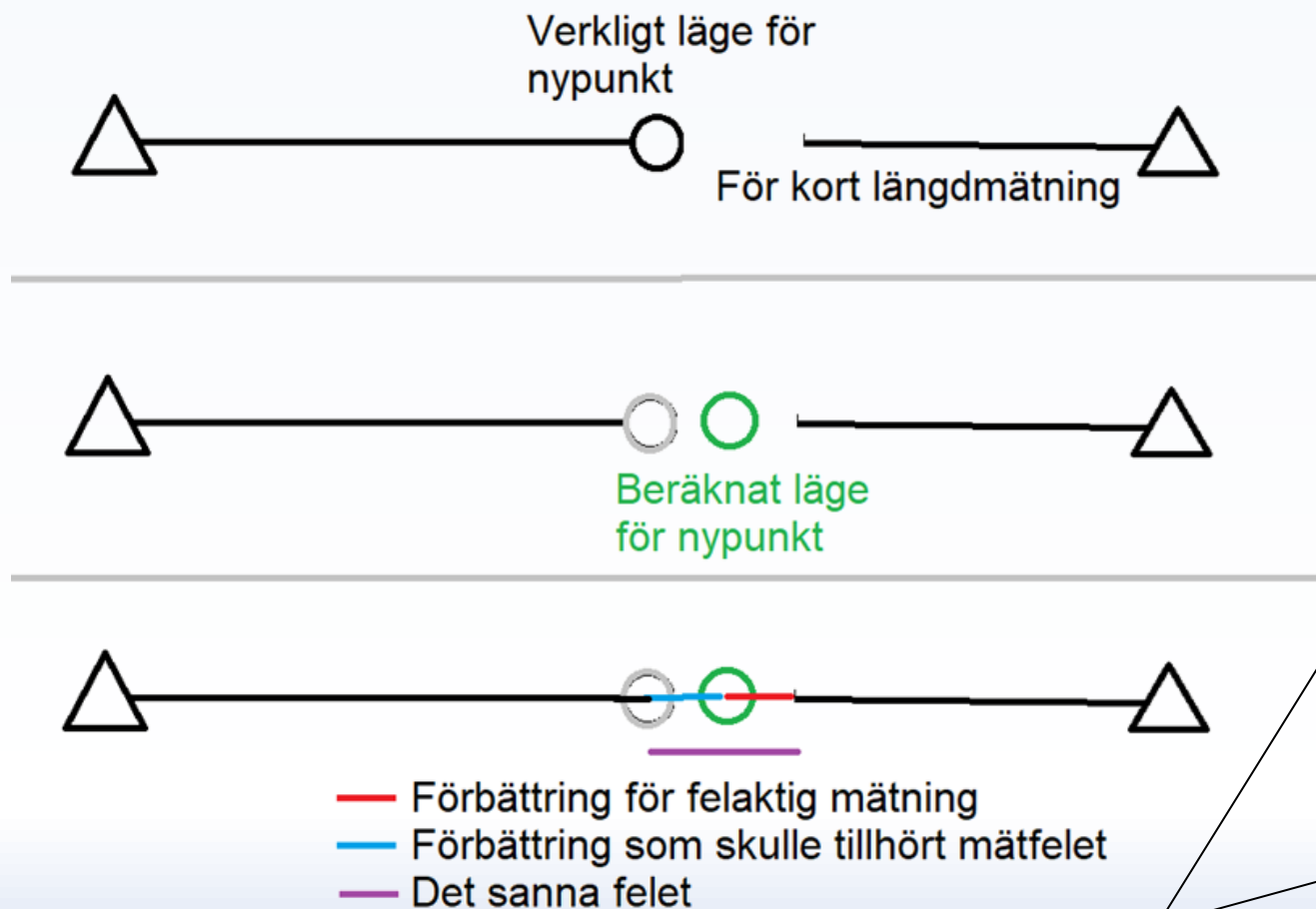
- Största punktmedelfel (osäkerhet)
- Största vinkelfel
- Största längdfel
- Största höjdfel

Kontrollera även

Viktigast!

efter en
nätutjämnning

Kontrollerbarhet, standardiserade förbättringar



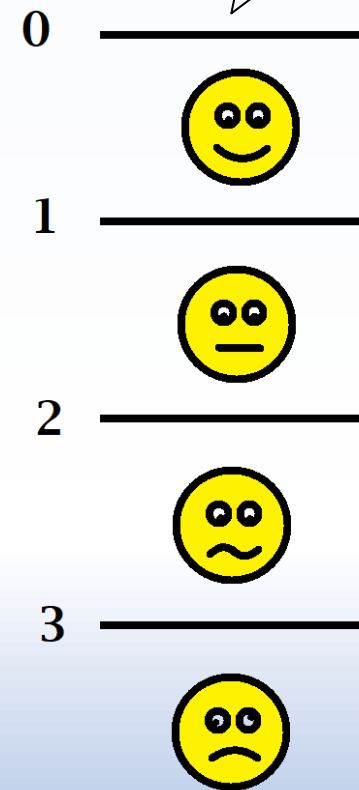
Individuellt k-tal för bägge längderna i detta fall är 0.5, då 50% av mättelet stannar kvar på den felaktiga mätningen (resten fördelas på kringliggande mätningar eller flyttar nypunkterna).

Medel av alla individuella k-tal är lika med nätets generella k-tal.

