

# Design af moniteringsnetværk

Et eksempel med 'Lillebæltsbroen anno 1935'

---



GROUP 10  
SEMESTER PROJECT  
SURVEYING, PLANNING AND LAND MANAGEMENT  
AALBORG UNIVERSITY





**AALBORG UNIVERSITY**  
STUDENT REPORT

**Surveying, Planning and  
Land Management**  
Aalborg University  
Rendsburggade 14  
9000 Aalborg

**Title:**

Design af monitoringsnetværk  
- en case med Lillebæltsbroen anno 1935

**Project:**

Kandidatspeciale

**Project period:**

1. februar 2024 - 7. juni 2024

**Project group:**

Group 10

**Participants:**

Kathrine Rix Sørensen

**Supervisors:**

Jens-Peter Cederholm

**Page number: 98**

**Appendixes: 10**

**Afsluttes 7. juni 2024**

*The content of the report is freely available, but publication (with source reference) may only take place in agreement with the authors.*



# Summery

---

Currently, two parallel monitoring systems are implemented on 'Lillebæltsbroen': permanent monitoring and 'Manual measurement'. This project involves designing, establishing, and evaluating a unified monitoring network to meet the requirements of both existing monitoring systems. The problem is addressed through the following research question: How can a monitoring network for 'Lillebæltsbroen' be designed to meet the requirements of both 'Manual measurement' and the existing permanent monitoring?

To create an unified guideline for the design of a new monitoringnetwork for Lillebæltsbroen, the requirements of the current permanent monitoring and 'manual measurement' is combined to a unified requirements specifications. These requirements specifications serve as guidelines throughout the project to ensure that the requirements for both measurement types are met.

Establishing a monitoring network is time-consuming and costly, making it advantageous to estimate the expected quality before implementation. For this pourpose network esitnation is used to analyze the the following parameters influence on the network quality:

- Placement of reference points
- Number of reference points
- Locations and number of totalstations
- Number of sets
- Instrument precision

These parameters are analyzed and compared based on theoretically grounded evaluation criteria, where quality is defined as accuracy and reliability, with reliability covering both internal and external reliability. Based on this analysis, an 'optimal network' is recommended. The 'optimal network' is a network that, from a theoretical standpoint, meet the specification requirements, and this in a cost-effective way.

However, theory and practice can differ, so a network is established on Lillebæltsbroen to verify if the requirements specifications are met in practice. The established network is based on the 'optimal network' derived in the network-estimation-analysis, with minor adjustments for practical reasons. The established monitoringnetwork consists of:

- 2 setups, located on pier 1 and 4, utilizing the total stations from the existing permanent monitoring system.
- 4 reference points.
- 6 monitoringpoints, distributed with one point on each of the four piers and the two abutments.

Data were collected over 23 days at an hourly frequency. The adjustment of sample data indicates that the accuracy requirement cannot be met with a single measurement series. However, with adjustment over four measurement series, a point mean error of 1.53-1.57 mm and a height deviation of 1.18-1.22 mm are achieved. These adjustments indicate that the accuracy requirement can be met with adjustment over four measurement series. Thus, the

data processed in this project suggest that the established network can meet the requirements for both manual measurement and the existing permanent monitoring system.

# Preface

---

Dette projekt er udarbejdet af Kathrine Rix Sørensen som speciale til kandidatuddannelsen Surveying, Planning and Land Management ved Aalborg Universitet. Projektet er udarbejdet i perioden 1/2 2024 til 7/6 2024.

Der rettes en tak til Peter Cedeholm for vejledning i projektforløbet. Derudover rettes der en særligt tak til følgende eksterne:

- Jakob Larsen og LIFA for lån af udstyr og sparing i forbindelse med etablering af netværket.
- Banedanmark for adgang til Lillebæltsbroen samt Sved Erik Gammelgaard for at detage i interview.
- Jens Juhl for licens og vejledning til udjævningsprogrammet GeoAdjust.
- Leica for prøvelicens til Geomos samt besvarelse af opklarende spørgsmål vedrørende instrumenternes nøjagtighed.

## Læsevejledning

I rapporten benævnes 'Lillebæltsbroen anno 1935' som 'Lillebæltsbroen'.

Projektet bygger videre på 9.semesters projektet Sørensen [2024]. Viden fra dette projekt er gengivet i kapitel 3 'Nuværende monitoring på Lillebæltsbroen', som med fordel kan læses før metode afsnittet.

I flere af rapportens kapitler nævnes punktnumre gentagende gange hvor placeringen af disse punkter er relevant for forståelsen. Derfor anbefales at printe følgende skitser fra Appendix og og have disse liggende fremme sideløbende med læsningen af rapporten:

- Kapitel 5 'Eksperimentdesign', kapitel 6 'Testnet' og kapitel 7 'Etablering af nettet': appendix B.1
- Kapitel 8 'Beregning og vurdering af data: appendix B.2

Gennem rapporten refereres der til appendix, som findes på side 105 og fremefter. Derudover henvises i forbindelse med inputfiler, dokumentationsfiler og. lign til en sti i zipfilen, der er vedhæftede som eksternt bilag. Appendix A indeholder en oversigt over indholdet i zipfilen.



# Contents

---

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Summery</b>                                                      | <b>v</b>  |
| <b>1 Introduktion</b>                                               | <b>1</b>  |
| <b>2 Metode</b>                                                     | <b>3</b>  |
| 2.1 Tilgang . . . . .                                               | 3         |
| 2.2 Struktur . . . . .                                              | 3         |
| 2.2.1 Nuværende monitoring på Lillebæltsbroen - kapitel 3 . . . . . | 4         |
| 2.2.2 Netværksdesign - afsnit 4 . . . . .                           | 5         |
| 2.2.3 Eksperimentdesign - kapitel 5 . . . . .                       | 5         |
| 2.2.4 Testnet - Kapitel 6 . . . . .                                 | 6         |
| 2.2.5 Etablering af netværket- kapitel 7 . . . . .                  | 6         |
| 2.2.6 Beregning og vurdering af data - kapitel 8 . . . . .          | 6         |
| 2.2.7 Konklusion - kapitel 9 . . . . .                              | 6         |
| 2.2.8 Perspektivering 10 . . . . .                                  | 7         |
| <b>3 Nuværende monitoring på Lillebæltsbroen</b>                    | <b>9</b>  |
| 3.1 Lillebæltsbroen konstruktion . . . . .                          | 9         |
| 3.2 Permanent monitoring . . . . .                                  | 10        |
| 3.2.1 Formål . . . . .                                              | 10        |
| 3.2.2 Krav . . . . .                                                | 10        |
| 3.2.3 Udførsel . . . . .                                            | 11        |
| 3.3 Manuel måling . . . . .                                         | 13        |
| 3.3.1 Kravsspecifikation . . . . .                                  | 14        |
| 3.3.2 P*V . . . . .                                                 | 15        |
| 3.3.3 Interview . . . . .                                           | 16        |
| 3.4 Sammenligning . . . . .                                         | 18        |
| 3.5 Opsamling - en fælles kravsspecifikation . . . . .              | 19        |
| <b>4 Netværksdesign</b>                                             | <b>21</b> |
| 4.1 Introduktion til netværksdesign . . . . .                       | 21        |
| 4.1.1 Designprocessen . . . . .                                     | 22        |
| 4.2 Kvalitet i netværksdesign . . . . .                             | 22        |
| 4.2.1 Præcision . . . . .                                           | 23        |
| 4.2.2 Pålidelighed . . . . .                                        | 23        |
| 4.3 Påvirkning af kvalitet i netværksdesign . . . . .               | 24        |
| 4.3.1 A-matricen . . . . .                                          | 24        |
| 4.3.2 C-matricen . . . . .                                          | 25        |
| 4.4 Opsamling . . . . .                                             | 26        |
| <b>5 Eksperimentdesign</b>                                          | <b>27</b> |

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1      | Formål . . . . .                                                       | 27        |
| 5.2      | Bindinger . . . . .                                                    | 27        |
| 5.3      | Detailpunkter . . . . .                                                | 28        |
| 5.4      | Fixpunkter . . . . .                                                   | 29        |
| 5.5      | Standardopsætning til testnet . . . . .                                | 31        |
| 5.6      | Parametre der testes . . . . .                                         | 33        |
| 5.6.1    | A: Fixpunkter - placering . . . . .                                    | 34        |
| 5.6.2    | B: Fixpunkter - antal . . . . .                                        | 35        |
| 5.6.3    | C: Opstillinger . . . . .                                              | 36        |
| 5.6.4    | D: Præcision af udstyr og antal satser . . . . .                       | 38        |
| 5.7      | Vurderingskriterier . . . . .                                          | 39        |
| 5.7.1    | Punktmiddelfejlen . . . . .                                            | 40        |
| 5.7.2    | Kotespredning . . . . .                                                | 40        |
| 5.7.3    | Grove fejl . . . . .                                                   | 40        |
| 5.8      | Fremgangsmåde . . . . .                                                | 41        |
| 5.8.1    | Analysestrategi for de enkelte parameter . . . . .                     | 42        |
| 5.9      | Opsamling . . . . .                                                    | 44        |
| <b>6</b> | <b>Testnet</b>                                                         | <b>45</b> |
| 6.1      | Standardsetup . . . . .                                                | 45        |
| 6.2      | A: Fixpunkter - placering . . . . .                                    | 47        |
| 6.3      | B: Fixpunkter - antal . . . . .                                        | 50        |
| 6.4      | C: Opstillinger . . . . .                                              | 52        |
| 6.5      | 1. ordens design . . . . .                                             | 53        |
| 6.6      | D: Kombinationer af instrumenter og antal satser . . . . .             | 55        |
| 6.7      | Anbefalet netværk - 2. ordens design . . . . .                         | 57        |
| 6.8      | Opsamling . . . . .                                                    | 61        |
| <b>7</b> | <b>Etablering af nettet</b>                                            | <b>63</b> |
| 7.1      | Praktiske overvejelser og undersøgelser forud for etablering . . . . . | 63        |
| 7.1.1    | Opstillinger . . . . .                                                 | 64        |
| 7.1.2    | Fixpunkter . . . . .                                                   | 65        |
| 7.2      | Testnet for netværket der forventes at etableres . . . . .             | 65        |
| 7.3      | Indmåling af nye fixpunkter . . . . .                                  | 67        |
| 7.3.1    | Etablering af fixpunkter . . . . .                                     | 67        |
| 7.3.2    | Indmåling af nye fixpunkter . . . . .                                  | 68        |
| 7.3.3    | Beregning . . . . .                                                    | 69        |
| 7.3.4    | Sammenligning med testnet . . . . .                                    | 70        |
| 7.4      | Etablering af totalstationer og detailpunkter . . . . .                | 70        |
| 7.5      | Opsætning i Geomos . . . . .                                           | 72        |
| 7.6      | Opsamling . . . . .                                                    | 73        |
| <b>8</b> | <b>Beregning og vurdering af data</b>                                  | <b>75</b> |
| 8.1      | Generelt om målingerne . . . . .                                       | 75        |
| 8.1.1    | Koordinater til detailpunkter fra Geomos . . . . .                     | 76        |
| 8.1.2    | Fixpunkter fra Geomos . . . . .                                        | 78        |
| 8.1.3    | Tendenser . . . . .                                                    | 79        |

|           |                                                                      |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.1.4     | Giver Geomos de samme resultater som udjævning? . . . . .            | 80         |
| 8.2       | Sammenligning med testnet . . . . .                                  | 82         |
| 8.2.1     | Stativdrejning . . . . .                                             | 83         |
| 8.2.2     | Refraktion . . . . .                                                 | 84         |
| 8.3       | Er kravsspecifikationen overholdt? . . . . .                         | 86         |
| 8.3.1     | Krav 3 - måling af detailpunkterne minimum en gang i timen . . . . . | 86         |
| 8.3.2     | Krav 6 - detailpunkternes nøjagtighed . . . . .                      | 88         |
| 8.4       | Opsamling . . . . .                                                  | 89         |
| <b>9</b>  | <b>Konklusion</b>                                                    | <b>93</b>  |
| <b>10</b> | <b>Perspektiver</b>                                                  | <b>97</b>  |
| 10.1      | Eksemplaritet . . . . .                                              | 97         |
| 10.2      | Kommentarer på Banedanmarks krav . . . . .                           | 97         |
| 10.3      | Tilføjelse til kravsspecifikationen . . . . .                        | 98         |
| 10.4      | Forbedringsforslag til netværket . . . . .                           | 98         |
|           | <b>Bibliography</b>                                                  | <b>99</b>  |
| <b>I</b>  | <b>Appendiks</b>                                                     | <b>103</b> |
| <b>A</b>  | <b>Overblik over indhold i zipfilen</b>                              | <b>105</b> |
| <b>B</b>  | <b>Oversigts kort til rapportens kapitler</b>                        | <b>107</b> |
| <b>C</b>  | <b>Samtale med BD</b>                                                | <b>109</b> |
| <b>D</b>  | <b>Mail korespondance med Lecia vedr. centeringsspredning</b>        | <b>113</b> |
| <b>E</b>  | <b>Fixpunktsspredning</b>                                            | <b>119</b> |
| <b>F</b>  | <b>Koordinater til testnet</b>                                       | <b>121</b> |
| <b>G</b>  | <b>Analyse af værdier i testnet</b>                                  | <b>123</b> |
| <b>H</b>  | <b>Etablering</b>                                                    | <b>147</b> |
| <b>I</b>  | <b>Opsætning af Geomos</b>                                           | <b>153</b> |
| <b>J</b>  | <b>Analyse af sigma 0</b>                                            | <b>157</b> |



Større infrastruktur konstruktioner udsættes gennem deres levetid for en lang række påvirkninger; herunder vind, trafik, materialets udvidelse og sammentrækning som følge af temperaturændringer samt i nogle områder jordskælv. For at modstå disse påvirkninger designs konstruktioner til at være fleksible. I løbet af konstruktionernes levetid slides og nedbrydes de løbende, hvilket kan medføre en betydelig sikkerhedsrisiko. Men hvornår er bevægelser i en brokonstruktion forventede som følge af broens fleksibilitet, og er det en indikation på skader i konstruktionen? Til at besvare dette anvendes monitoring, som er at implementere en strategi til identifikation af skader i konstruktionen. Gennem monitoring indsamles data vedrørende en konstruktion over en tidsperiode. Dette kan både være med henblik på overvågning af gradvise sætninger eller akut sætning. Ved sammenligning af ændringer i dataen, udledes ændringerne i konstruktionen. Monitoringsdataen anvendes derved som beslutningsgrundlag for en eventuel reaktion på bevægelser. Ved gradvise sætninger vil dette ofte være vedligehold, mens det ved akutte sætninger kan være at lukke broen for trafik. [Neves, 2020, s. 9-11]

Monitoring anvendes på Lillebæltsbroen, hvilket der på 9. semester fik indblik i gennem virksomhedsopholdet ved LIFA der udfører monitoringen for Banedanmark. Dette projekt udspringer af arbejdet med monitoring på Lillebæltsbroen på 9. semester, hvor det blev udledt, at der på Lillebæltsbroen sideløbende foretages to typer monitoring - permanent monitoring og manuel måling. Den permanente monitoring foretages kontinuert med permanent monteret udstyr på broen, hvorimod 'Manuel måling' er en målekampagne der gennemføres én gang om året. På 9. semester blev de to målinger undersøgt hver for sig og sammenlignet hvor ud fra det blev konkluderet, at der er dele af de to monitoringer der overlapper. Men at den permanente monitoring, i sin nuværende form, ikke kan erstatte 'Manuel måling'. I Sørensen [2024] udpeges følgende udfordringer i forhold til at opfylde kravene til 'Manuel måling' med det eksisterende permanente monitoringsnetværk:

- Sigtelinjer til detailpunkter: der er fra det eksisterende netværk ikke sigtelinjer til alle af detailpunkterne der indgår i 'Manuel måling'.
- Fixpunkter: I det eksisterende permanente monitoringsnetværk, er fixpunkterne placeret på landfæsterne. Landfæsterne indgår også i 'Manuel måling'. Placering af fixpunkter på konstruktionsdele der indgår i målingen, vurderes uhensigtsmæssigt ift netværkets stabilitet.
- Præcisionen af de plane koordinater: det eksisterende permanente monitoringnetværk er ikke designet til at måle plane koordinater. Måles plane koordinater med det eksisterende netværk forventes en punktmiddelfejl i omegnen af 13 mm. Dette skyldes bl.a. netværksgeometrien, hvor bredden af netværket udspændt af fixpunkterne er ca. 20 m.

[Sørensen, 2024, s. 75-81]

I Sørensen [2024] blev det udledt at 'Manuel måling' af Lillebæltsbroen er del af en standardisering af måleprocedure for flere af Banedanmarks's broer, mens den permanente monitorering er udarbejdet i en akut situation med henblik på at overvåge broen i forbindelse med forstærkning af pillernes fundament. Der ved er de to monitoringer ikke tideligere tænkt i sammenhæng med hinanden. Udførelsen af to parallelle monitoringer af samme bro forventes at medfører ekstra økonomiske omkostninger for Banedanmark, hvorved det må være en fordel hvis arbejdet kan reduceres ved at sammentænke de to målinger.

Dette projekt bygger videre på projektet fra 9.semester, ved at undersøge hvilke ændringer der skal til for at et permanent monitorings netværk, kan opfylde kraven til både 'Manuel måling' og den permanente monitorering. Dette leder frem til følgende problemformulering:

**Hvordan kan et monitoringsnetværk på Lillebæltsbroen designes, således kravene til både 'Manuel måling' og eksisterende permanente monitorering opfyldes?**

Målet med projektet er at opdatere det nuværende monitoringsnetværk således det, udover det eksisterende formål, også kan opfylde kravene for 'Manuel måling'.