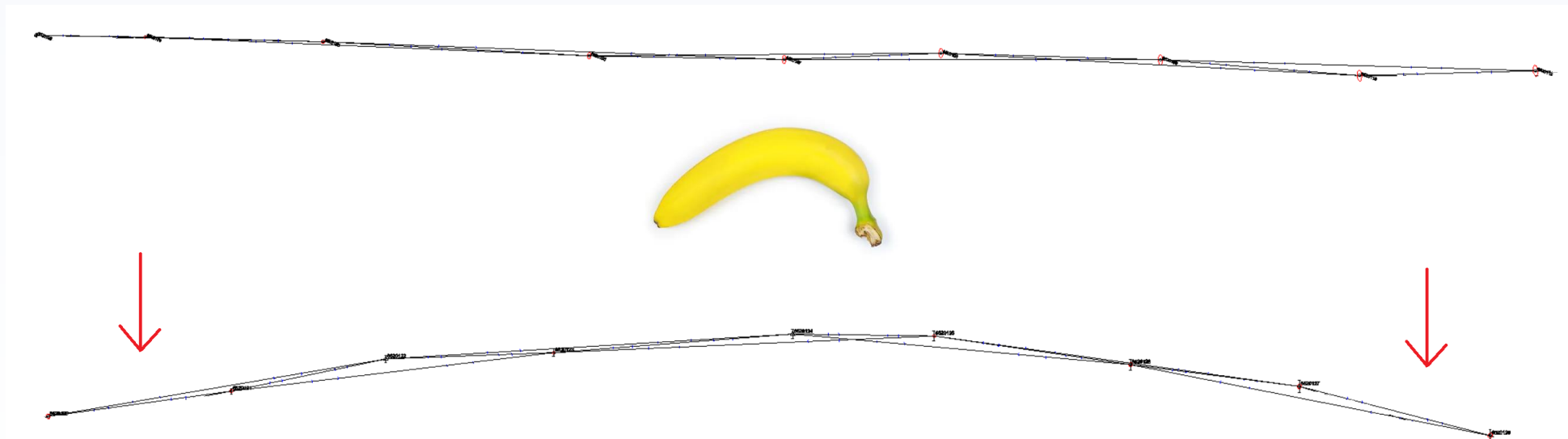
Jämförelsevis hög kontrollerbarhet för enskilda mätningar innebär därför låg kontrollerbarhet i andra delar av nätet.

Man ska därför sträva efter att få så lite spridning på de individuella k-talen som möjligt för att undvika dålig kontrollerbarhet i delar av nätet, och få en jämn kvalitet på detta.

Enkelt sätt att bedöma sigmanivåer (standardiserade förbättringar)!



Problem med det beskrivna transformationstestet



...men för smala nät böjs det fria nätet av minsta mätfel (även godkända fel) då varken kända punkter eller mätningar tvärs nätet stagar upp det.

Skalfel och stora passfel uppstår mot kända punkter – **bananeffekten!**

Test av skala och kända koordinater blir då opålitliga.

Gammalt men effektivt alternativt sätt att söka skalfel

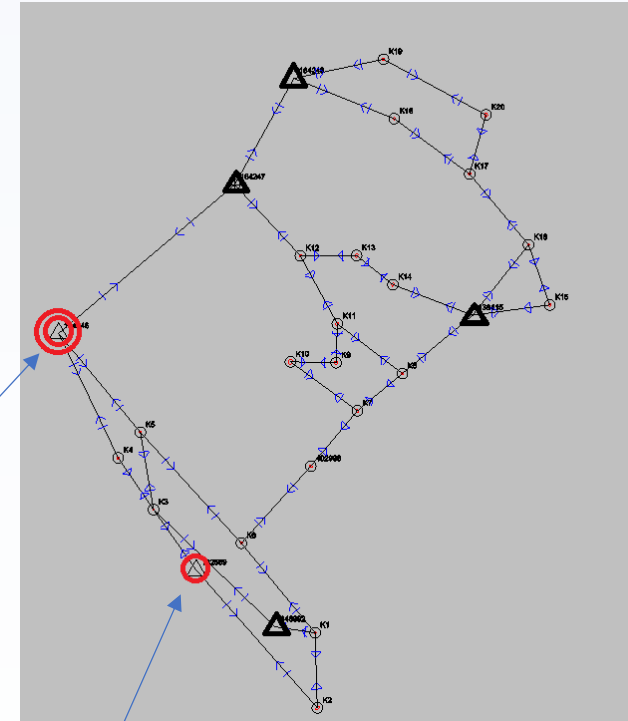
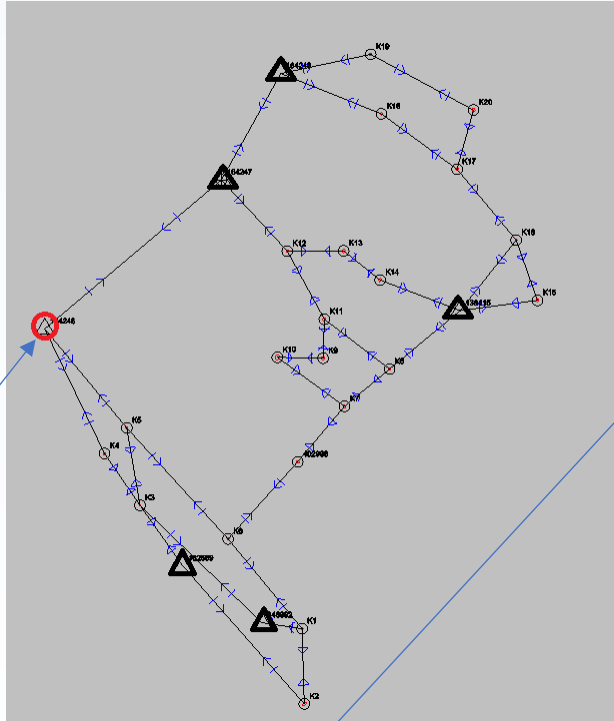
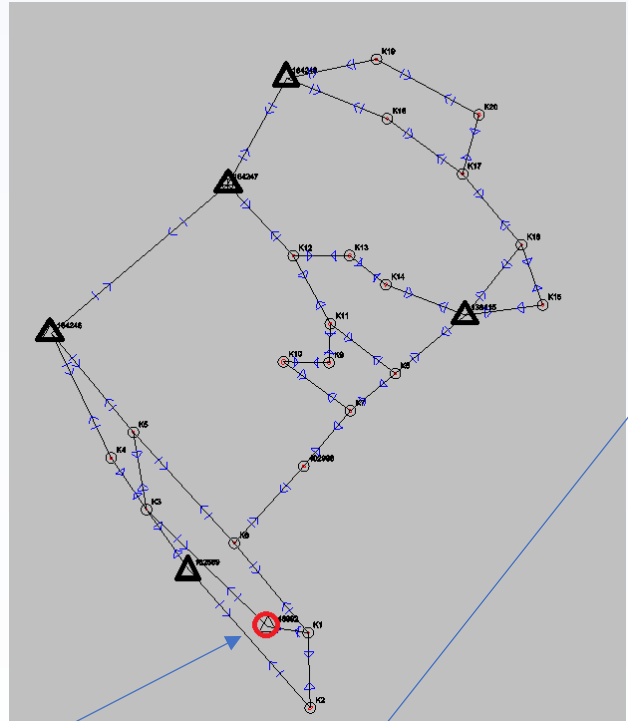
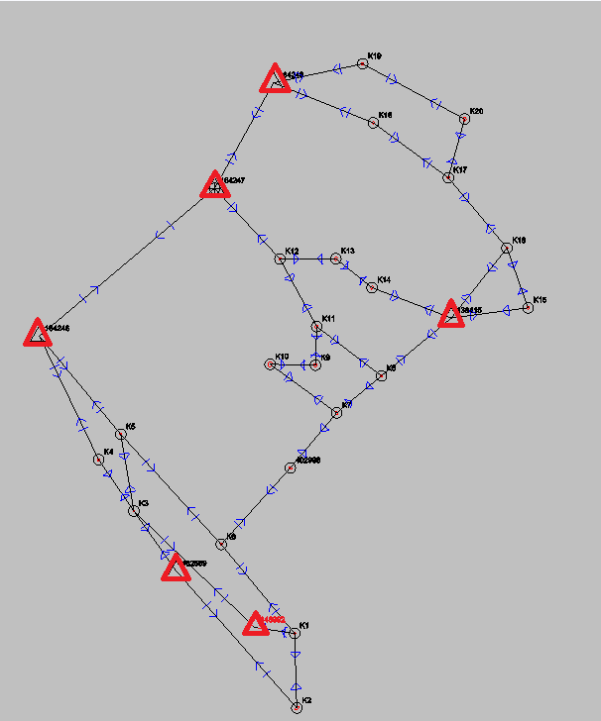
- Inkludera skalfaktorn som **en enda obekant** i samma utjämningsberäkning som tar fram nypunkternas koordinater. Inga överbestämningar slösas då bort på att beräkna ovidkommande värden som förflyttning och rotation.
- Då varken fri utjämning eller transformation behöver användas så uppstår inte bananeffekten alls.

```
Nätutjämningsresultat
-----

Summering

K-tal, plan                                0,66
Antal överbestämningar, plan               686
Viktenhetens standardosäkerhet, plan      0,47440
Godkänthetsgräns från HMK, plan          1,03340
Skalfaktor, plan                            1,000001
Skalfaktorns standardosäkerhet             0,000001
Testkvot                                    2,4040
Gränsvärde (t-test)                        1,9630
```

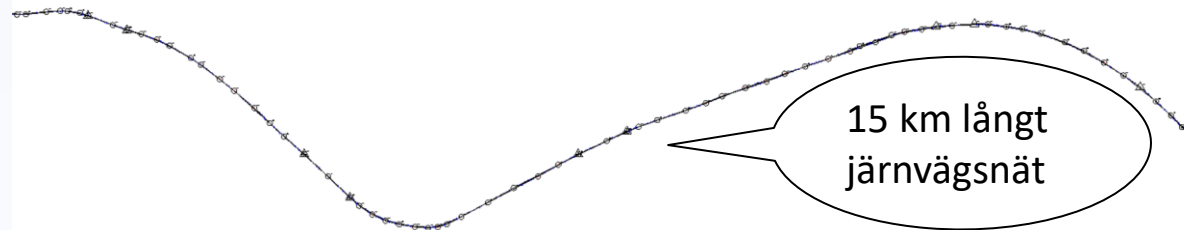
Fast utjämning med frikoppling



- Testet börjar med en fast utjämning där alla kända punkter är låsta.
- Den första kända punkten kopplas fri varpå en ny utjämning sker.
- Koordinaterna för den frikopplade punkten jämförs med de ursprungliga koordinaterna och förflyttningen beräknas.
- Punkten låses igen och nästa kända punkt kopplas fri och testas på samma sätt. Förflyttningen registreras för varje testad känd punkt.

- På samma sätt testas alla kända punkter.
- Den punkt som har största förflyttningen kopplas fri permanent under testet (men är oförändrat låst efter att testet är slut).
- Testet börjar sedan om från början för att hitta näst största förflyttningen, som också kopplas fri permanent i testet.
- Testet fortsätter tills ingen känd punkt rör sig mer än ett givet gränsvärde.