# Metode 2

---

*Dette kapitel om projektmetode har til formål at forklare, hvilken viden der er nødvendig for at besvare problemformuleringen og samt hvordan denne viden opnås. Derudover beskrives der for hvert kapitel, hvad der undersøges, hvorfor det undersøges (relevans) og hvordan det undersøges.*

## 2.1 Tilgang

Projektet tager udgangspunkt i at besvare problemformulering: **Hvordan kan et monitoringsnetværk på Lillebæltsbroen designes, således kravene til både den nuværende permanente monitoring og 'Manuel måling' kan opfyldes?** Idet der på Lillebæltsbroen i forvejen er et eksisterende permanent monitoringsnetværk, er tilgangen at undersøge hvilke ændringer der skal foretages i det eksisterende. For at kunne besvare problemformuleringen indsamles følgende viden:

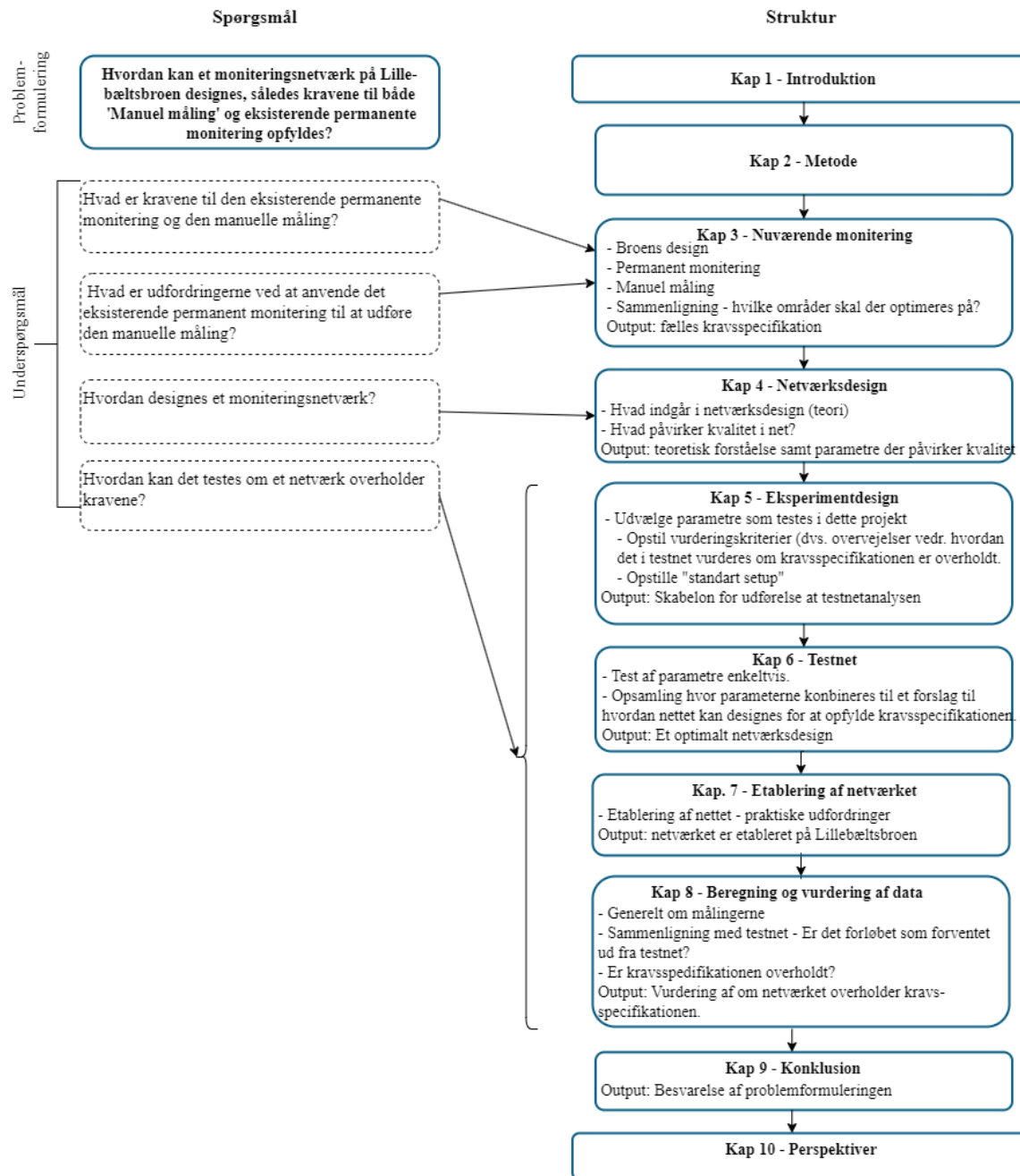
1. Hvad er kravene til den eksisterende permanente monitoring og 'Manuel måling'?
2. Hvad er udfordringerne ved at anvende det eksisterende permanent monitoring til at udføre 'Manuel måling'?
3. Hvordan designes et monitoringsnetværk?
4. Hvordan kan det testes om et netværk overholder kravene?

Arbejdsspørgsmål 1 og 2 omhandler de to eksisterende monitoringer på Lillebæltsbroen, derfor indsamles viden om kravene til hver af de to monitoringer, samt udfordringer, således der er et udgangspunkt for hvilke ændringer der skal foretages. Arbejdsspørgsmål 3 sikrer et teoretisk grundlag/forståelse for netværksdesign, således der er en grundlæggende forståelse forud for design af det konkrete netværk til Lillebæltsbroen.

Arbejdsspørgsmål 4 omhandler hvordan det kan be- eller afkræftes om kravene til de to opmålinger opfyldt. I projektet er det valgt at teste monitoringsnetværket på Lillebæltsbroen i to trin, en teoretisk test (testnet) og en praktisk test. Etablering af monitoringsnetværk er tidskrævende og økonomisk omkostningsfuldt, derfor er det fordelagtigt at kunne analysere den forventede kvalitet inden netværket etableres.

## 2.2 Struktur

I sidste afsnit blev de overordnede retningslinjer for hvilken viden der skal opnås gennem projektet. Dette er udgangspunktet for i dette afsnit at fastlægge hvordan opgaven struktureres for at behandle underspørgsmålene hensigtsmæssigt. Relationen mellem underspørgsmålene og kapitlerne er vist med pilene på strukturdiagrammet på figur 2.1. Formålet og tilgangen til de enkelte kapitler uddybes herunder.



**Figure 2.1.** Illustration af struktur for besvarelse af underspørgsmålene i projektrapporten.

### 2.2.1 Nuværende monitoring på Lillebæltsbroen - kapitel 3

Dette kapitel har til formål skabe et indblik i det eksisterende monitoring på broen, særlig de krav der er til hver af de to monitoringer. Kapitlet tager udgangspunkt i opsummering af viden fra projektet på 9. semester. Kapitlet består af fire dele. Første del er en kort beskrivelse af broen konstruktion, hvilket er relevant da udformningen af et monitoringsnetværk afhænger af den konkrete bro. I hhv anden og tredje del tilegnes et indblik i formål og krav til den eksisterende permanente monitoring og manuelle måling. Dette er grundlaget for, i fjerde del at opstille en fælles kravsspecifikation ved at kombinere kravene fra de to målinger. Denne fælles kravsspecifikation vil fremadrettede i projektet fungere som rettesnor for hvad designet

af et nyt monitoringsnetværk skal opnå.

Viden til dette kapitel er primært en opsummering af arbejdet med den permanente monitoring og 'Manuel måling' på Lillebæltsbroen fra 9. semester. For mere dybdegående viden vedrørende de to monitoringsteknikker henvises til projektet fra 9. semester [Sørensen, 2024]. Der udover suppleres der med ny viden vedrørende kravene til 'Manuel måling', opnået gennem interview med broingeniør Svend Erik Gammelgaard fra Banedanmark.

### 2.2.2 Netværksdesign - afsnit 4

Ved planlægning af et nyt netværk eller optimering af eksisterende netværk kan teori vedrørende netværksdesign anvendes. Netværksdesign er planlægning af et netværk hvori den forventede kvalitet af de fremtidige målinger estimeres. Dette gør det muligt at eksperimentere med variabler for at opfylde nøjagtighedskravene. Formålet med dette kapitel er at bidrage et teoretisk afset for at kunne optimere netværket. Kapitlet indledes derfor med bred litteraturanalyse af de grundlæggende principper indenfor det teoretiske felt netværksdesign.

Fra tidligere undervisning vides at et netværk påvirkes af flere parametre, og at det dermed er disse parametre der kan justeres på for at optimere netværket. Derfor er der i dette kapitel fokus på hvilke parametre der påvirker et monitoringsnetværk, og hvilken indflydelse det enkelte parameter har på netværket. Monitoringsnetværk kan designes med forskelligt udstyr, men i dette projekt afgrænses der til anvendelse af totalstation. Denne valg skyldes at begge målinger på nuværende tidspunkt foretages med totalstationer og liggeledes er der i forvejen monteret totalstationer på broen, som på sigt kan indgå i netværket.

### 2.2.3 Eksperimentdesign - kapitel 5

Etablering af monitoringsnetværk er tidskrævende og økonomisk omkostningsfuldt, derfor er det fordelagtigt at kunne analysere den forventede kvalitet inden netværket etableres. Til dette formål anvendes testnet, der ud fra a posteriori kovariansmatricen for elementerne kan beregne kvalitetsmål, hvilket betyder at det kan beregnes før der er indsamlet observationer.

Formålet med dette kapitel er at opstille et eksperimentdesign for testnet, således der i slutningen af kapitlet er en klar fremgangsmåde for testnet-analysen. Målet med eksperimentet er at udlede hvordan der kan etableres et monitoringsnetværk på Lillebæltsbroen som forventes at kunne overholde kravsspecifikationen for 'Manuel måling'. Her er det valgt systematisk at teste hvilken indflydelse, parametrene der påvirker kvaliteten udpeget i kapitel 4, har på kvaliteten. Derved opnås viden på et mere generaliseret plan, hvilket giver en øget grad af overførbarehed. Det betyder, at den opnåede viden kan anvendes som retningslinjer for at vurdere det enkelte parameters indflydelse på kvaliteten ved etableringen af monitoringsnetværk på andre broer.

I kapitlet udarbejdes et 'standart setup' som er basis for de forskellige testnet, således der kun ændres på de parametre der analyseres. Der afgrænses til hvilke af parametrene udledt i kapitel 4 der fokuseres på, og baseret på et teoretisk fundament udvælges værdierne/konfigurationerne der testes senere hen. Derudover overvejes der, hvordan det i testnet vurderes om kravsspecifikationen er overholdt. Til dette udarbejdes vurderingskriterier der sikre at testnettene vurderes ensartede.

Efter indflydelsen af hver af parametrene er testet enkeltvis, kombineres parametrene med henblik på at udforme et netværksdesign der forventes at kunne overholde kravsspecifikation og kan etableres på Lillebæltsbroen.

#### **2.2.4 Testnet - Kapitel 6**

I dette kapitel udføres testnetten, og målet med kapitlet er at udlede et netværk der ud fra testnet analysen kan overholde kravsspecifikationen. Denne viden opnås gennem analyse og sammenligning af data indsamlet ved testnet-beregninger.

Kapitlet er struktureret med et afsnit til hvert parameter. Til hver parameter testes forskellige værdier/konfigurationer som defineret i kapitel 5. På baggrund her af, analyser indflydelsen af hvert enkelt parameter på kvaliteten af netværket. Med afsæt i indflydelsen af hver enkelt parameter, kombineres parametrene med henblik på at udforme et netværksdesign der forventes at kunne overholde kravsspecifikation og kan etableres på Lillebæltsbroen. I dette kapitel indsamles viden

#### **2.2.5 Etablering af netværket- kapitel 7**

Målet med dette kapitel er at have etableret et monitoringsnetværk på Lillebæltbroen. Dette er forudsætning for at kunne indsamle monitoringsdataen, der empiri til projektets analyse af den konkrete netværksskvalitet. Netværket etableres på baggrund af det i kapitel 6, anbefalede netværk, men under hensyntagen til praktiske forhold. Kapitlet indeholder en beskrivelse af den praktiske etablering samt overvejelser i forbindelse hermed. Derudover beregnes koordinater til nye fixpunkter, og nøjagtigheden af disse sammenlignes med det forventede, baserede på testnet.

#### **2.2.6 Beregning og vurdering af data - kapitel 8**

Målet med dette kapitel er at kunne konkludere om det etablerede netværk overholder kravsspecifikationen. Denne viden opnås gennem databehandling af den indsamlede monitoringsdata. Databehandling der indholder udjævning af observationer, er fortaget som stikprøver, da dette inkludere meget manuelt datahåndtering. Konklusioner vedrørende kvaliteten af udjævninger er derved udledt af et relativt lille datagrundlag. Dette betyder at konklusionerne er en eksemplificering fremfor generelle konklusioner.

Kapitlet indeholder tre dele; en general beskrivelse af den indsamlede data, med fokus op svingningerne i koordinaterne over tid, inden der dykkes ned i enkelte måleserier. I anden del sammenlignes udjævning af et udsnit af dataen med testnet, med henblik på at udlede i hvilken grad testnet er repræsentativ for observationerne indsamlede ved det etablerede netværk. Afslutningsvis vurdere det om kravsspecifikationen er overholdt, ved at gennemgå punkterne i kravsspecifikationen opstillet i afsnit 3.

#### **2.2.7 Konklusion - kapitel 9**

I dette kapitel konkluderes der på problemformuleringen. Dette sker på baggrund af viden fra projektets tildeligere analyser

### 2.2.8 Perspektivering 10

I perspektiveringen bredes emnet mere ud, og der perspektivers til hvordan den opnået viden kan anvendes i en bredere kontekst. Derudover kommenteres der på rammerne for monitoringsnetværket, hvilket i dette tilfælde er kraven fra 'Manuel måling' og der fremsættes forbedringsforslag til både håndteringen af kravsspecifikationer til monitoringsopgaver samt designet af det konkrete netværk.



# Nuværende monitoring på Lillebæltsbroen

# 3

På nuværende tidspunkt fortages der, som beskrevet i indledningen, to sideløbende monitoringsystemer på Lillebæltsbroen problemformuleringen indeholder forbedring af det nuværende setup således netværket er kan opfylde kravene til både den permanente monitoring og 'Manuel måling'. Formålet med dette kapitel er derfor at fastlægge kravene til begge målinger, for derudfra at udarbejde en fælles kravspecifikation, som det nye netværk skal overholde. Til hver af de to målinger analyseres; formålet med målingen, hvilke krav opgaven er bundet af, samt hvordan målingen udføres på nuværende tidspunkt. Analysen af de den permanent monitoring og 'Manuel måling' er primært en opsummering af tidligere arbejde fra 9. semesterprojekt, så for en mere dybdegående analyse henvises til Sørensen [2024].

## 3.1 Lillebæltsbroen konstruktion

Monitoringsnetværk er designet til den specifikke situation, og derfor indledes med en grundlæggende forståelse for Lillebæltsbroens konstruktion. Lillebæltsbroen blev opført i 1925-1935 og forbinder Jylland med Fyn for bådebil- og togtrafik samt gående og cyklende. Broen er 1178 m lang, hvoraf 825 m er over Lillebælt. Broens grundlæggende konstruktion er skitseret på figur 3.1, heraf fremgår nummerringen af bropillerne der refereres til gennem rapporten. Fundament består af fire betonpiller og to landfæster, som strækker sig ca. 40 m under vandet og ca. 30 m over vandoverflade. Herpå ligger broens overdel, bestående af stålkonstruktionen. Broens ståloverdel er fastmonteret på pillerne på pilletoppen på pille 2 og 3, hvilket vises på figur 3.2. Derudover ligger broens ståloverdel på rullelejlere ved landfæste Fyn, pille 1, pille 4 og landfæste Jylland. Rullelejljerne er vist på figur 3.3, disse tillader stålkonstruktionen at bevæge sig i forhold til bropillerne. Dette er essentielt for at undgå tvangskræfter, da stål udvider sig ved temperaturændringer. [Sørensen, 2024, s. 45-46]

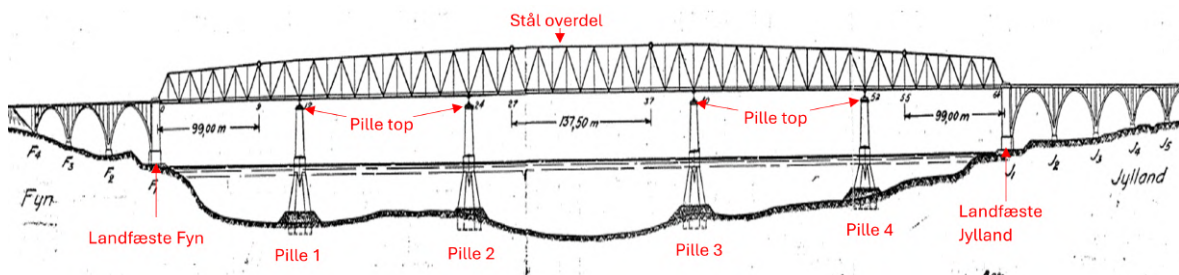
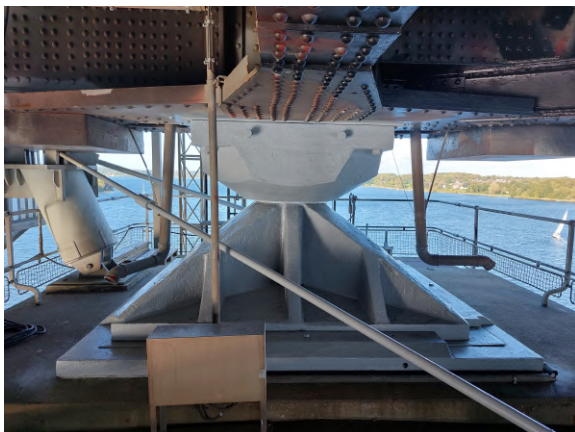


Figure 3.1. Oversigt over broens konstruktionen. Redigeret version af [Banedanmark, Ukendt år].