Test av koordinatfel i ett långsträckt nät



Punkt Id	dN (passfel)	dE (passfel)	dR (passfel)
GP39602	-0,0231	0,1520	0,1537
GP39607	0,0227	0,2246	0,2258
6350140	-0,0031	0,1910	0,1911
1039604	0,0076	0,2005	0,2006
1039603	0,0077	0,1996	0,1998
1039601	0,0204	0,1659	0,1671
6350145	0,0332	0,1582	0,1617
GP02501	0,0775	0,0541	0,0945
GP02601	0,0632	0,0466	0,0785
GP02710	-0,0236	0,0099	0,0256
GP02805	-0,0490	0,0027	0,0490
6520067	-0,0765	-0,0267	0,0811
6520069	-0,0889	-0,0319	0,0944
6520082	-0,1391	-0,0739	0,1575
6520084	-0,1574	-0,0860	0,1793
6520100	-0,1605	-0,1059	0,1923

- Fritt nät inpassat på kända punkter med en *unitär transformation*. Stora passfel på grund av "bananeffekten" trots att nätet är bra...

- Fast utjämning med frikoppling*. Endast små passfel hittas, vilket stämmer med nätets goda kvalitet.

Punkt Id	dN (passfel)	dE (passfel)	dR (passfel)
GP39602	-0,0222	0,1516	0,1532
GP39607	0,0236	0,2242	0,2254
6350140	-0,0022	0,1906	0,1906
1039604	0,0085	0,2000	0,2002
1039603	0,0086	0,1992	0,1994
1039601	0,0213	0,1654	0,1668
6350145	0,0341	0,1578	0,1614
GP02501	0,0784	0,0537	0,0950
GP02601	0,0641	0,0462	0,0790
GP02710	-0,0227	0,0094	0,0246
GP02805	-0,0481	0,0022	0,0481
6520067	-0,0756	-0,0272	0,0804
6520069	-0,0880	-0,0323	0,0938
6520082	-0,2382	-0,0243	0,2395
6520084	-0,1565	-0,0864	0,1788
6520100	-0,1596	-0,1064	0,1918

- Ett fel i N på 10cm och i E på 5cm har sedan lagts till punkten 6520082, varpå testerna har upprepats. Transformationsmetoden ger helt fel passfel.

- Frikopplingsmetoden ger betydligt bättre träffsäkerhet, och hittar nästan exakt det tillagda felet!

Gränsvärde t-test	dN (passfel)	dE (passfel)	dR (passfel)
GP39602	-0,0013	-0,0076	0,0077
GP39607	0,0050	0,0034	0,0060
6350140	0,0008	-0,0029	0,0031
1039604	0,0028	-0,0067	0,0072
1039603	-0,0047	0,0171	0,0178
1039601	0,0024	-0,0033	0,0041
6350145	-0,0030	-0,0032	0,0043
GP02501	-0,0267	0,0128	0,0297
GP02601	0,0054	-0,0096	0,0110
GP02710	-0,0037	-0,0059	0,0069
GP02805	-0,0029	0,0040	0,0049
6520067	0,0041	0,0016	0,0044
6520069	-0,0039	-0,0014	0,0041
6520082	0,0041	-0,0019	0,0045
6520084	-0,0028	0,0025	0,0038
6520100	0,0015	0,0018	0,0024

Gränsvärde t-test	dN (passfel)	dE (passfel)	dR (passfel)
GP39602	-0,0013	-0,0076	0,0077
GP39607	0,0050	0,0034	0,0060
6350140	0,0008	-0,0029	0,0031
1039604	0,0028	-0,0067	0,0072
1039603	-0,0047	0,0171	0,0178
1039601	0,0024	-0,0033	0,0041
6350145	-0,0030	-0,0032	0,0043
GP02501	-0,0268	0,0128	0,0297
GP02601	0,0054	-0,0096	0,0110
GP02710	-0,0033	-0,0057	0,0066
GP02805	-0,0034	0,0038	0,0050
6520067	-0,0166	-0,0082	0,0185
6520069	0,0357	0,0023	0,0358
6520082	-0,0959	0,0481	0,1073
6520084	0,0943	-0,0425	0,1034
6520100	0,0013	-0,0008	0,0015

Optimering - generellt

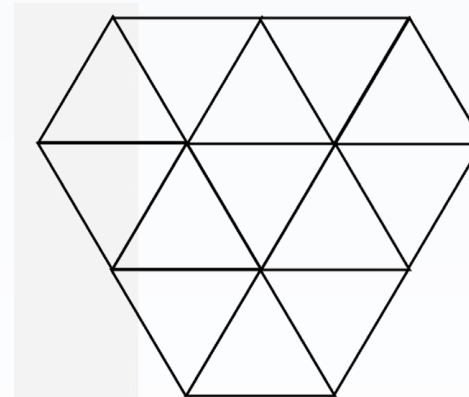
Ett bra nät kännetecknas av:

- Välformade figurer (idealiskt är liksidiga trianglar)
- Många slutna slingor, ungefär lika långa längder
- Observationer i flera riktningar
- Att nätet som helhet är runt eller rektangelformat
- Att nätet ramas in av kända punkter i alla hörn

Dålig geometri uppstår när:

- Punkter nästan ligger på en rät linje
- Vinklar blir mycket spetsiga eller mycket trubbiga
- Långa och korta längder varvas
- Nätet "hänger" som en kedja utan tvärförbindelser
- Nätet har smala midjor eller är spetsigt i ytterkanterna (kan delvis kompenseras med extra stagning från kända punkter)

"Berlinernät"
– idealisk
konfiguration!