**Figure 3.2.** Fastmontering af broens overdel på pille 2 i den vestlige side  
[Eget billed materiale]



**Figure 3.3.** Rullelejlre på pille 4 i den vestlige side.  
[Eget billed materiale]

## 3.2 Permanent monitoring

### 3.2.1 Formål

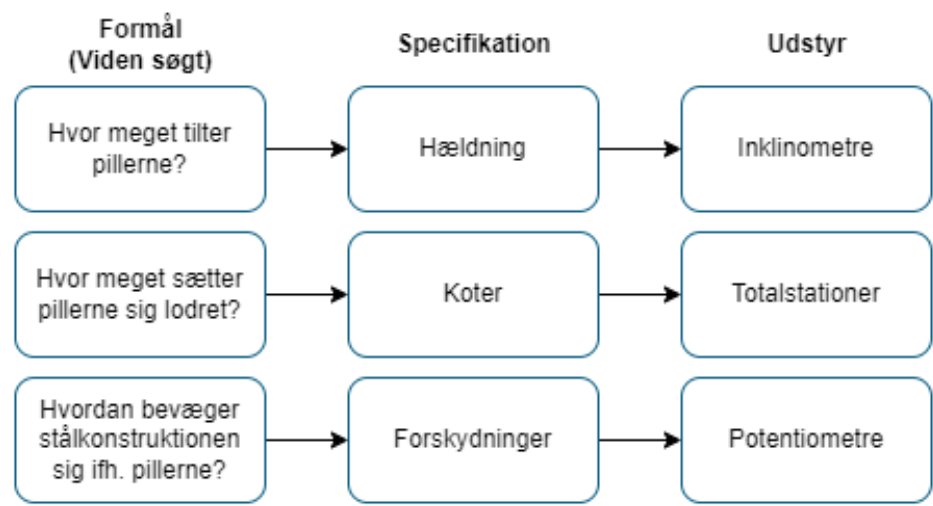
I forbindelse med forundersøgelserne til Femern-forbindelsen udføres geotekniske borer og ved Lillebæltsbroen, da undergrunden her, ligesom ved Femern-forbindelsen, består af plastisk ler. Formålet var at indsamle information om, hvordan konstruktioner opfører sig i plastisk ler.

Undersøgelserne ved Femern-forbindelsen afslørede, at Lillebæltsbroen risikerede at sætte sig mere end forventet på grund af plastisk lers egenskaber. På baggrund heraf nedsatte Banedanmark (BD) i 2012 en geoteknisk ekspertgruppe, som vurderede, at leret havde lavere styrke end først antaget. Ved lerets re-vurderede styrke afslørede beregningsmodellen, at der var risiko for brud. Broens fundament blev som konsekvens heraf, forstærket ved at kaste  $125.000 m^3$  sten og skærver omkring de fire bropiller. Under forstærkningen blev det vurderet at der var risiko for akutte sætninger, og på baggrund heraf ønskede BD monitoring af broen, således broen kunne lukkes for trafik. Til dette formål blev der i 2013 etableret et permanent monitoringssystem på Lillebæltsbroen. Ved etableringen var formålet været at kunne reagere på akutte bevægelser i forbindelse med forstærkning af pillernes fundament, mens formålet på nuværende tidspunkt er de langsigtede bevægelser. [Sørensen, 2024, s. 47-49]

### 3.2.2 Krav

I forbindelse med stenkastningen frygtede BD at pillerne kom til bevæge sig. En eventuel bevægelse forventes at ske ved at pillerne tilter eller sætter sig lodret, derfor monitoreres pillernes hældning og kote. Efterfølgende ønsker BD viden om ståloverdelsens bevægelse i forhold til pillerne, således der kunne foretages beregninger af hvorvidt broen bevæger sig som den er konstrueret til. Dette monitoreres ved forskydningerne mellem stålkonstruktionen og pillerne. [Sørensen, 2024, s. 47-49]

Det permanente monitoringssystem består derfor af 3 dele, der har hvert sit formål, dette er illustreret på figur 3.4. Kravene til den permanente monitoring er således at der indgår måling af kote og hældning på hver af de 4 piller samt forskydning mellem bropillerne og stål overdelen. Kravene vedrørende hyppigheden og nøjagtigheden fremgår af tabel 3.1.



**Figure 3.4.** Hovedelementer i den permanente monitoring på Lillebæltsbroen. Udarbejdet med inspiration fra [Sørensen, 2024, s. 48, figur 9.2].

| Funktionskrav                                       | Permanent monitoring                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hvad skal måles?                                    | Hældning, koter, forskydning                                                                                                                         |
| Hvor skal målingerne tages?                         | Kote: pillerne.<br>Hældning: pillerne.<br>Forskydning: rullelejerne mellem broens overdel og pillerne samt dilatationsfuger.                         |
| Hvilken nøjagtighed er nødvendig?                   | Hældning: ikke defineret<br>Koter: min. 2 mm<br>Forskydning: min. 0.1 mm                                                                             |
| Hvilken hyppighed?                                  | Hældning: hver 10 min. (Pt. 1 gang i timen)<br>Koter: 1 målerundering pr. 5 min (Pt 1 hver 2. time)<br>Forskydninger: hvert 10 min (Pt. hver 10 min) |
| Hvor lang tidsperiode strækker målingerne sig over? | Permanent fra 2014/15                                                                                                                                |

**Table 3.1.** Opsummering af funktionskravene for den permanente monitoring.  
Kilder: [COWI, 2013] (hældning), [Banedanmark, 2014a] (hældning), [Banedanmark, 2014b] (koter) og [LIFA, Ukendt] (forskydning). Redigeret version af [Sørensen, 2024, Appendix 8]

3.2.3 Udførsel

De tre dele af monitoringssystemet beskrives herunder. Ved alle monitoringens tre dele er relative målinger der er i centrum, hvilket betyder at der fokuseres på ændringen i hhv hældning, kote og forskydning sammenlignet med en baseline-værdi. Det bemærkes at monitoringssystemet, ved opførslen, var designet som kortvarig overvågning af akutte bevægelser, i forbindelse med broen fundament blev forstærket. Der vurderes ikke længere at være risiko for pludselige sætninger, og derved har systemet ændret karakter til monitoring af langvarige ændringer. Som følge heraf, er der foretaget ændringer i hyppigheden af målingerne.

Hældning

Ændringen i hældning af pillerne monitoreres med to inklinometre der er monteret indvendigt i hver af pillerne. Inklinometerne måler en ændring i hældningen, hvilket betyder, at det

er relative målinger. Alle inklinometerne er orienteret således koordinatsystemernes Y-akse følger broens længderetning med positive Y-værdier mod Jylland som vist på figur 3.5.

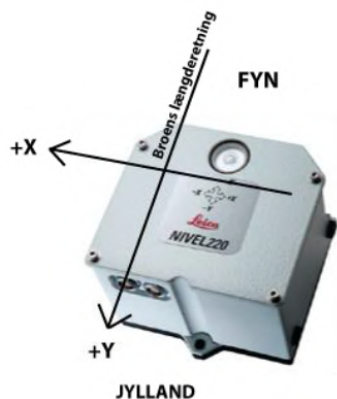


Figure 3.5. [LIFA, 2015, s. 12]

### Koter

Koterne på de fire piller måles med to totalstationer. Opstillingerne er vist på skitsen på figur 3.6, hvor de to opstillinger er vis med hhv røde og blå symboler. *Totalstationen på pille 1 (rød firkant) definerer sin placering i det lokale koordinatsystem ved at måle til 3 prismer fastmonteret på Landfæste Fyn (røde trekanten), der anvendes som referencepunkter. Koten til opstillingspunktet (pille 1) beregnes ud fra referencepunkter, og herefter måles til detailpunktet på pille 2 (rød cirkel)* [Sørensen, 2024,s. 52]. Koterne på pille 3 og 4 monitoreres efter samme princip, se de blå symboler på figur 3.6.

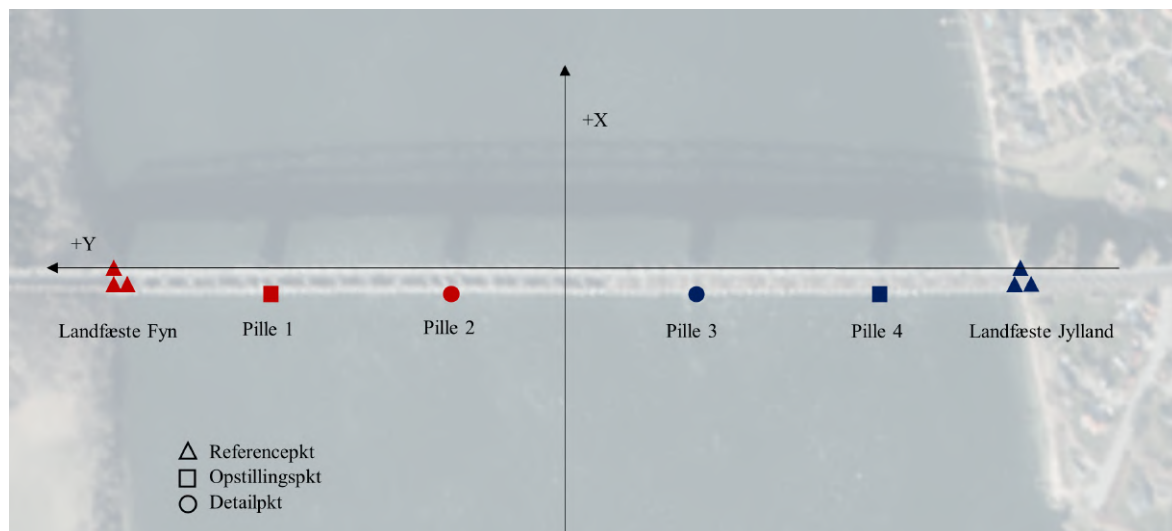
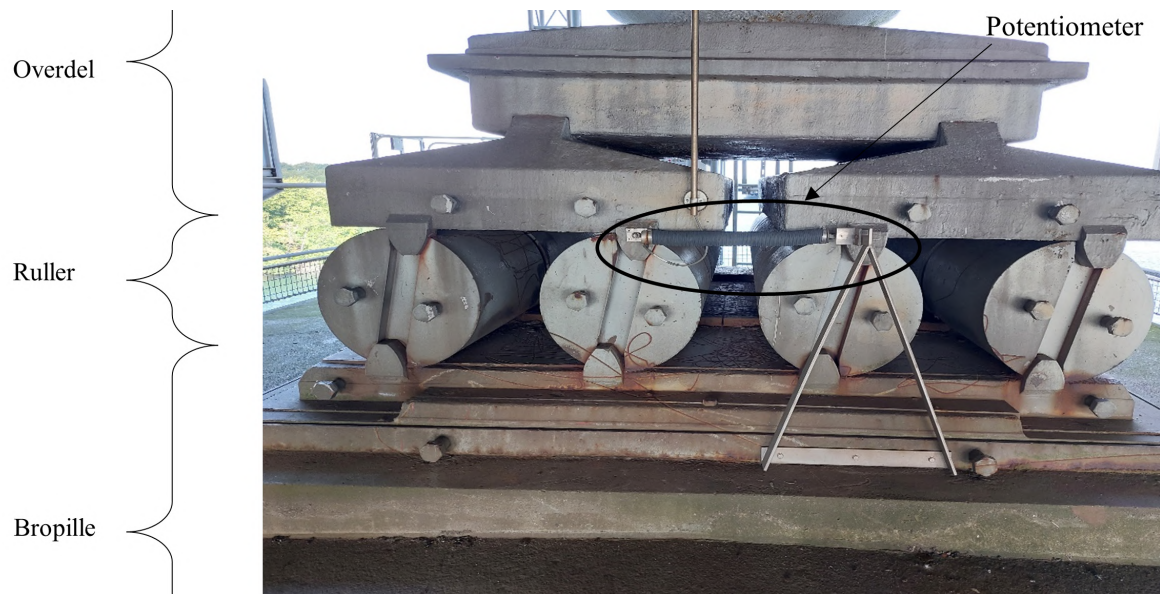


Figure 3.6. Skitse over de to totalstations opstillinger samt koordinatsystemets placering. Farven på punkterne viser de to opstillinger. [Sørensen, 2024,s. 52, figur 9.8].

### Forskydning

Forskydningerne mellem broen ståloverdel og bropiller, samt ditilationsfugerne måles 11 steder med potentiometre. På figur 3.7 vises hvordan potentiometerne anvendes. Målingen af forskydninger er relative målinger.



**Figure 3.7.** Placering af potentiometer på pille 1. [Eget billedmateriale]

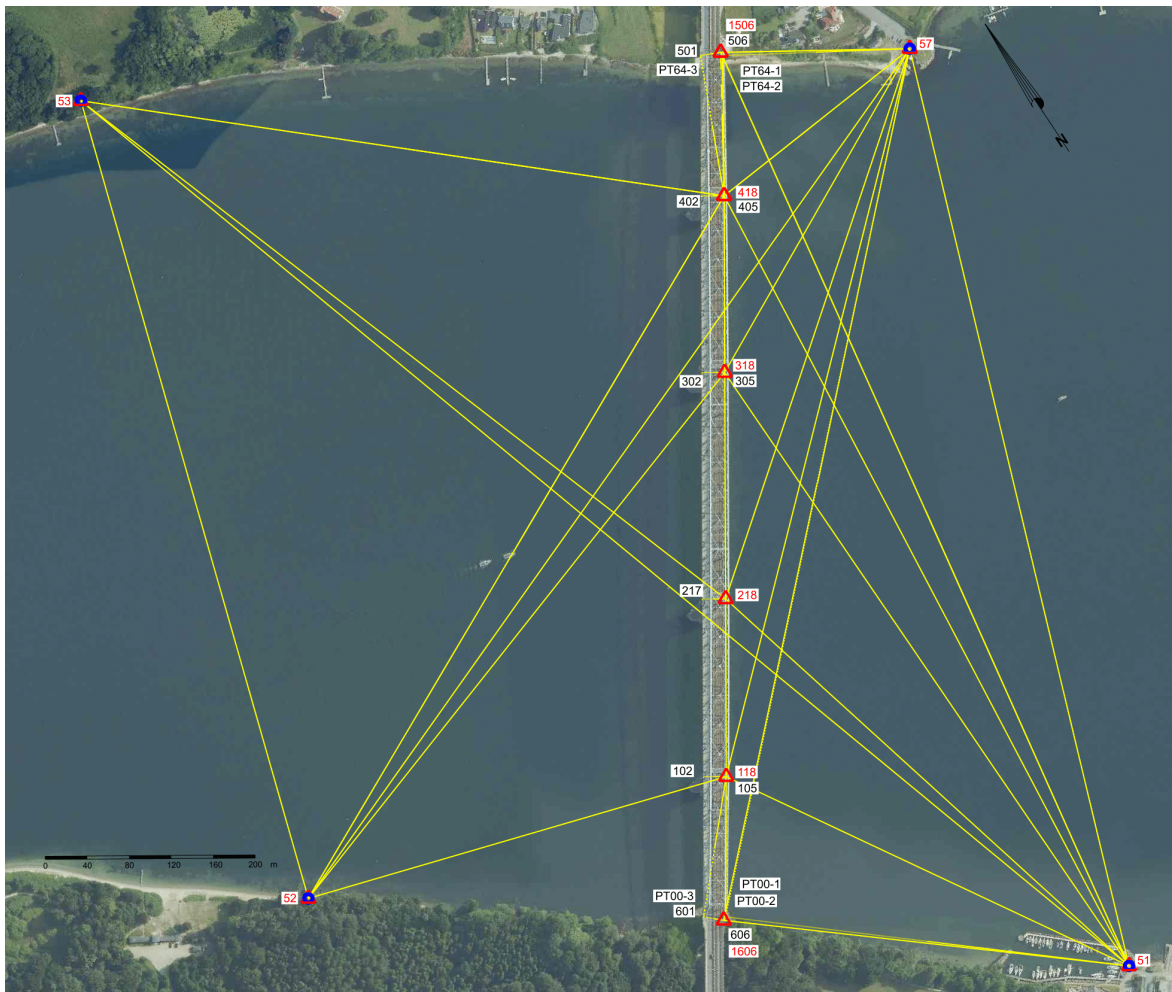
### 3.3 Manuel måling

'Manuel måling' har til formål at indsamle en historik over broen bevægelser, og har været foretaget siden 1949 [Banedanmark, 2023]. Målingen er, sammen med opmåling af fire andre broer, en del af et udbud for en 4-årlig periode. Ved 'Manuel måling' bestemmes plane koordinater, koter samt inklinometermåling til 23 konkrete punkter, der er fysisk afmærket på broen som vist på figur 3.8.



**Figure 3.8.** Eksempel på den fysiske afmærkning af punkter [Eget billedmateriale].

'Manuel måling' udføres på nuværende tidspunkt som en netmåling med 10 opstillinger. Netskitsen fremgår af figur 3.9, hvor opstillingspunkter er markeret med røde punktnumre. Punktnumrene i 'Manuel måling' er struktureret således at det første tal i punktnummeret henviser til hvilke pille punktet er beliggende på (fx 118= på pille 1). De to sidste tal i punkt nummeret beskriver hvor på pillen punktet er placeret, fx er alle 02-punkter placeret i pillens vestlige side, mens 18-punkter er den østlige side. Punkterne 51, 51, 53 og 57 er netværkets fixpunkter.



**Figure 3.9.** Netskitse over 'Manuel måling'. Fixpunkter (blå cirkel), opstillinger (rød trekant) og detailpunkter (nr.). Redigeret version af [LIFA, 2023b].

### 3.3.1 Kravsspecifikation

'Manuel måling' sendes sammen med fire andre broer i udbud. Kravene til opmålingen af de fire broer er defineret samlede i en kravsspecifikation, hvoraf det fremgår at opmålingen udover kravsspecifikationen til den konkrete opgave, skal overholde 'Banenorm BN2-94-2' som er BD's generelle krav til opmålinger [Banedanmark, 2011] [Banedanmark, 2018]. Følgende kravsspecifikation er udledt i [Sørensen, 2024] og gengives her:

*Opmålingen foretages i et lokalt koordinatsystem, hvor Y-aksen er orienteret så den følger broernes længderetning og koterne angives i DNN system GM [Banedanmark, 2018, s. 6].*

#### **Plane koordinater**

*Udførsel:*

- *Målinger over vand udføres i september-oktober for at mindske temperaturforskellen mellem vand og luft [Banedanmark, 2018, s. 7] .*
- *Alle målinger udføres som dobbeltmålinger, retningsmåling udføres som satsmåling, og der måles minimum to satser [Banedanmark, 2018, s. 6].*
- *Ved frie opstillinger skal der måles til min. 3 referencepunkter [Banedanmark, 2011, s. 18].*

- Der skal måle til 4 specifikke hovedpunkter og 23 specifikke detailpunkter [Banedanmark, 2018, s. 9].

Beregning:

- Nettet skal beregnes som både frit net og systemnet [Banedanmark, 2011, s. 13].
- I beregningen anvendes maksimalt følgende apriori spredninger jf. [Banedanmark, 2011, s. 14]:
  - Middelfejl retning: 5.0 cc
  - Middelfejl centrering: 2 mm
  - Middelfejl afstand: 2 mm grundfejl + 2.0 ppm

Kvalitetskrav:

- Punktmiddelfejl beregnet i frit net maks.: 2 mm. [Banedanmark, 2018, s. 9]
- Middelfejl på vægtenheden: maks. 1.2 i fritnet og 1,5 i systemnet [Banedanmark, 2011, s. 14]
- Den vægtede rettelse ( $P*V$ ) på den enkelte måling: maks. 3.0 [Banedanmark, 2011, s. 14]
- Antal af vægtede rettelser  $>2.0$ : maks. 5% [Banedanmark, 2011, s. 14]

### Koter

Udførsel:

- Koter bestemmes ved dobbelt frem- og tilbagenivellement [Banedanmark, 2018, s. 7].
- Der skal måles til 4 specifikke højdefixpunkter samt specifikke 10 detailpunkter [Banedanmark, 2018, s. 9].

Beregning:

- Koterne til højdefixpunkterne 2019-901 og 2019-904 fastholdes ved beregning. [Banedanmark, 2018, s. 9] samt [LIFA, 2022, s. 8]

Kvalitetskrav:

- Middelfejlen på overbestemte kotepunkter: max 3 mm. [Banedanmark, 2011, s. 15].

### Inklinometer

Der skal udføres 1 stk. inklinometermåling af landfæste Fyn, målingen foretages som 4 uafhængige aflæsninger i tvær- henholdsvis længderetning. [Banedanmark, 2018, s. 9]

#### 3.3.2 $P*V$

Den ovenstående kravspecifikation indeholder jf. Banenormen krav om at  $P*V$  for den enkelte måling ikke må overstige 3.0, og antallet af  $P*V > 2.0$  maks. 5%.  $P*v$  er et kvalitetsmål som BD anvender i stedet for det normaliserede residual. Beregning af  $P*V$  følger formel 3.1 mens det normaliserede residual beregnes efter formel 3.2. Formel 3.1 stammer fra samtale i relation til Sørensen [2024], hvorefter  $P*V$  jf. Jens Juhl der er tideliger underviser på AAU, beregner  $P*V$  i sit landmålingsprogram 'ScanOBS'.

$$V * \sqrt{P} = \hat{r}_i * \sqrt{\frac{1}{\sigma_0^2}} = \frac{\hat{r}_i}{\sqrt{\sigma_0^2}} \quad (3.1)$$

Der med beregnes den vægtede rettelse  $P*V$  som  $\sqrt{P} * V$ .

$$r'_i = \frac{\hat{r}_i}{\sqrt{\hat{\sigma}_{r_i}^2}} \quad (3.2)$$

[Cederholm, 2000, s. 48]

*Forskellen på  $\sqrt{P} * V$  og det normaliserede residual er, at residualen ved den vægtede rettelse divideres med observationens spredning, hvorimod residualen divideres med residualens spredning i det normaliserede residual. Grundlaget for  $P*V$  er dermed apprioriværdierne.* [Sørensen, 2024, s. 61-62]

### 3.3.3 Interview

På baggrund af kravsspecifikationen opstod følgende undrør:

- Hvorfor er disse punkter udvalgt til opmåling?
  - Hvad er formålet med hvert enkelt punkt i målingen?
  - Er alle punkterne forsat relevante? fx er der på pille 1, 3 og 4 to punkter med ca 1 m afstand.
- Hvorfor indgår der krav til måleproceduren i kravsspecifikationen, og ikke bare nøjagtigheds krav? eks. 'koter bestemmes ved dobbelnivellement'
- Hvorfor anvendes  $P*V$  fremfor den normaliserede residual?

Dette afdækkes ved interview med broingenør Svend Erik Gammelgaard fra Banedanmark. Interviewguide samt noter fra interview findes i Appendix C, og viden udledt af interviewet præsenteres herefter.

#### Punkterne

I 'Manuel måling' indgår 23 detailpunkter. I interviewet behandles formålet med hver af punkterne. Dette er opsummeret i tabel 3.2, hvor punkterne er grupperet efter punktnr. strategien.

Til 'Manuel måling' er det valgt at de samme fysisk afmærkede punkter indgår i målingen fra år til år, det skyldes jf. BD af mindske fejlbidragene. Dette suppleres med at det kan være svært at sammenligne bevægelser, hvis punkterne ændre gentagende gange.

#### Proceduren

Der er et ønske om at undgå "tilfældige" procedureændringer fra måling til måling. Hvis der hele tiden sker små, og måske uovervejede, ændringer i proceduren, bliver det sværere at holde styr på historikken. Derfor indholder kravsspecifikationen krav vedrørende måleproceduren. Men både kravet vedrørende nivellement og transformation kunne godt bortfalde, så længe nøjagtighedskravet kan overholdes. Derudover bør der være et overlapsår, så det er muligt at kontrollere at det nye monitoringssystem fungerer, ved at sammenligne med 'Manuel måling'. [Appendix C]

#### $P*V$

Respondent har ikke et forudgående kendskab til kravet vedrørende  $P*V$ . Ved opslag i Banenormen konstateres det at  $P*V$  hører under landmålingsafdelingen og dermed er uden for fagområdet. Der kommenteres på at Banenormen generelt indeholder flere 'gamle traditioner',

| Punkter                                                               | Hvor                                      | Hvad måles | Årsag                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 118, 218, 318 og 418                                                  | Pilletop, øst                             | X, Y, H    | Kende pilletoppens flytning i højden, samt plane flytning.                                                                                                                                     |
| 102, 302 og 402                                                       | Pilletop, Vest                            | X, Y, H    | Kan sammen med 118 anvendes til at beregne pillens drejning. Er ikke så relevant efter der i forbindelse med monitoringen er opsat inklinometre.                                               |
| 105, 305 og 405                                                       | Pilletop, ca. 1m fra hhv. 118, 318 og 418 | X, Y, H    | Ved ikke.                                                                                                                                                                                      |
| Moniteringspunkter (PT00-1, PT00-2, PT00-1, PT64-1, PT64-2 og PT64-3) | Landfæster                                | X, Y, H    | Er inkluderet siden 2019 for at det er muligt at koble moniteringsmålingerne til 'Manuel måling'. Dvs at moniteringsmålingerne kan gøres absolutte. De er ikke væsentlige for 'Manuel måling'. |
| 111, 211, 311, 411                                                    | Kantbjælke cykelsti                       | H          | Punkterne er overgangspunkter til nivellementet. Er et udtryk for den måletenik der har været anvendt. Men koten for punkterne anvendes ikke til noget ved BD.                                 |

**Table 3.2.** Formål med de forskellige "punkttyper" der indgår i den manuelle mål. Kolonne 'Årsag' er udledt af interview med bro ingeniør fra BD [Appendix C]

men at hvis  $P*V$  kun er et kvalitetsmål der anvendes indenfor BD kunne kravet formeligt godt ændres. [Appendix C] På baggrund her af erstattes kravet vedrørende  $P*V$  maks. 3.0 på den enkelte måling, med det normaliserede residual maks. 3.0 på den enkelte måling.

### Opsummering:

- I 'Manuel måling' skal der bestemmes X, Y og H til minimum 1 af de afmærkede punkter på hver af landfæsterne og de 4 piller.
- Det fortrækkes at der fortsat bestemmes X, Y og H til flere af de afmærkede punkter på hver af pillerne, da dette giver en ekstra sikkerhed i tilfælde af at punkter på et tidspunkt skulle gå tabt.
- At kravsspecifikationen indeholder krav vedrørende måleprocedueren, er for at undgå uovervejede procedureændringer fra måling til måling. Små ændringer fra år til år har risiko for at akkumulere sig til en størrelsesorden der vanskeliggøre sammenligningen af koordinater. BD ser ikke er problem i at koterne bestemmes ved polærmålig frem for geometrisk nivellement så længe nøjagtigheds kravet overholdes. Ligeledes kan koordinaterne fint bestemmes ved fast udjævning fremfor transformation.
- Kravet vedrørende  $P*V$  maks. 3.0 på den enkelte måling erstattes med; normaliserede residual maks. 3.0 på enkelt måling.
- Funktionskravene er herefter opsummeret i tabel 3.3.

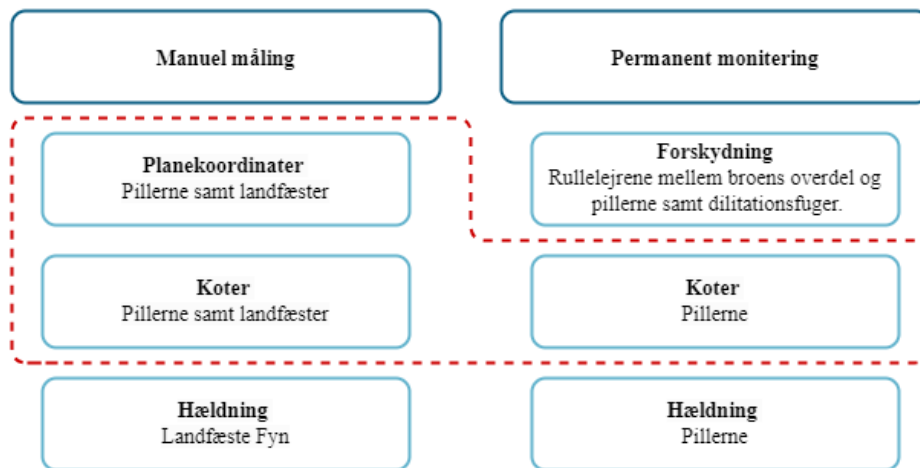
| Funktionskrav                                       | Manuel måling                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hvad skal måles?                                    | Koter, plane koor. og hældning                                                                                                                                                                                          |
| Hvor skal målingerne tages?                         | Plane koor: min. 1 af de fysisk afmærkede punkter på hver af de 4 piller samt de 2 landfæster.<br>Koter: min. 1 af de fysisk afmærkede punkter på hver af de 4 piller samt de 2 landfæster.<br>Hældning: Landfæste Fyn. |
| Hvilken nøjagtighed er nødvendig?                   | Plane koor.: punktmiddelfejl max. 2 mm<br>Koter: middelfejl max 3 mm.<br>Hældning: ikke angivet.                                                                                                                        |
| Hvilken hyppighed?                                  | En gang årligt.                                                                                                                                                                                                         |
| Hvor lang tidsperiode strækker målingerne sig over? | Fra 1949                                                                                                                                                                                                                |

**Table 3.3.** Opsummering af funktionskravene for 'Manuel måling'. Redigeret version af [Sørensen, 2024, s. 73].

### 3.4 Sammenligning

Fælles for de to måleteknikker er at formålet overordnede set er at overvåge broens bevægelser over tid med henblik på sikkerhed, men hvordan broens bevægelser overvåges er forskelligt i de to målinger.

De to monitoringer består hver af 3 dele, som vist på figur 3.10. Hældningsmålingerne samt forskydningsmålingen tilhøre monitoringskategorien 'Geotekniske og strukturelle teknikker' Sørensen [2024]. Hvilket betyder at en sensor indsamler relativ information indenfor dens fysiske udstrækning [Ogundare, 2015, Afsnit 11.1]. Planekoordinater og koter fra den Manuellem måling samt koter fra den eksisterende permanente monitoring kan derimod alle opnås med samme måleteknik, i form af et netværk med totalstationsmålinger. Af denne baggrund afgrænses der Fremadrettede i projektet afgrænses der til at udarbejde et netværk der kan opfylde kravene til 'Planekoordinater' og 'koter' fra 'Manuel måling', samt 'Koter' fra den eksisterende monitoring. Denne afgrænsning er vist med den stiplede røde linje på figur 3.10. Afgrænsning betyder at kravsspecifikationen for det nye monitoringsnetværk opstilles på baggrund af krav fra vedrørende planekoordinater' og koter fra 'Manuel måling', samt koter fra den eksisterende monitoring.



**Figure 3.10.** Indhold i Manuel måling og eksisterende permanente monitoring. Projekts afgrænsning er markeret med den røde stiplede linje.

### 3.5 Opsamling - en fælles kravsspecifikation

I dette kapitel er formål, krav og udførsel af de to monitoringer på Lillebæltsbroen; manuel måling og permanent monitoring undersøgt. De to monitoringer består hver af 3 dele, og der er afgrænset til i dette projekt at designe et monitoringsnetværk, der kan opfylde kravene fra vedrørende planekoordinater og koter fra 'Manuel måling', samt koter fra den eksisterende monitoring. Kravene fra hver af de to målinger sammenlignes herunder i tabel 3.4, og de kombineres til en fælles kravsspecifikation. Denne fælles kravsspecifikation der udstikker kravene det nye monitoringsnetværk skal overholde, for at kunne udføre begge opgaver.

|                  | Manuel måling                                                                                             | Permanent monitoring                                  | Fællesskravsspecifikation                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Koordinat-system | Krav at der måles i det samme lokale koordinatsystem.                                                     | Ingen krav.                                           | Der måles i det lokale koordinatsystem defineret i forbindelse med 'Manuel måling'.                         |
| Punkter          | Minimum X, Y, H til 1 af det fysisk afmærkede detailpunkter på hver af de 4 piller samt de to landfæster. | Kote på et vilkårligt punkt på hver af de fire piller | Følger kravet fra 'Manuel måling', idet kravet for 'Permanent monitoring' samtidig er opfyldt herved.       |
| Nøjagtighed      | Punktmiddelfejl: maks 2 mm.<br>Kotespredning: maks 3 mm.                                                  | Kotespredning: maks 2 mm                              | Punktmiddelfejl: maks 2 mm (fra 'Manuel måling').<br>Kotespredning: maks 2 mm (fra 'Permanent monitoring'). |
| Målefrekvens     | 1 gang årligt.                                                                                            | 1 gang i timen.                                       | 1 gang i timen (fra 'Permanent monitoring').                                                                |

**Table 3.4.** Sammenligning af krav fra de to målinger og fællesskravsspecifikation.

**Kravsspecifikationen**

- Koordinater defineres i det lokal koordinatsystem der anvendes til Manuel måling
- Der måles X, Y, H til minimum 1 af det fysisk afmærkede detailpunkter på hver af de 4 piller samt de to landfæster. Gerne til flere på hver pille.
- Punkterne skal minimum bestemmes med følgende nøjagtighed:
  - Punktmiddelfejl: maks. 2 mm
  - Kotespredning: maks. 2 mm
- Normaliserede residual maks. 3.0 på den enkelt måling.
- Der måles minimum 1 gang i timen.
- Der måles minimum to satser.

# Netværksdesign 4

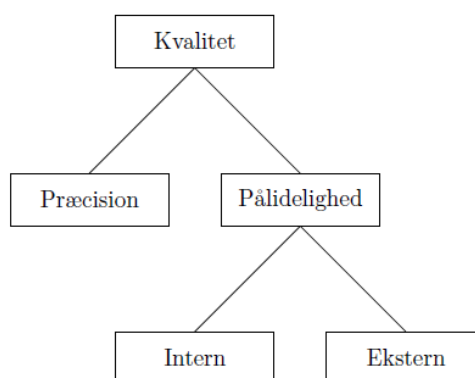
---

*Formålet med dette kapitel er at opnå en forståelse for disciplinen netværksdesign, således der efterfølgende kan designes et netværk til Lillebæltsbroen. Kapitlet skal besvare underspørgsmålet: hvordan designes et monitoringsnetværk. Dette kan gøres gennem netværksdesign, som er en proces til at udarbejde et netværk opfylde prædefinerede kvalitets kriterier [Khameneh, 2015, s. 1]. Dette kapitel danner derved det teoretiske fundament for efterfølgende at kunne designe et samlede netværk der opfylder kravsspecifikationen.*

## 4.1 Introduktion til netværksdesign

I forbindelse med udarbejdelse af et nyt netværk, definerer opgavestilleren ofte krav til eks. hvad der skal monitoreres, frekvensen samt kvaliteten af målingerne [Middelton et al., 2016, s. 18]. Netværksdesign er at estimere den forventede kvalitet af målinger inden de udføres. Dette gør det muligt at eksperimentere med variable i netværket og derigennem afdække forskellige muligheder for at opfylde opgavens kvalitetskrav [Ogundare, 2015, Afsnit 7.1][Seemkoeei, 2001b]. Fordelen ved at anvendes netværksdesign i forbindelse med udarbejdelse af et netværk er dermed viden om kvaliteten kan opnås inden etableringen. Dette er særligt anvendeligt i forbindelse med monitoringsnetværk da omkostninger, ved at fortage ændringer i netværket efter etablering, ofte er høje.

Indenfor netværksdesign består begrebet kvalitet ofte af præcision og pålidelighed, hvor pålideligheden består af et intern og eksternt del [Casparry, 2000, s. 85-86]. Dette er også illustreret på figur 4.1.



**Figure 4.1.** Vurdering af kvalitet opsplittes i præcision og pålidelighed [Cederholm, 2000, s. 116]

Netværksdesign handler ikke kun om at udarbejde et netværk der opfylder kvalitetskravene, men er derimod en afvejning af præcisionen, pålideligheden og de økonomiske omkostningerne ved netværket. Et netværksdesign der opfylder præcisionkravet og pålidelighedskravet

til mindst muligt omkostninger, kaldes ofte *optimum design*. [Ogundare, 2015, 7.2.1] Denne afvejning kan beskrives som et optimeringsproblem jf. ligning 4.1. I dette projekt arbejdes der med *optimum design* som et kvalitativt begreb.

$$c_p * (precision) + c_r * (reliability) + c_c(cost)^{-1} = Optimumdesign \quad (4.1)$$

[Klein et al., 2019, s. 531]

#### 4.1.1 Designprocessen

I forbindelse med design af et netværk, argumenter Grafarend, 1974 for at designprocessen består af 4 trin dvs 0-3 ordens design. [Seemkoeei, 2001a]

I 0-ordens design vælges der et datum. Heri fokuseres der på at bekræfte stabiliteten af referencenetværkets position mellem monitoringsperioderne [Ogundare, 2015, afsnit 7.2.3]. Det bemærkes dog, at 0.-ordens ikke altid defineres i monitoringsnetværk [Khameneh, 2015, s. 20]. Næste trin i designprocessen er 1.-ordens design, hvori udfordringen er at udforme arbejde netværkets geometri. Dette indledes med at udvælge observationspunkter hvor den største deformation forventes at forekomme, samt at fastlægges hvilken observationsteknik er skal anvendes, da dette har indflydelse på hvordan et net opbygges [Ogundare, 2015, Afsnit 7.2.3]. Derefter udarbejdes et optimum ifh. placering af referencestationer og opstillinger [Khameneh, 2015, s. 1]. I forbindelse med 2.-ordens design fokuseres der på hvilke typer af observationer der indsamles og deres præcision, hvilket resulterer vægtningen af observationerne. [Ogundare, 2015, Afsnit 7.2.3]. I denne fase vælges, hvilke observationer der skal indsamles, hvilket resulterer i vægte [Khameneh, 2015, s. 1]. Imens 0.-2.- ordensdesign er tre trin i designfasen inden et netværk etableres, handler 3.-ordens design om at forbedre et eksisterende netværk, hvilket kan involvere ændringer i både 1.-ordens og 2.-ordens design [Ogundare, 2015, Afsnit 7.2.1].