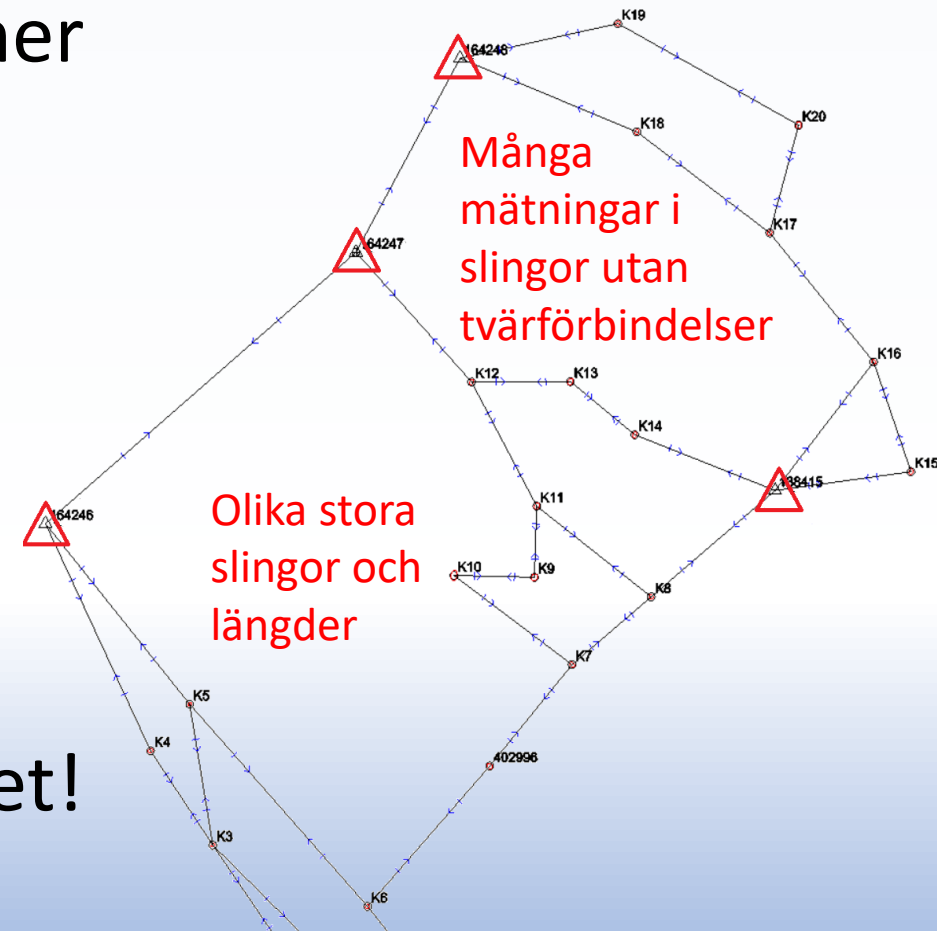
Optimering - dålig geometri

Konsekvenser av dålig geometri:

- Fel fortplantas långt genom nätet, som blir känsligt för enstaka felaktiga observationer (som blir svåra att upptäcka).
- Kontrollerbarheten (och därmed tillförlitligheten) blir ojämn för mätningarna i nätet.

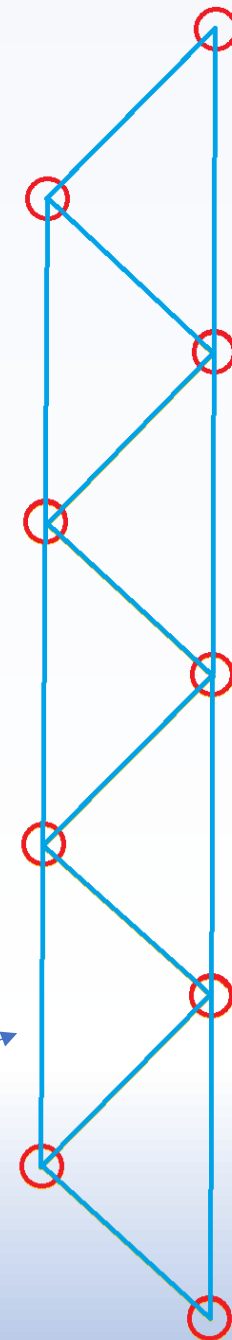
Resultat av detta:

- Vissa punkter får större osäkerhet än andra. Ojämn kvalitet på det slutliga nätet!



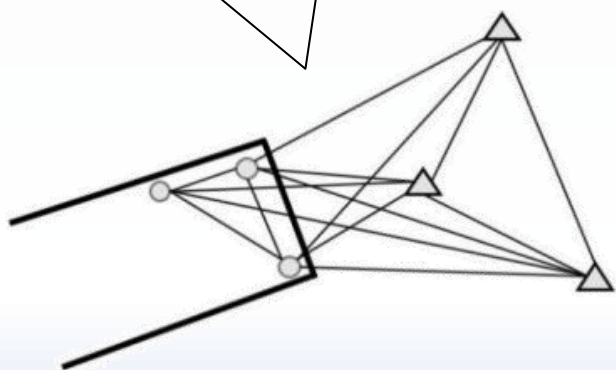
Optimering - principer

- Undvik vinklar som är <35 och >165 gon i trianglar.
- Sträva efter jämn spridning av riktningar kring varje punkt (observationer som “omsluter” punkten).
- Bygg inte bara nätet längs ett stråk, utan lägg in tvärförbindelser som skapar slingor.
- Undvik längder under 30 m om man behöver centrera över någon av punkterna (skapar osäkra riktningar). Blanda inte korta och långa längder då hävstångseffekter kan uppstå annars.
- Om nätet är långsmalt (t.ex. längs en väg eller järnväg): Lägg in regelbundna diagonaler som binder ihop sidorna. Fackverk!
- Se till att kända punkter finns i nätets alla hörn och även är jämnt utspridda, speciellt i delar där mätningarna har dålig konfiguration.