Dette opsummeres til følgende:

- 0-ordens design (ZOD): vælge optimum datum.
- 1-ordens design (FOD): designe et optimum geometri af netværket.
- 2-ordens design (SOD): vælge observationstyper, bestemme deres præcision og derigennem vægte.
- 3-ordens design (THOD): forbedring af eksisterende netværk.

Overordnet er der to tilgange til optimering af netværksdesign; computer simulering ('trial and error') eller den analytisk tilgang hvor det optimale netværksdesign udledes af matematiske formler. [Ogundare, 2015, Afsnit 7.3] [Seemkoeei, 2001a, s. 104-105]

## 4.2 Kvalitet i netværksdesign

På baggrund af ovenstående afsnit omhandler netværksdesign beregning af hvordan den krævede kvalitet kan opnås, og i den forbindelse består kvalitet af flere dele, som illustreret på figur 4.1. Disse dele af kvalitetsbegrebet undersøges i dette afsnit nærmere, med henblik på at udlede hvordan kvalitet kan sikres gennem netværksdesign.

### 4.2.1 Præcision

Præcision er et mål for hvor tæt gentagende målinger ligger på hinanden, hvilket måles med spredning ( $\sigma$ ) eller varians ( $\sqrt{\sigma}$ ). [Cederholm, 2000, s. 12-13]. Variansen af observationerne fremgår af diagonalen i konvariansmatricen, der beregnes efter ligning 4.2.

$$\Sigma \hat{x} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T C A)^{-1} \quad (4.2)$$

|                    |                                    |
|--------------------|------------------------------------|
| $\hat{\sigma}_0^2$ | Variansfaktoren                    |
| $A$                | Designmatricen for observationerne |
| $C$                | Vægtmatricen for observationerne   |

[Cederholm, 2000, s. 44]

Variansfaktoren er et udtryk for variansen af en observation med vægten 1, hvilket i et planlægningsfasen sættes til 1. [Cederholm, 2000, s. 13+59]

I projekts konkrete netværk måles der i et absolut koordinatsystem med faste fixpunkter, og derfor anvendes begrebet nøjagtighed fremfor præcision. Nøjagtighed beskriver hvor tæt observationerne er på den sande værdi. Spredningen kan anvendes som et mål for nøjagtigheden, under forudsætning af at observationerne ikke påvirkes af systematiske fejl [Cederholm, 2000, s. 12].

### 4.2.2 Pålidelighed

En anden vigtig egenskab ved et netværk dets evne til opdage grove fejl, hvilket beskrives som pålidelighed. Men et præcis netværk ikke er meget værd, hvis nettet har ringe evne til at opdage grove fejl, og derfor er præcisionen alene ikke tilstrækkelig som kvalitetsmål for et netværk.

Begrebet pålidelighed af geodætiske netværk stammer fra Baarda [1968] og refererer til et netværks evne til at opdage og modstå grove fejl i observationer. Pålidelighed er, som vist på figur 4.1, ofte opdelt i intern og ekstern pålidelighed. Den interne pålidelighed er et udtryk for den mindste grove fejl der lige akkurat afsløres ved test. Den eksterne pålidelighed er en indikation for hvor meget 'lige akkurat grove fejl' i værste fald påvirke den ubekendte. Den ubekendte er i denne sammenhæng en koordinat. [Cederholm, 2000, s. 115] [Seemkooei, 2001a]

Den interne pålidelighed bestemmes ved at teste hvor stor  $\nabla bi$  skal være, før at den afsløres som en grov fejl. Dette testes ud fra nulhypotesen der postulerer, at  $\nabla bi$  er så lille at den ikke afsløres, mens den alternative hypotese postulerer at den afsløres. I forbindelse med den interne pålidelighed antages det, at der kun er én grov fejl [Cederholm, 2000, s. 117-118]. Den interne pålidelighed beregnes for hver observation med følgende formel 4.3

$$\nabla_0 bi = \frac{\delta_0 \sigma_i}{\sqrt{\rho_i}} \quad (4.3)$$

hvor

|            |                                                                                           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\delta_0$ | Værdi for forskydningen af fordelingskurven for teststørrelsen på grund af den grove fejl |
| $\sigma_i$ | Spredningen på den i'te observation                                                       |
| $\rho_i$   | Redundanstallet for den i'te observation                                                  |

[Cederholm, 2000, s. 117-118] samt [Seemkooei, 2001b, s. 228]

$\delta_0$  sættes = den kritiske værdi ( $w_i$ ), den kritiske værdi afspejler hvor stor en fejl skal være, for den betragtes som en grov fejl. Dermed er en kritiskværdi der afspejler forståelsen af grovfejlsgrensen på  $\pm 3\sigma$ . Den kritiske påvirkes af valget af signifikansniveauet,  $\alpha$ , og testens styrke  $1 - \beta$ .  $\alpha$  er sandsynligheden for, at en sand observation afvises.  $\beta$  er risikoen for at acceptere en grov fejl. [Cederholm, 2000, s.116-118]

Selv gennem omfattende test, kan ikke alle fejl opdages. Den eksterne pålidelighed er en mål for hvor meget 'lige akkurat grove fejl' i værste fald påvirke den ubekendte. Den ubekendte er i denne sammenhæng en koordinat. Et netværk har en høj ekstern pålidelighed, hvis forplantningen af en uopdaget fejl er usignifikant. Størrelsesorden af værdien for ekstern pålidelighed bør derfor ses i forhold til den forventede kvalitet. [Cederholm, 2000, s. 120-124] [Caspary, 2000, s.91-92]

Værdien for den eksterne pålidelighed beregnes efter formel 4.4.

$$\nabla_0 \hat{x}_i = N^{-1} A^T C \nabla_0 b_i \quad (4.4)$$

|                |                                             |
|----------------|---------------------------------------------|
| $N$            | $A^T C A$                                   |
| $C$            | Vægtmatricen                                |
| $\nabla_0 b_i$ | Intern pålidelighed beregnet jf. formel 4.3 |

[Cederholm, 2000, s. 121] [Seemkoeei, 2001b, s. 228]

### 4.3 Påvirkning af kvalitet i netværksdesign

Af ovenstående udledes det at både nøjagtighed, intern pålidelighed og ekstern pålidelighed er baseret på A- og C- matricen, derfor må parametre der påvirker kvaliteten i netværksdesign kunne udledes af A- og C matricen. Dette afsnit har til formål at analysere hvad der indgår i A- og C- matricen, for derigennem at udlede parametre der påvirker kvaliteten af et netværk.

#### 4.3.1 A-matricen

A-matricen kaldes design-matrices, og indeholder informationer om hvilke observationer der indsamles, hvilket beskriver nettets design. Hver plads i A-matricen indeholder de partieltafledte til observationsligninger med hensyn til elementerne. Hver række i A beskriver en observation (fx afstandsobservation fra fix1 til P) og hver søjle beskriver et element i udjævningen, dvs. en koordinat.[Cederholm, 2000,32-33] Derved opstilles A-matricen på baggrund af:

- A1: hvilke punkter der skal observeres imellem
- A2: hvilke typer af observationer der indsamles.
- A3: omtrentlige koordinater til fixpunkter og detailpunkter.

[Jensen, 2020, s. 137]

A1 og A3 handler om geometrien i nettet og punkttyper. Udfra tidligere arbejde med totalstationsmålinger er der 3 punktertyper, der har følgende kendetegn:

- Fixpunkt: kendte koordinater der definerer datum.
- Opstillingspunkt: placeringen af udstyr
- Detailpunkt: punkt hvor til der observeres koordinater til

Derudover kan både antallet og placeringen af hver af de 3 punkttyper varieres.

A2 handler om hvilke observationer der indsamles, ved totalstationsmåling vil dette typisk være afstand, horisontalretning og zenitdistance.

Dette betyder at at følgende kan varieres i testene: På baggrund af A matricen har følgende parametre indflydelse på netværkets kvalitet:

- Fixpunkter - placering
- Fixpunkter - antal
- Opstilling - placering
- Opstilling - antal
- Detailpunkt - placering
- Detailpunkt - antal
- Observationstype

#### 4.3.2 C-matricen

C-matricen, også kaldet vægtmatricen, beskriver vægtningen af de forskellige observationer. Observationerne der indsamles har forskellig præcision, og for at observationer med høj præcision, får større indflydelse i en udjævning end observationer med lavere præcision, anvendes vægtning. Vægten for den enkelte observation er den inverse af observationens varians:  $c_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}$ . C-matricen kan også beregnes med formel 4.5. [Cederholm, 2000, s. 13-15]

$$C = \sigma_0^2 \Sigma_b^{-1} \quad (4.5)$$

Hvor:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_0^2 \\ \Sigma_b^{-1} \end{array} \right| \begin{array}{l} \text{Variansfaktoren dvs. variansen af en observation med vægten 1. Sættes oftest til 1 a priori} \\ \text{Kovariansmatricen (beregnet i formel 4.2).} \end{array}$$

Vægtmatricen er et udtryk for apriori spredningen og opstilles på baggrund af instrumentspecifikationer og antal målinger [Cederholm, 2000, s. 59]. C-matricen er den inverse af spredningen, dermed afhænger C-matricen af observationenes spredning, derfor undersøges hvad der påvirker spredningen. I tabel 4.1 præsenteres en oversigt over de tilfældige fejl der påvirker spredningen på de tre observationstyper i en totalstationsmåling; skråafstand, horisontalretning og zenitdestancen. Dermed viser tabel 4.1, hvilke parametre der på baggrund af C-matricen har indflydelse på et netværks kvalitet.

| Parameter                                 | Horisontalretning | Afstandsmåling | Zenitdistance |
|-------------------------------------------|-------------------|----------------|---------------|
| Præcision af instrument                   | x                 | x              | x             |
| Antal satser                              | x                 | x              | x             |
| Centeringsspredning, instrument           | x                 | x              |               |
| Centeringsspredningen, prisme             | x                 | x              |               |
| Spredning på $ppm_a$ (afstandskorrektion) |                   | x              |               |
| Spredning på refraktionskoefficienten     |                   |                | x             |
| Spredning på instrumenthøjde              |                   |                | x             |
| Spredning på sigteskivehøjden             |                   |                | x             |

**Table 4.1.** Oversigt over parametre der påvirker præcisionen og dermed C-matricen. 'x' viser hvilken observationstype parlamenteret påvirker. Parametrene er udledt af [Jensen, 2020, Kapitel 2, 3, 6]

## 4.4 Opsamling

Netværksdesign er at estimere den forventede kvalitet af målinger inden de udføres. Design processen inddeles i 4 trin: 0.-ordens, 1.ordens, 2.ordens og 3.ordens design. I design processen er der fokus på at finde et optimum mellem præcision, pålidelighed og økonomi til den konkrete monitoringsopgave. Kvalitet måles inden for netværksdesign oftes som præcision og pålidelighed (intern og ekster).

Præcision, intern pålidelighed og ekstern pålidelighed beregnes alle på baggrund af A- og C-matricen. Gennem analyse af A- og C-matricen er det udledt at følgende parametre påvirker kvaliteten af et netværk:

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| A-matricen | Fixpunkter - placering                    |
|            | Fixpunkter - antal                        |
|            | Opstilling - placering                    |
|            | Opstilling - antal                        |
|            | Observationstype                          |
| C-matricen | Præcision af instrument                   |
|            | Antal satser                              |
|            | Centreringsspredning, instrument          |
|            | Centreringsspredningen, prisme            |
|            | Spredning på $ppm_a$ (afstandskorrektion) |
|            | Spredning på refraktionskoefficienten     |
|            | Spredning på instrumenthøjde              |
|            | Spredning på sigteskivehøjden             |

**Table 4.2.** Parameter der påvirker kvaliteten af et netværk udledt af A- og C-matricen.

# Eksperimentdesign 5

---

*I sidste kapitel blev det udledet at netværksdesign omhandler planlægningen af et netværk, således konkrete krav opfyldes. I netværksdesign er der særligt fokus på at maximere kvaliteten, hvilket består af præcision og pålidelighed, og samtidig minimere omkostningerne. I dette kapitel behandles første del af underspørgsmål 3; Hvordan kan det testes om et netværk overholder kravene? Målet med kapitlet at udarbejde et eksperimentdesign, der beskriver en konkret fremgangsmåde inklusiv hvilke test der skal udføres i kapitel 6. For at nå fremtil denne oversigt over test argumenteres der i dette kapitel for hvad, hvorfor og hvordan, eksperimentet af testnet skal udføres. Dette indholder flere dele som behandles i dette kapitel:*

- *Formål med eksperimentet*
- *Fysiske bindinger ved Lillebæltsbroen*
- *Standardisering af testene*
- *Udvælgelse af parametre der testes*
- *Definering af variable - Hvilke værdier/geometrier skal testes ved de enkelte parametre?*
- *Vurderingskriterier*

## 5.1 Formål

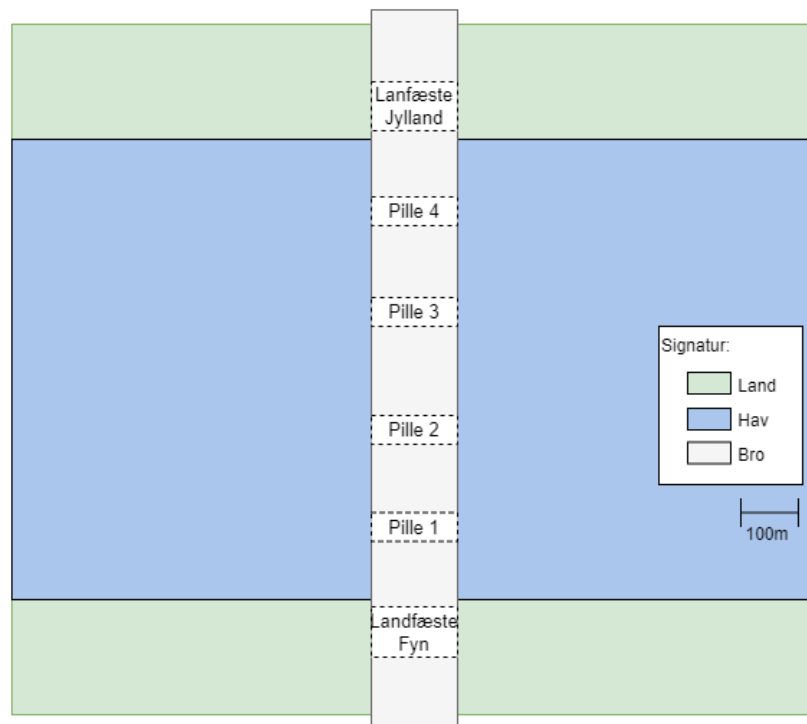
Målet med eksperimentet er, som beskrevet i 2 'Metode', at udarbejde et monitoringsnetværk der kan opfylde kravsspecifikationen præsenteret i afsnit 3.5. Dvs. målet er ikke af maximere nøjagtigheden og pålideligheden til uendelighed, men blot til det punkt hvor kravsspecifikationen er overholdt.

Som nævnt i kapitel 4 er der to tilgange til optimering af netværksdesign; computer simulering ('trial and error') eller den analytisk tilgang. De to tilgange er behæftet med hver deres svagheder. Simulerings metoden kan bekræfte opnåelsen af det optimale netværk, mens den analytiske metode risikerer at generere absurde løsninger der ikke er praktisk mulige eller meningsfulde fx negative vægte eller afbrudte netværk [Yetkin et al., 2008,s. 2]. Til dette projekt vælges det at anvende computer simulerings metoden. Dette valg er begrundet i projektets formål, der ikke er at udlede det absolut optimale netværk, men blot et tilfredsstillende netværk ift. kravsspecifikationen. Derudover er der fokus på et konkret monitoringsnetværk med bindinger ift. opstillingsmulighederne pga. havet omkring broen, og deraf er det væsentligt at udarbejde et netværk tilpasset den konkrete monitoringsopgave.

## 5.2 Bindinger

Netværket etableres i forbindelse med en bro, hvorved omgivelserne medfører fysiske bindinger for hvordan det er muligt at etablere et netværket. Disse bindinger inddrages i eksperimentdesignet, for at undgå at teste urealistiske netværk. Omgivelserne og de

bindinger dette medfører simplificeres i forbindelse med testnettene som vist på figur 5.1. Med simplificeres, menes fx at kystlinjen opfattes som en lige linje.