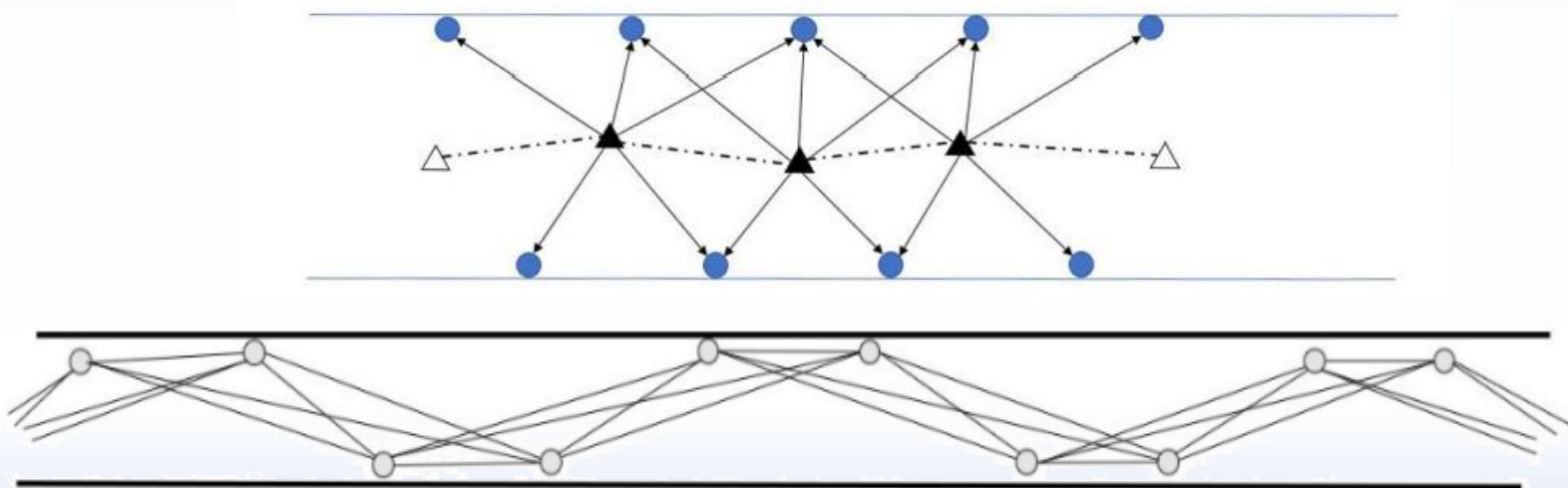


Optimering - tunnelnät

- Förankra tunnelnät med **flera kända punkter** med hög kvalitet (t.ex. från statisk GNSS) **utanför tunneln** för att minimera risken att nätet roteras inne i tunneln.
- Använd gärna **längre avstånd mellan de kända punkterna** för att minska påverkan från centreringsfel på riktningar.
- Komplettera gärna med **gyromätningar** längre in i tunneln om det är möjligt för att staga nätets riktning.



- **Undvik** att mäta **längs tunnelväggar** så långt det är möjligt, då det finns risk att riktningar påverkas av **refraktion** mot tunnelväggen.
- **Parvis mätning** av punkter nära väggen (med främst diagonalmätningar) eller ett **tvångscentrerat** tåg med **fria stationer** i tunnels mitt minimerar väggens påverkan.



Källa för figurer: Lantmäteriet

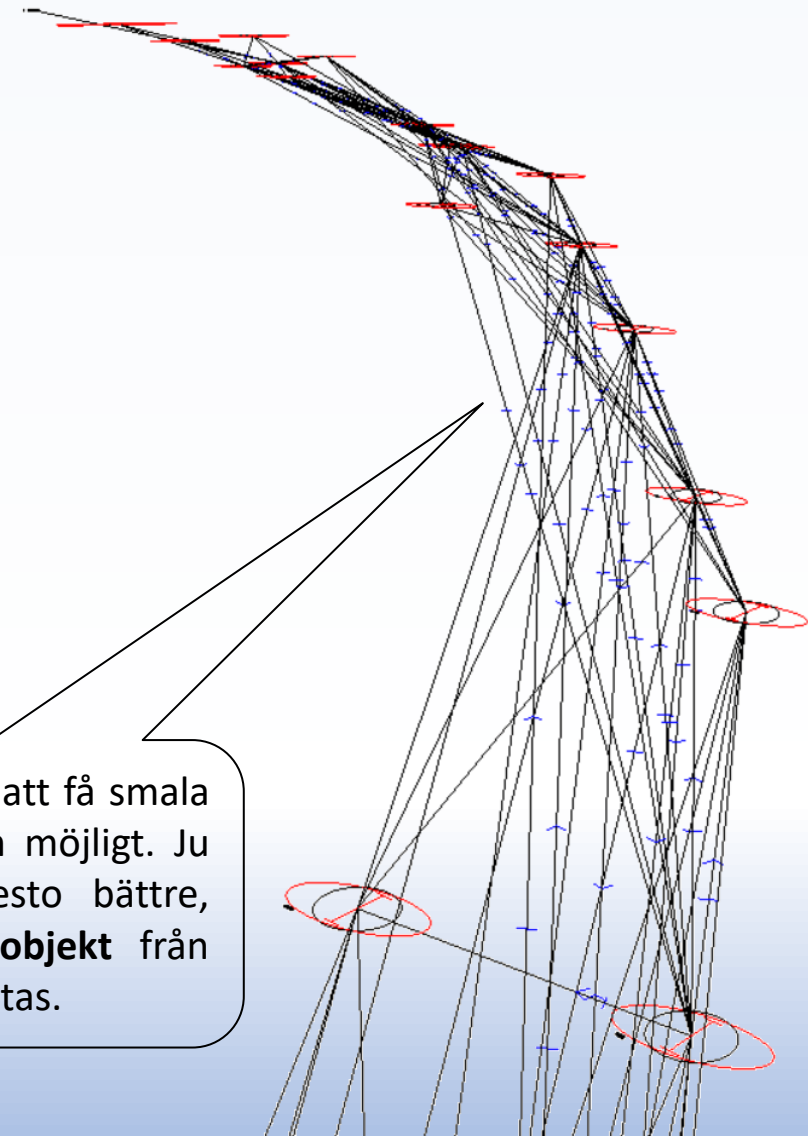
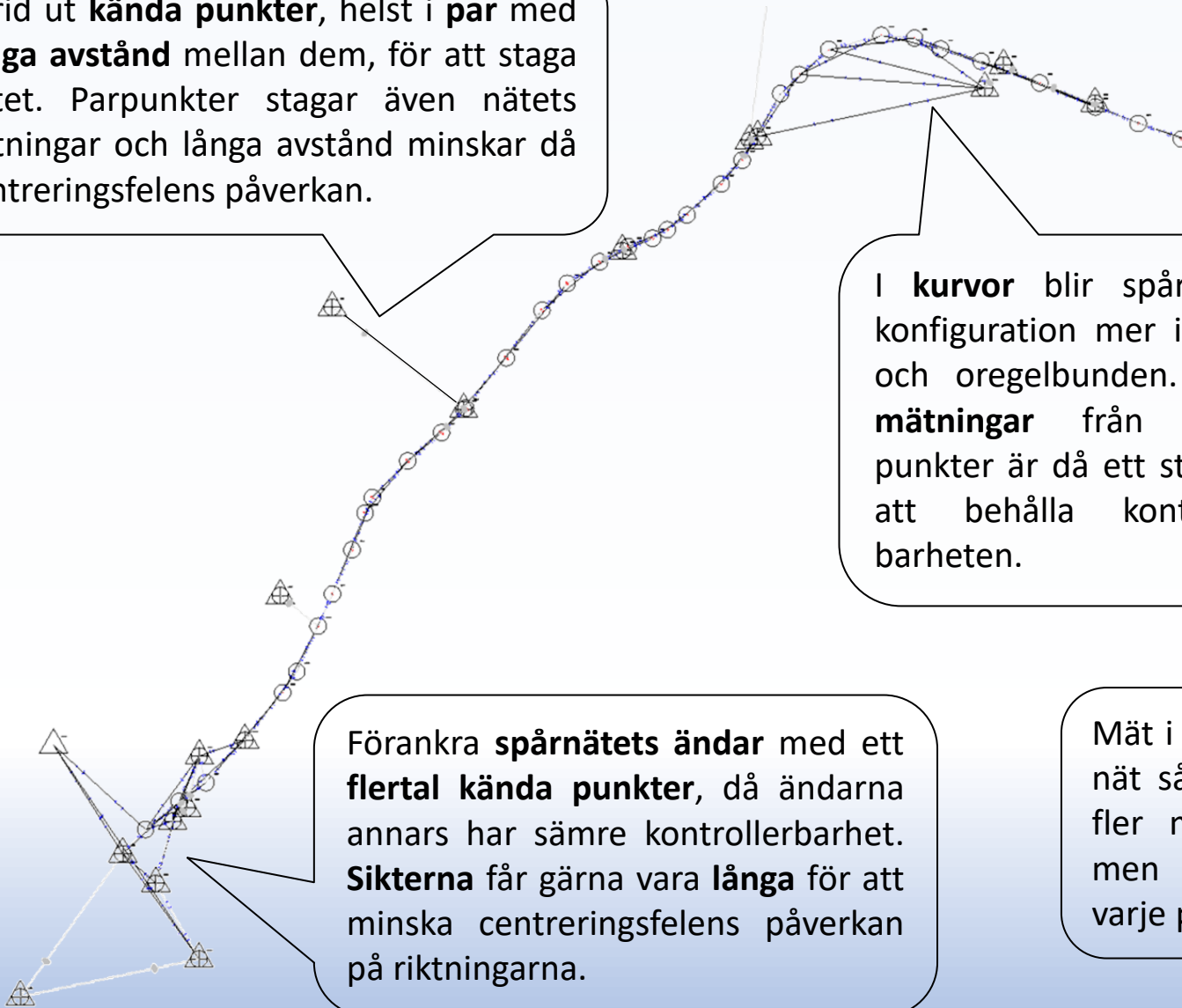
Optimering - spårnät

Sprid ut **kända punkter**, helst i **par** med **långa avstånd** mellan dem, för att staga nätet. Parpunkter stagar även nätets riktningar och långa avstånd minskar då centreringsfelens påverkan.

I **kurvor** blir spårnätets konfiguration mer instabil och oregelbunden. **Extra mätningar** från kända punkter är då ett stöd för att behålla kontrollerbarheten.

Förankra **spårnätets ändrar** med ett **flertal kända punkter**, då ändarna annars har sämre kontrollerbarhet. **Siktorna** får gärna vara **långa** för att minska centreringsfelens påverkan på riktningarna.