**Figure 5.1.** Simplificering af Lillebæltsbroen og omgivelser til testnet. Broens brede er fortegnet.

Undersøgelsen af netværksdesign til Lillebæltsbroen er forbundet med følgende bindinger:

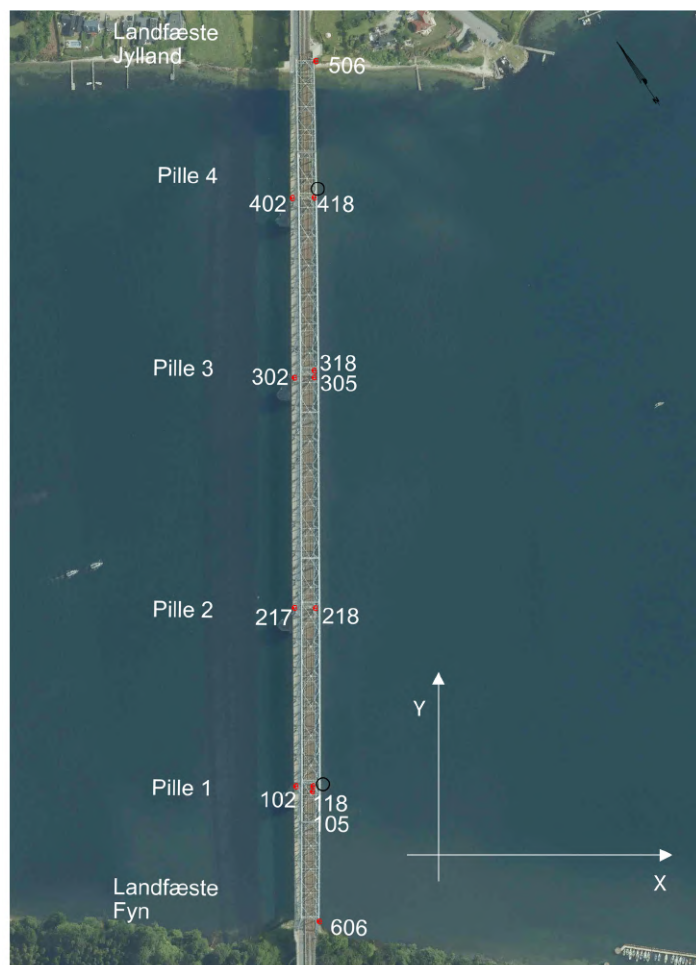
- Mulighederne for opstillinger er begrænset af hav omkring broen. Derfor kan opstillinger placeres på bropillerne (stiplet grå) og på land (grøn).
- Fixpunkter placeres på land (grøn) fordi land betragtes som stabilt. For at bevare sigtelinjer til fixpunkterne testes der kun kystnære fixpunkter.

### 5.3 Detailpunkter

Netværket skal jf. kravsspecifikationen i afsnit 3.5 inkludere minimum ét detailpunkt på hver pille samt landfæste og gerne flere punkter. Detailpunkterne er placeret som vist på figur 5.2.

I forbindelse med eksperimentdesignet det, gennem besigtigelse på broen, undersøgt hvilke sigteliger der er mulige:

- Pille 1: 102, 118, 218, 606
- Pille 2: 118, 105, 218, 217, 318, 305
- Pille 3: 218, 302, 318, 405, 418
- Pille 4: 402, 418, 318, 305, 506



*Figure 5.2.* Kort over detailpunkterne samt koordinatsystemets orientering.

## 5.4 Fixpunkter

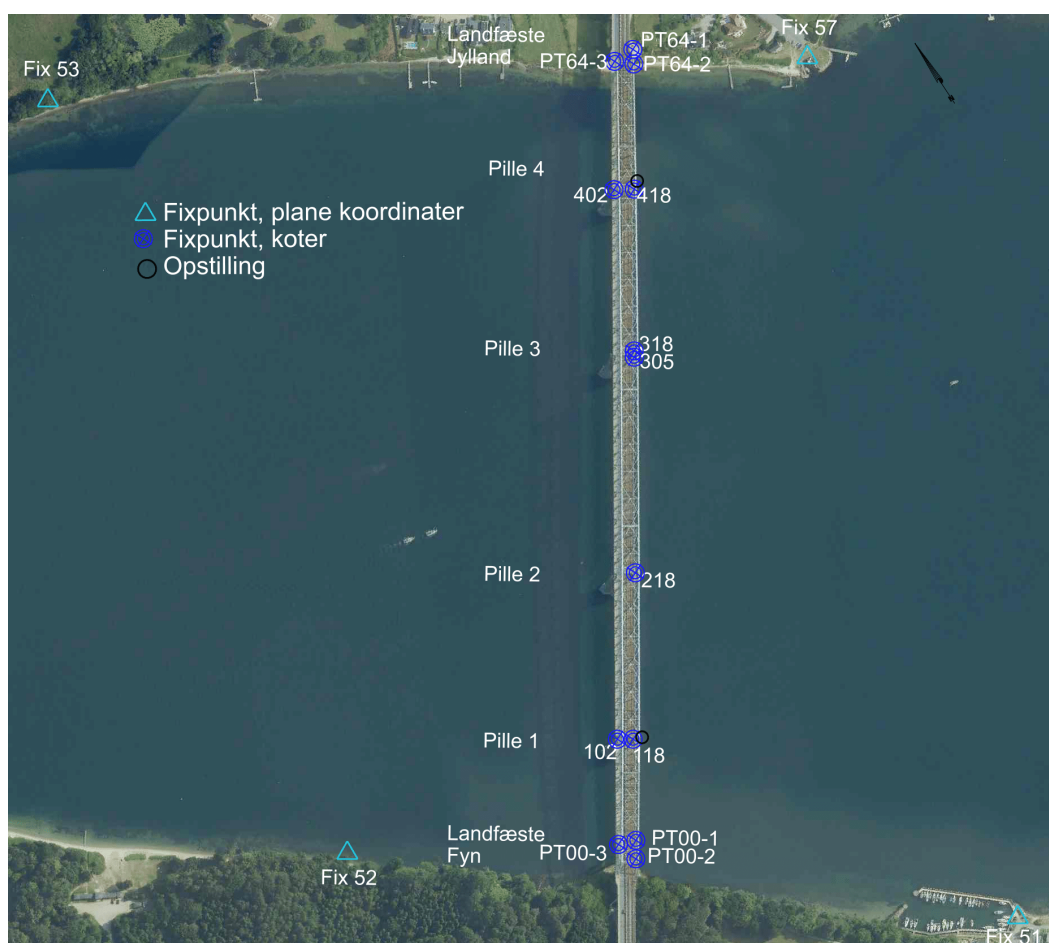
Jævnfør kravsspecifikationen skal detailpunkterne koordinater defineres i det lokal koordinatsystem der anvendes ved 'Manuel måling'. Dette koordinatsystem defineres af fixpunkterne 51, 52, 53 og 57 vis på figur 5.3. Disse fixpunkter er placeret befærdede steder, fx midt på en sti, og er derfor ikke egnet til permanent monitoring. Netværkets nye fixpunkter etableres ved en fortætning af det eksisterende fixpunkts net. Planen for fixpunktsindmålingen er skitseret på figur 5.3. Planen er at lave to frie opstillinger på hhv pille 1 og 4, hvorfra der observeres til følgende punkter:

- Pille 1 og 4: de eksisterende fixpunkter 51, 52, 53 og 57. Indgår i beregningen som plane fixpunkter.
- Pille 1: PT00-1, PT00-2, PT00-3, 102, 118, 218. Indgår i beregningen som kotefixpunkter.
- Pille 4: PT64-1, PT64-2, PT64-3, 402, 418, 318, 305. Indgår i beregningen som kotefixpunkter.
- Nyetablerede fixpunkter. Indgår i beregningen som detailpunkter.

X-og Y-koordinaterne til 51, 52, 53 og 57 er kendte fra fixpunktsfilen fra 'Manuel måling' (se [LIFA, Ukendt år]). Koterne til punkterne der anvendes til kotefixpunkter kendes fra sidste

'Manuel måling' (se [Banedanmark, 2023]). Når koterne til de nye monitoringssystem indmåles baseret på detailpunkterne, er det essentielt at fixpunktsindmålingen sker i forbindelse med 'Manuel måling'. Ellers risikere man at pillerne har hævet eller sænket sig pga. fx temperaturændringer, hvilket i så fald vil medføre at hele kotesystemet forskydes i det nye monitoringsnetværk. I dette projekt er det ikke muligt at fortage fixpunktsindmålingen i forbindelse med 'Manuel måling', fordi denne fortages i oktober. De nyetablerede fixpunkter vil derfor skulle genindmåles i forbindelse med 'Manuel måling' 2024, hvis netværket beholdes.

Beregningen af testnet inkluderer at angive fixpunktsspredningen, dvs. hvor godt fixpunkterne forventes at være bestemt. Fixpunktsspredningen afhænger af det netværk fixpunktet er indmålt med, dvs. alle parametrene nævnt i kapitel 4 'Netværksdesign', derfor estimeres en forventede fixpunktsspredning til hvert testnet. Estimeringen af fixpunktsspredningen fortages som et testnet beregning af indmålingen beskrevet og vist på figur 5.3. I denne beregning angives fixpunktsspredningen for de eksisterende fixpunkter (51, 52, 53 og 57) til 2,7 mm, hvilket er beregnet på baggrund af korrektioner ved transformationen ved 'Manuel måling' 2023 (se Appendix E). Når korrektionerne på fixpunkterne ved transformation gennemsnitligt ligger på 2,7 mm, indikerer det netspændinger. Disse netspændinger videreføres ved en fortætning af fixpunktsnettet. Banedanmark ønsker ikke en nykoordinering af de eksisterende fixpunkter, da dette vil påvirke sammenlignigheden af detailpunkterne koordinater. Af denne årsag fortættest fixpunktsnettet, selvom der er netspændinger.

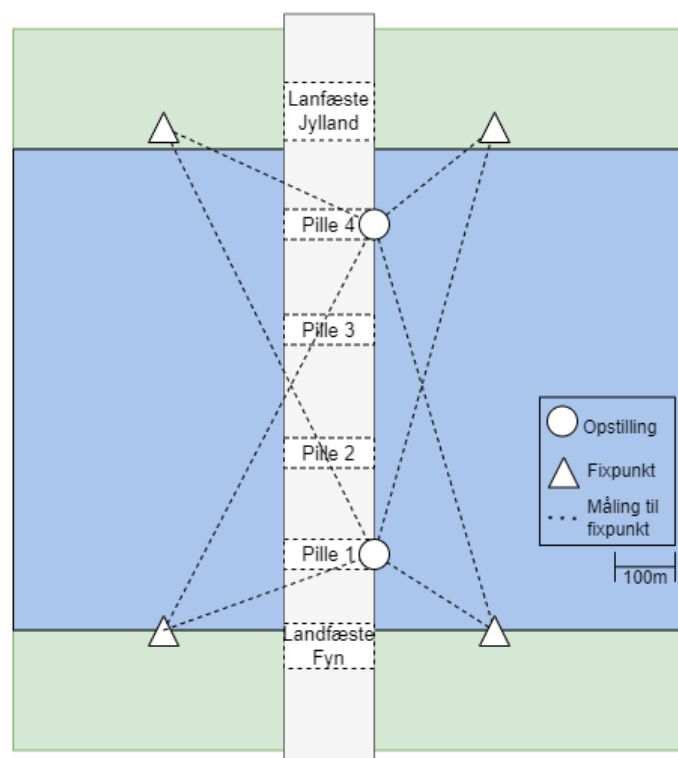


**Figure 5.3.** Kort over den planlagte måde at komme i de eksisterende lokale koordinatsystem.

## 5.5 Standardopsætning til testnet

Ved dette eksperiment udføres der flere testnet, som sammelignes med henblik på at udlede de enkelte parametres indflydelse på kvaliteten. For at udlede det enkelte parametres indflydelse, varieres der kun på ét parameter af gangen. Derfor udarbejdes en standardisering af testnettene, således der fastlægges standardværdier for parametre der påvirker testene, udpeget i kapitel 4.

På Lillebæltbroen er der, som beskrevet i kapitel 3, et eksisterende monitoringsnetværk. Derfor tager standardopsætningen udgangspunkt i den eksisterende monitoringssystem. Dette betyder at standardopsætningen består af to opstillinger på hhv. pille 1 og pille 4, der måles med TS30. I forhold til fixpunkterne, er der i standardopsætningen valgt anderledes end det eksisterende monitoring. Dette skyldes, som det blev udledt i kapitel 3 at geometrien med det eksisterende monitoring for ringe til opnå plane koordinater. I stedet anvendes 4 fixpunkter placeret 200 m fra landfæstet som standardopsætning. Geometrien af standardopsætningen er illustreret på figur 5.4, hvor sigter til fixpunkterne er vist ved stiplede linjer. Detailpunkterne der indgår i testnettene er de 21 punkter beskrevet i kravsspecifikationen i afsnit 3.5. Detailpunkternes placering, er i testnettene baseret på koordinaterne fra 'Manuel måling' 2023(se [Banedanmark, 2023]). I alle netværkene foretages der målinger til alle fixpunkter fra alle opstillinger.



**Figure 5.4.** Skitse af geometrien i standardopsætningen. Broens brede er fortegnet.

'Centreringspredning, prisme' består af to fejlbidrag, i Ghilsni [2018] skelnes mellem 'pointing error' og 'taget centering error'. 'Pointing error' er fejlbidraget vedrørende indstillingen til prismet 'Target centering error' er derimod fejlbidraget fra om prismet er placeret i punktet [Ghilsni, 2018, s 116-119]. Det er i monitoring relevant at adskille fejlbidragene, da prismet er fastmonteret og derved er 'target centering error' fjernet. I forhold til 'pointing error'

stammer fejlene jf. [Ghilsni, 2018, s 116-119] fra disse tre dele, som i dette projekt håndteres på følgende måde:

- Prismetype: repræsenteres ved prismespecifikationer [Leica Geosystems, 2019].
- Operatørens evner til at indstille på prismet: der anvendes ATR
- Vejrforhold: udelades

Til netværket forventes at anvendes prismer af typen GPH1 . Disse har jf. prismespecifikationerne en centreringsnøjagtighed på 1 mm [Leica Geosystems, Ukendt år]. I relation til indstillingen til prismet, foregår dette i monitoringen med Automatic Target Recognition (ATR), hvilket betyder at totalstationen selv lokaliserer og centrerer til prismet. Derfor undersøges nøjagtigheden af centrering med ART gennem instrumentspecifikationer Leica Geosystems [2009] og teknisk information om ATR Leica Geosystems [2015] .

Samlede set opnås opfattelse af at 'pointing error' består af:

- Centreringsfejlen ved ATR er inkluderet i den generelle vinkelnøjagtighed fra instrumentspecifikationerne (0.15 mgon for TS30) [Leica Geosystems, 2015, s. 8]. Ved anvendelse af ATR tillægges derfor ikke et yderligere fejlbidrag vedr. indstillingen til prismet.
- Dertil kommer en centreringsspredning som er afhængigt af prismet, hvilket for prisme af model GPH1 er 1 mm både horisontalt og vertikalt. [Leica Geosystems, 2019].

Denne sammenhæng er bekræftet af Leica pr. mail, se Appendix D. På baggrund her af anvendes sættes 'Centreringsspredning prisme' til 1 mm. Fejlbidraget fra 'Centreringsspredning, prisme' påvirker både horisontalt og vertikalt. Men i udjævningsprogrammet GeoAdjust har prismets centreringsspredning kun vertikal indflydelse, da dette er tænkt som 'target centering error'. For at afspejle prismets centreringsspredning på horisontalt og vertikalt, inkluderes det vertikale fejlbidrag gennem parameteren 'Spredning på sigteskivehøjde'. Appriori-værdierne der anvendes i testnetene er opsummeret i tabel 5.1

| Parameter                             | Standardkonfiguration                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fixpunkter                            | 4 fixpunkter placeret 200 m fra landfæstet.                                                                                                                                    |
| Opstilling                            | 2 opstillinger, placeret på hhv. pille 1 og pille 4.                                                                                                                           |
| Fixpunktspredning                     | Sættes så den afspejler de testede fixpunkter. Se mere i Appendix E.                                                                                                           |
| Præcision af instrument               | TS30 (Hz og V:0.15 mgon, Afs. 0.6 mm +1 ppm) [Leica Geosystems, 2009].                                                                                                         |
| Antal satser                          | 2, jf. kravsspecifikationen.                                                                                                                                                   |
| Centreringsspredning, instrument      | Ikke relevant i frie opstillinger.                                                                                                                                             |
| Centreringsspredning, prisme          | 1 mm [Leica Geosystems, Ukendt år].                                                                                                                                            |
| Spredning på $ppm_a$                  | Sættes ikke i GeoAdjust.                                                                                                                                                       |
| Spredning på refraktionskoefficienten | 0.13                                                                                                                                                                           |
| Spredning på instrumenthøjde          | Ikke relevant i frie opstillinger.                                                                                                                                             |
| Spredning på sigteskivehøjden         | Prismet er fastmonteret, og bør derfor ikke flytte sig. Denne fejkategori anvendes i testnettene til at inkludere det vertikale fejlbidrag fra 'Centreringsspredning, prisme'. |

**Table 5.1.** Standardopsætning til testnet

## 5.6 Parametre der testes

I afsnit 4.4 blev det udledt hvilke parametre der påvirker kvaliteten i et netværk. I dette afsnit udvælges hvilke af disse parametre, der vurderes at være relevante at teste til designet af et monitoringsnetværk til Lillebæltsbroen. Alle parametrene tages i betragtning, hvorefter nogle parametre fravælges med argumentationen som fremgår af tabel 5.2.

| Parameter                             | Test | Argument for fravalg                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fixpunkter - placering                | +    | Hvilke detailpunkter der skal måles er fastlagt i kravsspecifikationen, og varieres derfor ikke.                                                                                                                                                                                                            |
| Fixpunkter - antal                    | +    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Opstilling - placering                | +    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Opstilling - antal                    | +    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Detailpunkt                           | -    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Observationstype                      | -    | Det er fastlagt at der anvendes totalstation, dvs observationerne er skråafstand, horisontalretning og vertikalvinkel.                                                                                                                                                                                      |
| Præcision af instrument               | +    | Der laves frie opstillinger.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Antal satser                          | +    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Centreringsspredning, instrument      | -    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Centreringsspredning, prisme          | -    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Spredning på $ppm_a$                  | -    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Spredning på refraktionskoefficienten | -    | Fejlbidraget er med det forventede udstyr 1 mm (beskrevet i afsnit 5.5), hvilket er relativt lavt.                                                                                                                                                                                                          |
| Spredning på instrumenthøjde          | -    | Dette fejlbidrag kan jf.[Jensen, 2020, s. 13] negligéers såfremt temp. og tryk kan bestemmes med en spredning på min. 1° og 10 mbar. Hvilket er opfyldt, da det forventes at anvendes tryk og temperatur målinger fra vejrstationen der indgår i den eksisterende permanente monitorering. [Vaisala, 2014]. |
| Spredning på sigteskivehøjden         | -    | Der laves frie opstillinger.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                       | -    | Prismet er ved permanent monitorering fastmonteret, hvilket betyder at sigteskivehøjden ikke er relevant.                                                                                                                                                                                                   |

**Table 5.2.** Opsummering af argumenter for hvilke parametre der vurderes ikke at være relevante at teste i eksperimentet. "-" angiver at paramenteret er fravalgt at teste, hvorefter argumentationen fremgår af 3. kolonne.