Mät i **fackverk** för att få smala nät så stabla som möjligt. Ju fler mätningar desto bättre, men **minst fyra objekt** från varje punkt bör mätas.



Balans mellan längd- och vinkelmätningar

I kombinerade nät (vinklar + längder):

- Vinklar styr formen.
- Längder styr skalan.

Om man bara optimerar för vinklar:

- Nätet kan få bra form men osäker skala.

Om man bara optimerar för längder:

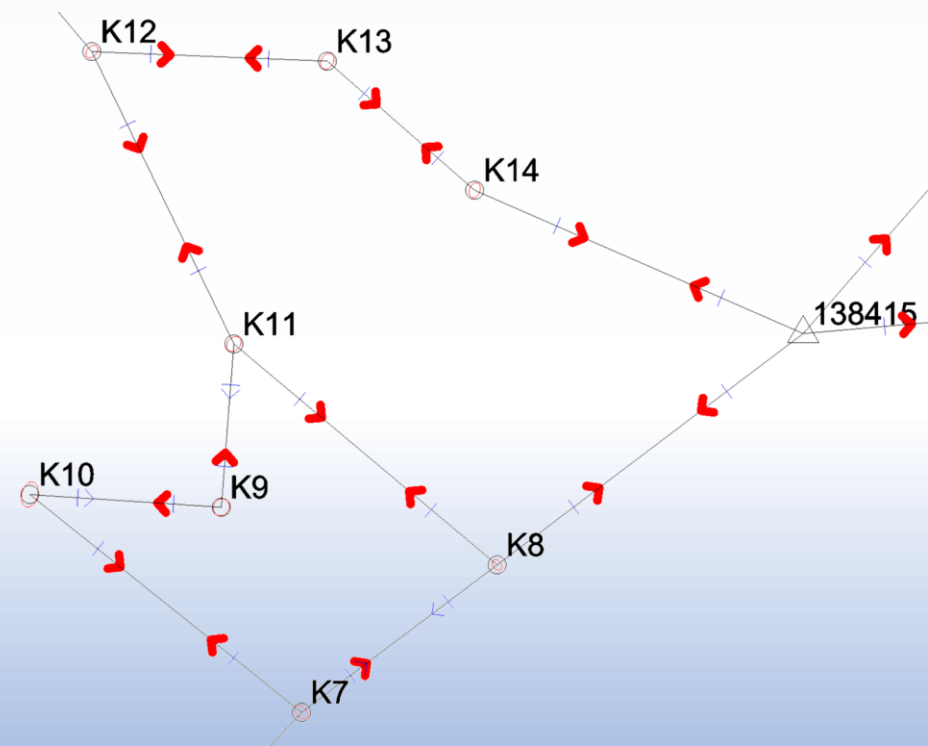
- Nätet kan få rätt skala men dålig form och riktning.

Optimering förbättras av:

- Längdmätningar på strategiska, gärna långa linjer som binder ihop nätets ytterdelar.
- Vinkelmätningar som ger god riktningspridning kring varje punkt.

Utmaningar

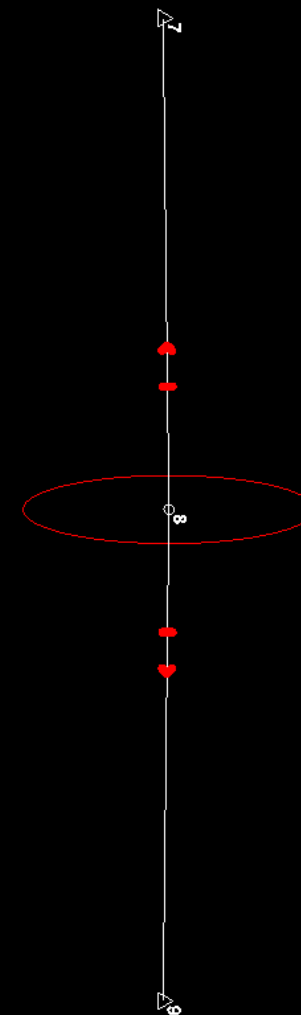
- **Fel punkt-ID:** Vanligaste "stora felet" vid stommätning.
- Dåligt justerade **optiska lod:** Det (oftast) mest signifikanta "lilla felet" i ett stornät.
- **Rimlighetskontroll:** Behöver vi verkligen ta bort eller mäta om för att få ett bra slutresultat? Framför allt riktningar på korta avstånd kan klassas som fel men kan ofta innebära en väldigt liten påverkan på punkterna.
- **Flermätta längder,** hur hanterar vi dessa? Är de dubbelmätta kommer de alltid att få godkända k-tal, oavsett hur nätet ser ut. Oklar tolkning!



Hur fixar vi fri station på rätlinje?

Undvik detta i möjligaste mån, men om det är den enda möjligheten (t.ex. längs väg genom tät skog), gör så här:

- Kontrollera extra noga att de **kända punkterna verkar korrekta** och att **centreringen är felfri** (då mätningarna kan dölja fel hos dessa).
- Genomför en **fri station** med minst en, gärna två, **helsatser**. Detta kontrollerar riktningsmätningarna och eliminerar kollimations- och kippaxelfel. Bekräfta att alla mätningar är godkända.
- **Beräkna och lås** den fria stationen (som nu blir en känd punkt utan påverkan från instrumentets centreringsfel).
- Genomför **polär stationsetablering** utan helsatser på känd punkt (den fria stationen) mot två bakobjekt (de kända punkterna). Detta minimerar påverkan från kollimationsfel hos instrumentet på detaljmätningarna (så länge detaljpunkterna är någorlunda på samma höjd).



Tack för mig!



td@kartotek.se