Dette betyder at indflydelsen af følgende parametre undersøges gennem testnet:

1. Fixpunkter - placering
2. Fixpunkter - antal
3. Opstilling - placering
4. Opstilling - antal
5. Præcision af instrument
6. Antal satser

I eksperimentet analyseres disse parametre hver for sig, da test af kombineret af parametrene vil resultere i ekstremt mange testnet. Denne metode medfører at potentielle krydsede effekter af parametrene, ikke identificeres ved denne analyse.

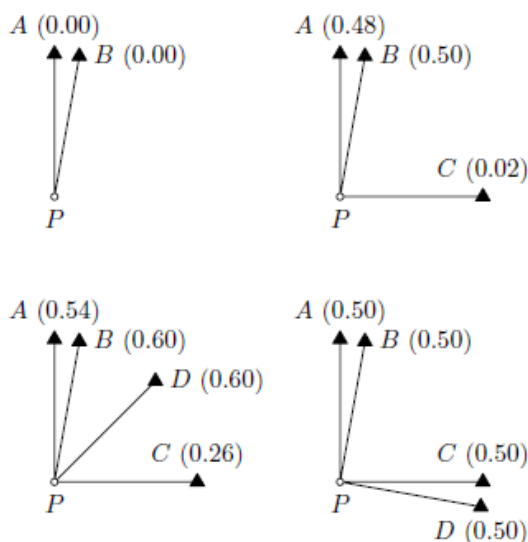
Herefter undersøges hvilke værdier/konfigurationer der er relevante at teste til hver af parametrene. Valget af hvilke værdier/konfigurationer der testes søges, i vides muligt omfang at findes i teori, da teorien bidrager med at afgrænse til relevante test. Den anvendte teori inkluderes i de følgende afsnit til de relevante parameter. For at kunne identificere hvert af de enkelt testede netværk, tildeles parametrene et bogstav, og hver af de værdier/konfigurationer der testes tildeles et tal. Dermed har hver netværk en unik kode, hvor fx A4 henviser til test af 'Fixpunkter - placering', den 4. testede værdi.

### 5.6.1 A: Fixpunkter - placering

I monitoringsnetværk opnås den mindste usikkerhed af detailpunkterne, når fixpunkterne er fordelt omkring detailpunkterne [Horemuž and Jansson, 2017, s. 6-7]. På baggrund af bindingerne nævnt i afsnit 5.2, er mulighederne for variation i placeringen af fixpunkterne kun langs kysten. Detailpunkterne som ønskes at omkranse af fixpunkterne, ligger på broen, der dermed bliver center af den ønskede geometri. For at opnå netværk der er symmetrisk omkring detailpunkterne, vurderes placeringen af fixpunkter ud fra afstanden til broen. Hertil gøres opmærksom på at kvaliteten ikke bliver ikke fuldstændig symmetrisk af dette, da spredningerne på fixpunkterne er højere på højre side af broen (se appendix E).

Indflydelsen af fixpunkternes placering, testes ved at beregne testnet på netværk der indeholder 4 fixpunkter der er placeret med varierende afstand til broen. På baggrund af beregningen af fixpunktsspredningen til stadartopsætningen, vides at præcisionen af målingerne falder væsentligt når fixpunkterne placeres mere end 600 m fra broen (se Appendix E). Derfor vælges at teste netværk hvor fixpunkterne er placeret op til 600 m fra broen.

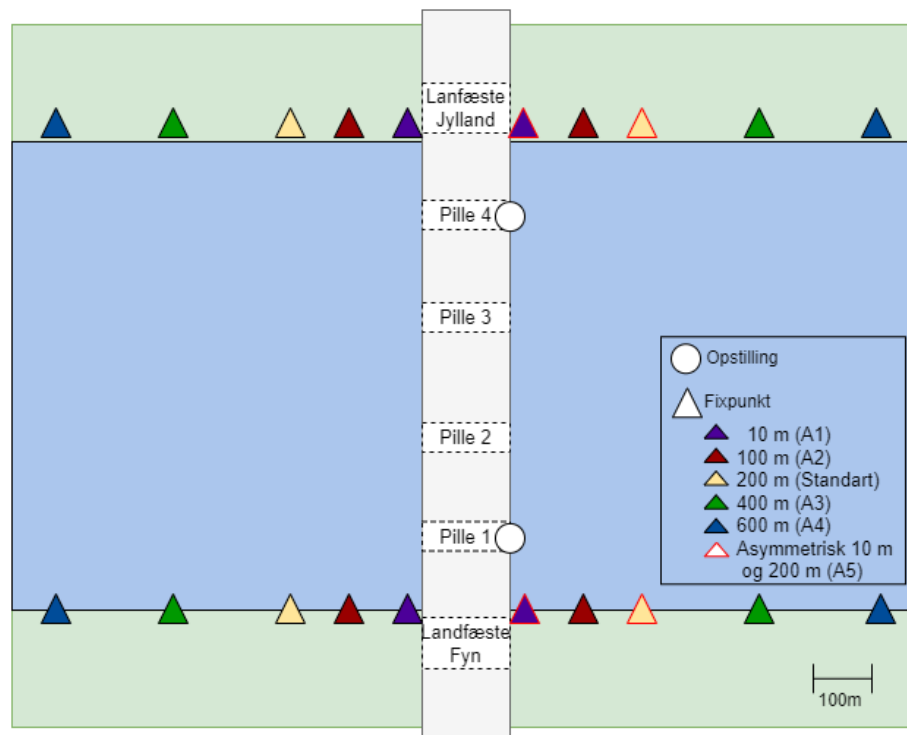
I et pålideligt netværk bør observationerne kontrollere hinanden parvist [Cederholm, 2000, s.105]. Denne teori vedrører oprindeligt bestemmelse af detailpunkter, men overføres her til fixpunkter. I de symmetriske netværk opnås dette ved en ligelig fordeling af fixpunkterne. Men parvis kontrol af observationerne kan også opfyldes med fixpunkter på samme side, efter konceptet illustreret på skitsen nederst til højre på figur 5.5. Et asymmetrisk netværk åbner for flere muligheder ved den praktiske etablering, derfor testes et asymmetrisk netværk.



**Figure 5.5.** Indflydelsen af parviskontrol på redundans [Cederholm, 2000, s.105]

Følgende placeringer af fixpunkter testes, og er også illustreret på figur 5.6:

- A1: 10 m
- A2: 100 m
- Standard: 200 m
- A3: 400 m
- A4: 600 m
- A5: Asymmetrisk 10 m og 200 m



**Figure 5.6.** Skitsering af de 5 netværk, samt standardopsætningen, der indgår i test af parameter A "Placering af fixpunkter". Farverne på trekanterne illustrerer hvilke fixpunkter der indgår i samme netværk.

### 5.6.2 B: Fixpunkter - antal

Antallet af fixpunkter øger præcisionen af bestemmelsen af opstillingen. Forbedringen af nøjagtigheden mellem 2 og 10 fælles punkter er mere end 5% pr. ekstra punkt. Derefter reduceres den procentvise forbedring pr. punkt der tilføjes, og ved over 30 fixpunkter, er nøjagtighedsforbedringen kun 1% pr. ekstra fixpunkt.[Horemuz and Andersson, 2011, s. 685-686]. Med dette udgangspunkt vælges indflydelsen af antallet af fixpunkter, at testes ved at udfører testnet med:

- Standard: 4 fixpunkter 200 m fra broen
- B1: 2 fixpunkter
- B2: 4 fixpunkter
- B3: 6 fixpunkter
- B4: 10 fixpunkter

Placering og antal af fixpunkter kan ikke adskilles fuldstændig, idet det vil være flere muligheder for placeringen af fx 6 fixpunkter. Efter testen af 'Fixpunkter - placering' er der fundet den maksimale afstand fixpunkter bør placeres i. Denne anvendes som den maksimale afstand, hvor fixpunkterne fordeles jævnt inden for den valgte afstand. Viser det sig at fixpunkter fint kan placeres 400 m fra broen, vil de hhv. 2, 4, 6 og 10 fixpunkter blive fordelt jævnt ind for denne afstand. Derfor vil test B2 blive magen til en af testene i A, men det vides endnu ikke hvilken.

Da denne afstand ikke kendes før test A er afsluttet, er skitseringen af netværkene på figur 5.7 et eksempel hvor fixpunkterne er fordelt inden for en afstand af 400 m fra broen.

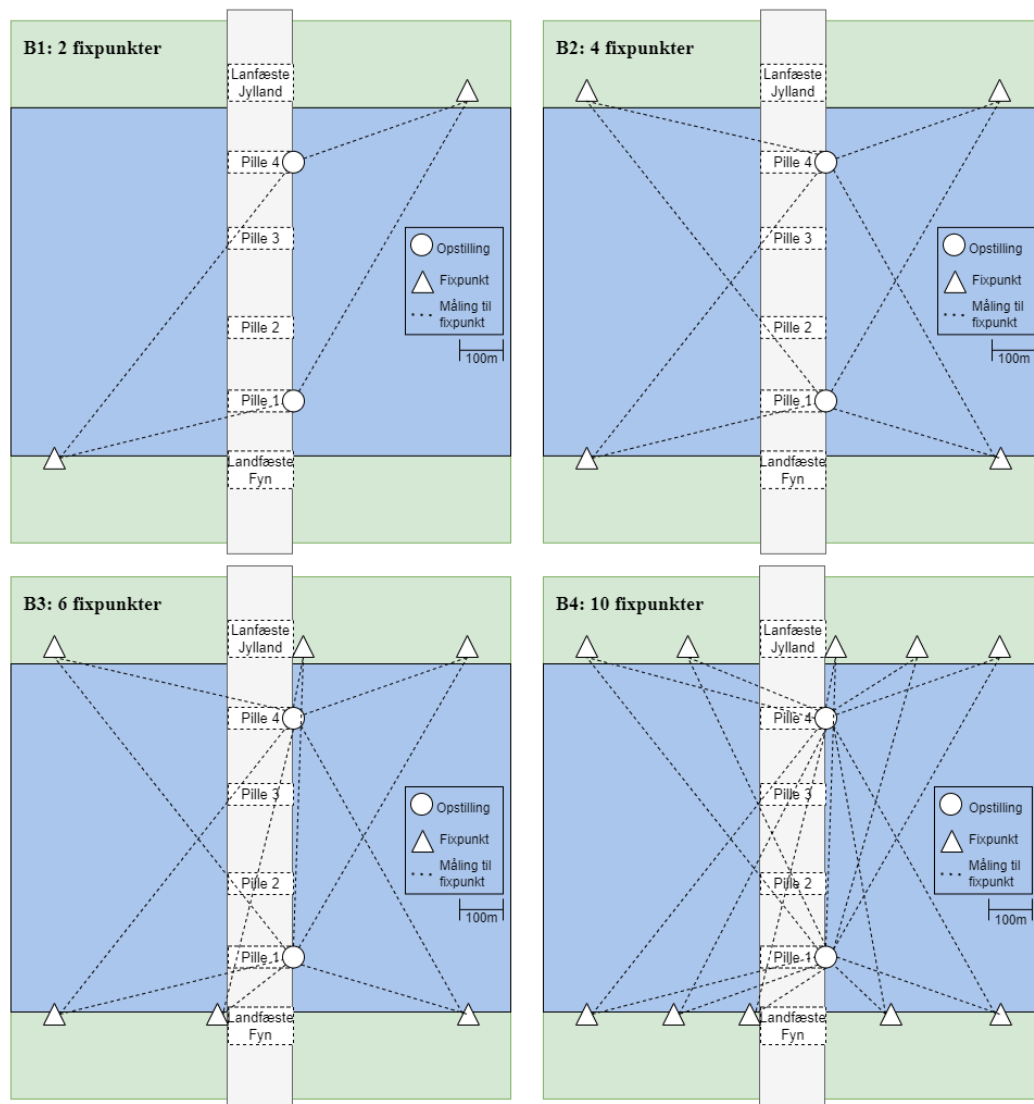


Figure 5.7. Skitsering af netværk vedrørende test af parameter B, "Antal fixpunkter".

### 5.6.3 C: Opstillinger

I forhold til den plane placering af opstillingen, opnås den lavest laveste usikkerhed for bestemmelse af opstillingen, ved placering i centrum af det areal fixpunkterne udspænder [Horemuz and Jansson, 2017, s. 7]. I forhold til den vertikal placering af opstillingen, påvirker

højdeforskellen imellem opstillingen og fixpunkterne, den vertikale usikkerhed for bestemmelsen af opstillingen på mikrometer niveau. Denne indflydelse kan negligeres sammenlignet med andre usikkerheder ved totalstations opmåling, hvilket betyder at den vertikale placering af fixpunkterne ikke er væsentlig. Årsagen til at den vertikale bestemmelse af opstillingen ikke er bedst bestemt i centrum, er at usikkerheden på distancemålingen har større indflydelse end usikkerheden på vertikal vinklen. Dette er dog instrumentafhængigt.[Amin Alizadeh-Khameneh et al., 2018, s. 6-7].

Ud fra dette teoretiske fundament, prioriteres det at anvende opstillinger der er centeret i forhold til fixpunkterne. Idet fixpunkterne jf. bindingerne, kun kan placeres langs kysten, vil centrum af det areal fixpunkterne udspænder, være på broen. Af denne årsag afgrænses der til opstillinger på bropillerne. Afgrænsingen til opstillinger placeret på bropillerne, indsnævre variationsmulighederne for opstillinger væsentligt, og der vælges derfor at slå "Opstillinger - placering" og "Opstillinger - antal" sammen til ét parameter.

I forhold til antallet af opstillinger i netværket, er udstyret i permanent monitoring er fastmonteret. Derfor betyder en forøgelse af antallet af opstillinger, indkøb af én totalstation pr. opstilling, hvilket medfører, at antallet af opstillinger er et parameter, der er økonomisk omkostningsfuldt at øge i et monitoringsnetværk sammenlignet med et almindeligt netværk, hvor udstyret kan flyttes. Af hensyn til at nå et optimum, hvilket som beskrevet i afsnit 4.1, er at indfri præcision og pålidelighedskrav til lavest økonomiske omkostninger, forsøges det med få opstillinger.

Kravet vedrørende måling af detailpunkter, er jf. afsnit 3.5, at der måles til minimum ét eksisterende detailpunkt på hver pille samt landfæster, og meget gerne flere. Med udgangspunkt i sigtelinjerne beskrevet i afsnit 5.3, er den minimal måde hvorpå dette kan opfyldes, 2 opstillinger på hhv. pille 1 og pille 4. Derfor testes det i testnet med 2, 3, 4 opstillinger, ved to og tre opstillinger testes med placering på forskellige piller, hvilket giver følgende test. Testene er også skitseret på figur 5.8.

- 2 opstillinger (P1, P4) (Standardopsætningen)
- C1: 3 opstillinger (P1, P2, P4)
- C2: 3 opstillinger (P1, P3, P4)
- C3: 4 opstillinger (P1, P2, P3, P4)

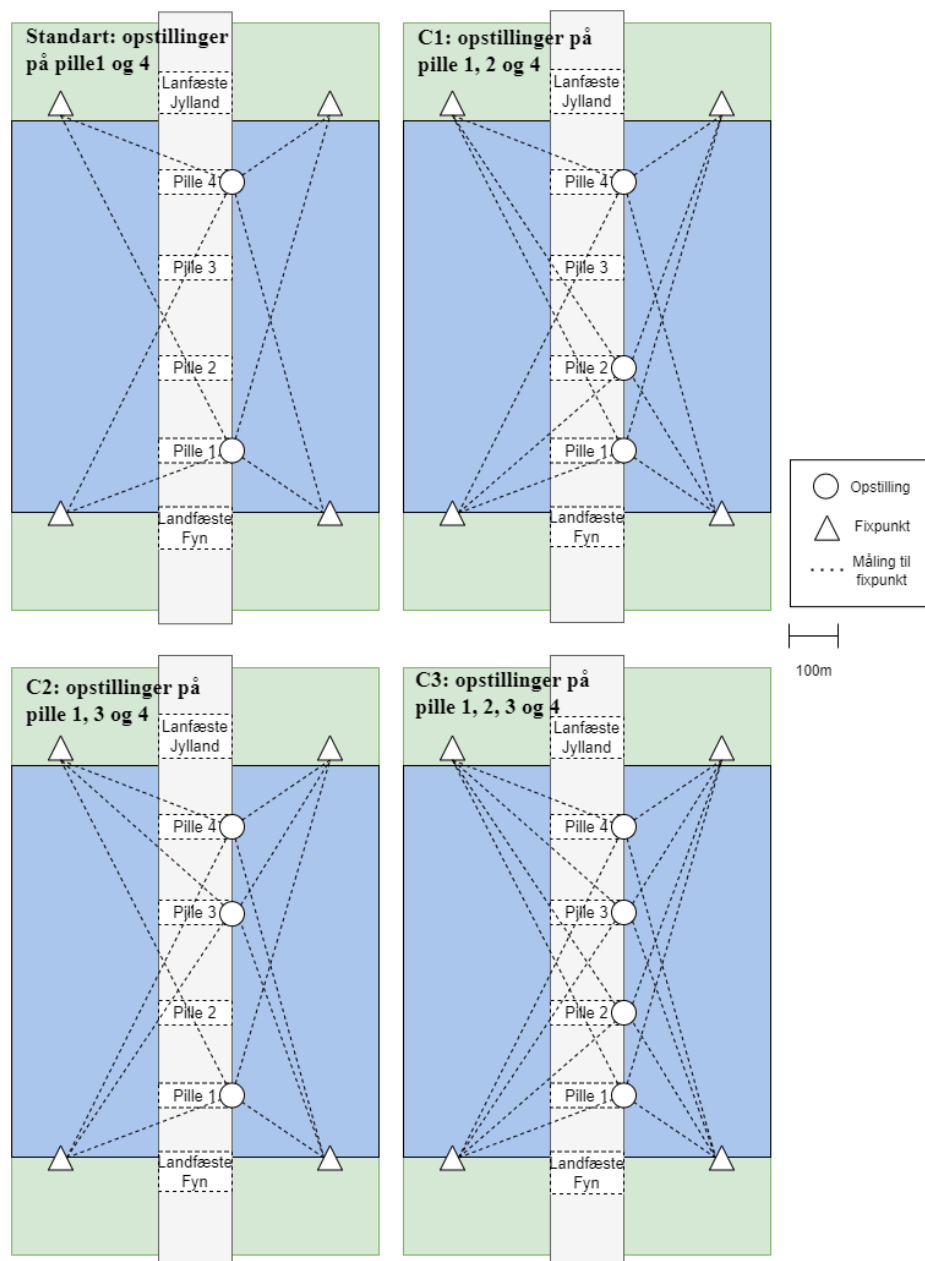


Figure 5.8. Skitsering af netværk der indgår i test af parameter C "Opstillinger".

#### 5.6.4 D: Præcision af udstyr og antal satser

Antal satser og præcisionen af instrumentet påvirker begge vægtningen. Præcisionen af instrumentet forbedre den enkelte måling, hvorimod det at måle flere satser øger antallet af antallet af overbestemmelser. Derved kan ringere instrumenter i et vist omfang kompenseres med flere satser. Derfor vælges at teste kombinationer af antal satser og instrumenter. I forhold til et monitoringsnetværk, er fordelene ved at opnå en højere præcision ved at øge antallet af satser, at dette ikke medfører økonomiske merudgifter.

I forhold til instrumenter undersøges der med udgangspunkt i to forskellige totalstationer, TS16 og TS30, hvor specifikationerne fremgår af tabel 5.3. Derudover er priserne på de to instrumenter inkluderet i tabellen, da de økonomiske omkostninger indgår i

optimalitetsvurderingen. TS30 er 26% dyre end TS16.

|      | Hz og V   | Afstand       | Pris        |
|------|-----------|---------------|-------------|
| TS16 | 0.3 mgon  | 1 mm +1 ppm   | ca. 230.000 |
| TS30 | 0.15 mgon | 0.6 mm +1 ppm | ca. 290.000 |

**Table 5.3.** Instrumenter og deres præcision

En forøgelse af antallet af satser, øger som sagt antallet af overbestemmelser og sænker dermed spredningen med  $\sqrt{n}$ , hvor  $n$  er antal observationer (se ligning 5.1). Deraf kan det udledes, at den procentvise forbedring pr. sats der tilføjes falder. Derfor vælges at teste med mindre forskel i antal satser, ved få satser end ved mange satser.

$$\sigma_{\bar{A}} = \frac{\sigma_A}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

Ved antal satser teste følgende værdier:

- 2 sats (standardopsætning)
- 3 sats
- 5 sats
- 8 sats

Når de 2 instrumenter og 4 satsværdier kombineres, udføres der 8 test vedrørende vægtningen af observationerne. Disse kombinationer og deres navngivning fremgår af tabel 5.4.

|      | 2 satser | 3 satser | 5 satser | 8 satser |
|------|----------|----------|----------|----------|
| TS16 | D1.TS16  | D2.TS16  | D3.TS16  | D4.TS16  |
| TS30 | Standard | D2.TS30  | D3.TS30  | D4.TS30  |

**Table 5.4.** Testkombination med instrumenter og antal af satser

## 5.7 Vurderingskriterier

Formålet med projektet er at udarbejde et netværk der kan opfylde kravsspecifikationen præsenteret i afsnit 3.5. For at kunne vurdere om netværkene beregnet i testnettene overholder kravsspecifikationen, oversættes kravene vedrørende kvalitetsmålt til informationer der beregnes ved testnet, disse kaldes vurderingskriterier. I vurderingen indgår der kun kvaliteten af detailpunkterne.

Kravsspecifikationen indeholde følgende tre kvalitetskrav til bestemmelse af plane koordinater og koter:

1. Punktmiddelfejl maks. 2 mm
2. Kotespredning maks. 2 mm
3. Normaliserede residual på den enkelte måling maks. 3.0.

Herunder uddybes hvordan de tre kvalitetskrav vil blive vurderet i henhold til testnetten. Testnettene forventes beregnet i udjævningsprogrammet GeoAdjust, ved opstilling af vurderingskriterierne tager der udgang punkt i hvilke oplysninger der beregnes i de konkrete program.

### 5.7.1 Punktmiddelfejlen

Punktmiddelfejlen på det enkelte punkt maksimalt 2 mm, hvilket beregnes således:

$$M_P = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \quad (5.2)$$

Ved beregningen af testnet estimeres den forventede spredningen i X- og Y-retningen til hvert punkt. Herudfra beregnes punktmiddelfejlen med formel 5.2. Til hver testnet noteres antallet af detailpunkter med punktmiddelfejl  $> 2$  mm, da det er nøjagtighedskravet fra kravsspecifikationen. Derudover beregnes den gennemsnitlige punktmiddelfejl. Dette er ikke udledt af kravspecifikationene, med inkluderes i vurderingen, idet denne værdi giver et indblik i nettets generelle nøjagtighed.

### 5.7.2 Kotespredning

Beregningen af testnet indeholder ligeledes et estimat for spredningen på koten til hvert punkt, og dette krav vurderes derfor med antal detailpunkter med spredning på koten  $> 2$  mm. Derudover beregnes den gennemsnitlige kotespredning lige som ved punktmiddelfejlen.

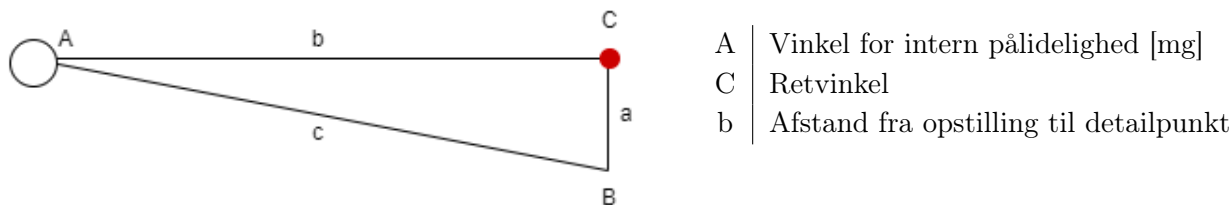
### 5.7.3 Grove fejl

Jævnfør kravspecifikation i afsnit 3.5 må det normaliserede residual på den enkelte måling maksimalt være 3.0 og andelen af målinger med normaliserede residual  $> 2.0$ : maks. 5%. Det normaliserede residual kan ikke vurderes i testnet, idet der i testnet ikke er observationer, og dermed ikke rettelser. Derved kan dette krav ikke vurderes direkte i testnet.

Hensigten med kravet til er at sikre mod grove fejl, og derfor vurderes på pålideligheden af netværkene, da pålideligheden, som beskrevet i afsnit 4.2, indikerer i hvor høj grad grove fejl i nettet kan opdages. Ved at sikre en tilstrækkelig pålidelighed i netværket, styrkes muligheden for at opdage grove fejl.

Pålideligheden vurderes ud fra redundanstal ( $\rho$ ), intern pålidelighed (IP) og ekstern pålidelighed (EP). Ved hver af de tre pålidelighedsmål vurderes der, ligesom ved nøjagtigheden, både på gennemsnitsværdien for netværket og værdien for den enkelte observation. Redundans tallet bør jf. Cederholm [2000, s. 108] være minimum 0.5 for den enkelt observation i afstands- og retningsnet, og 0.5 for netværkets gennemsnitlige redundanstal. Derfor noteres der til hver af testnettene antal observationer med redundanstal  $< 0.5$ .

Den interne pålidelighed vurderes jf. Caspary [2000, s. 93-94] på den gennemsnitlige og den maksimale værdi for hhv. afstandsmåling, horisontalretning og vertikalvinkel. Den maksimale værdi forstås som, værdi med størst afvigelse fra 0. I testnet-beregningen gennem GeoAdjust angives den interne pålidelighed for afstandsmålingen i mm, mens IP for horisontalretningen og vertikalvinklen angives i mg. IP som vinkel fortæller i midlertidig ikke ret meget om indflydelsen på detailpunktet, da det samtidig afhænger af afstanden. Derfor omregnes IP fra vinklen til indflydelse på detailpunktet i mm gennem trigonometri, se figur 5.9 for konceptskitse. Af figur 5.9 kan det udledes af det er a der ønskes beregnet.



**Figure 5.9.** Skitsering af beregning af IP som mm. Den sorte cirkel viser opstillingens placering, mens den røde prik er detailpunktet.

Omregningen fra mg til mm foretages efter følgende formel:

$$a = (\sin(A) * b) / \sin(B) \quad (5.3)$$

$$IP_{ver}[mm] = \frac{\sin((IP_{hor}[mg]/1000) * (\pi/200)) * (Afstand[m] * 1000)}{\sin((200 - 100 - (IP_{hor}[mg]/1000)) * (\pi/200))} \quad (5.4)$$

Den maximale eksterne pålidelighed (EP) er indikation for hvor meget 'lige akkurat grove fejl' i værste fald påvirke den ubekendte, hvilket efterfølgende kaldes deformation. Den ubekendte er i denne sammenhæng en koordinat. Vaníček et al. [2001] argumenterer for, at det er relevant at vurdere et netværk på den største potentielle deformation for hvert punkt. Dette afspejler netværkets svageste punkt, og et netværk er ikke stærkere end netværkets svageste led [Vaníček et al., 2001, s. 203].

EP max repræsenterer den værst tænkelige deformation. Derudover ønskes at inkludere et vurderingskriterie for en mere "sandsynlig" deformation. I dette projekt anvendes en grovfejlsgænse på 3 standardafvigelse, svarende til et 99,7% konfidensinterval. Da GeoAdjust angiver det nærmeste tilsvarende konfidensinterval som værende 95%, benyttes dette. Denne værdi beskriver det højeste værdi i 95% fraktil, og dermed hvor meget en 'lige akkurat grove fejl' i 95% af tilfældene maksimalt vil påvirke en koordinat.

Vurderingskriterierne opsummeres i tabel 5.5.

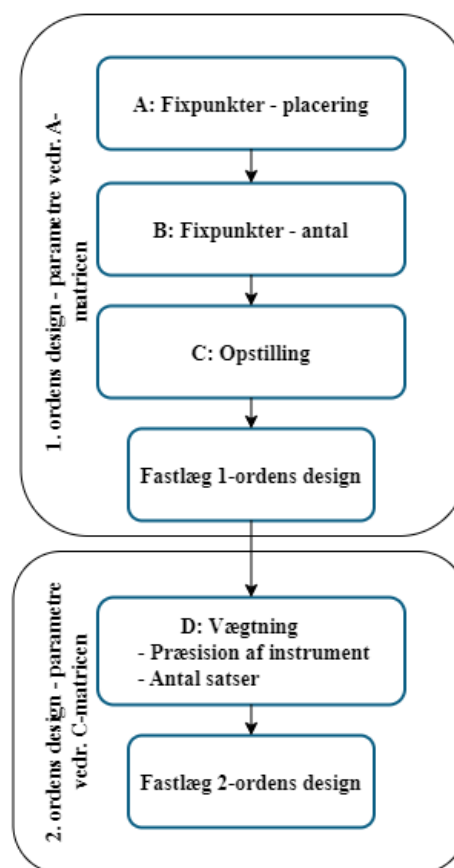
|              | Vurderingskriterier    | Formål                        | Kommer fra                                   |
|--------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl  | Nøjagtighed, nettet generelt  | Eget                                         |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm | Nøjagtighed, den enkelte obs  | Kravsspecifikation                           |
|              | Gens. kotemiddelfejl   | Nøjagtighed, nettet generelt  | Eget                                         |
|              | Kotemiddelfejl > 2 mm  | Nøjagtighed, den enkelte obs  | Kravsspecifikation                           |
| Pålidelighed | $\rho$ gennemsnit      | Global pålidelighed           | Eget, baseret på krav vedr. ingen grove fejl |
|              | $\rho < 0.5$           | Pålidelighed, den enkelte obs |                                              |
|              | IP gens.               | Pålidelighed                  |                                              |
|              | IP max                 | Pålidelighed                  |                                              |
|              | EP max [mm]            | Pålidelighed                  |                                              |
|              | EP 95% fraktil [mm]    | Pålidelighed                  |                                              |

**Table 5.5.** Vurderingskriterier til testnettene

## 5.8 Fremgangsmåde

Overordnede set udføres eksperimentet i kronologisk rækkefølge fra parameter A-D. Parametrene er grupperet i to etaper, hvilket også er illustreret på figur 5.10. Først analyseres indflydelsen af parametre der indgår i 1. ordensdesignet, dvs. A, B og C. Den konkrete analysestrategi præsenteres i afsnit 5.8.1. Ud fra konklusionerne vedrørende hver af parameter A-C's indflydelse på kvaliteten i netværk, udarbejdes et 1. ordensdesign. Dette 1. ordensdesign anvendes fremadrettede som standardopsætning. Ved at fastlægge 1. ordens designet, inden 2. ordens designet analyseres, reduceres antallet af testkombinationer. Derefter analyseres indflydelsen af parametre med relation til C-matricen, på det valgte 1-ordens design. Analysen af indflydelsen af parameter C danner grundlag for 2. ordens designet. Dette forslag til et netværksdesign, beregnes gennem testnet, for at kunne konkludere om kvaliteten af det endelige netværk forventes at kunne overholde kravsspecifikationen.

De konkrete værdier der anvendes til at analysere hvert af parametrene, fremgår af tabel 5.6.



**Figure 5.10.** Den overordnede fremgangsmåde for eksperimentet af parametrenes indflydelse på kvaliteten i netværk.

|                             | Parameter              | Standard | 1        | 2          | 3          | 4              |
|-----------------------------|------------------------|----------|----------|------------|------------|----------------|
| A                           | Fixpunkter - placering | 200 m    | 10 m     | 100 m      | 400 m      | 600 m          |
| B                           | Fixpunkter - antal     | 4        | 2        | 4          | 6          | 10             |
| C                           | Opstilling             | P1, P4   | P2, P3   | P1, P2, P4 | P1, P3, P4 | P1, P2, P3, P4 |
| 1. ordens design fastlægges |                        |          |          |            |            |                |
| D                           | Vægtning               | TS16     | 2 satser | 3 satser   | 5 satser   | 8 satser       |
|                             |                        | TS30     | 2 satser | 3 satser   | 5 satser   | 8 satser       |
| 2. ordens design fastlægges |                        |          |          |            |            |                |

**Table 5.6.** Oversigt over test der udføres i eksperimentet.

### 5.8.1 Analysestrategi for de enkelte parameter

Ved parameter A, beregnes der testnet for de fire netværk der fremgår af tabel 5.6. Testnettene beregnes i GeoAdjust. Derefter beregnes værdier for vurderingskriterierne, hvordan disse beregnes fremgår af tabel 5.7. Denne beregning foretages i Matlab, se skabelon for beregninger ved hver testnet i: Zipfil \5.Eksperimentdesign \Template.m. Udover kvantificeringen af vurderingskriterierne, analyseres der hvilke punkter eller observationer der foresager en enten høj eller lav værdi til vurderingskriterierne.

|              | Vurderingskriterier         | Standard | A1 | A2 | A3 | A4 |
|--------------|-----------------------------|----------|----|----|----|----|
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm]  |          |    |    |    |    |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [·]  |          |    |    |    |    |
|              | Gens. kotemiddelfejl [mm]   |          |    |    |    |    |
|              | Kotemiddelfejl > 2 mm [·]   |          |    |    |    |    |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [·] |          |    |    |    |    |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [·] |          |    |    |    |    |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [·] |          |    |    |    |    |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [·]      |          |    |    |    |    |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [·]      |          |    |    |    |    |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [·]      |          |    |    |    |    |
|              | IP gens. afs [mm]           |          |    |    |    |    |
|              | IP gens. hor [mm]           |          |    |    |    |    |
|              | IP gens. ver [mm]           |          |    |    |    |    |
|              | IP afs. max [mm]            |          |    |    |    |    |
|              | IP hor.. max [mm]           |          |    |    |    |    |
|              | IP ver. max [mm]            |          |    |    |    |    |
|              | EP E max [mm]               |          |    |    |    |    |
|              | EP N max [mm]               |          |    |    |    |    |
|              | EP H max [mm]               |          |    |    |    |    |
|              | EP E 95% fraktil [mm]       |          |    |    |    |    |
|              | EP N 95% fraktil [mm]       |          |    |    |    |    |
|              | EP H 95% fraktil [mm]       |          |    |    |    |    |

**Table 5.7.** Skabelon for sammenligning af vurderingskriterierne.

Derefter sammenlignes værdier for vurderingskriterierne på tabelform, hvor hver af parameterets netværk samt standardopsætningen har en kolonne. En skabelon for sammenligningstabellen fremgår af tabel 5.7. Ved IP og EP kan være tilfælde med både positive og negative værdier med lige stor afvigelse fra 0, og derfor kan der ikke nødvendigvis udledes noget af fortegnene i tabellen. Værdierne til vurderingskriterierne farvekategoriseres med; grøn, gul og rød for at vise om netværket overholder vurderingskriterierne, kategorierne fremgår af tabel 5.8 Værdier der er "grønne" farves ikke i tabellerne. Der fastsættes ikke grænser for IP og EP.

|              | Vurderingskriterier        | Rød    | Gul     | Grøn  |
|--------------|----------------------------|--------|---------|-------|
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm] | > 2 mm | 1.7-2   | > 1.7 |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm     | > 0    |         |       |
|              | Gens. kotemiddelfejl       | > 2 mm | 1.7-2   | > 1.7 |
|              | Kotemiddelfejl > 2 mm      | > 0    |         |       |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit    | > 0.5  | 0.5-0.7 | > 0.7 |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit    | > 0.5  | 0.5-0.7 | > 0.7 |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit    | > 0.5  | 0.5-0.7 | > 0.7 |
|              | Antal $\rho_{afs} < 0.5$   | > 0    |         |       |
|              | Antal $\rho_{hor} < 0.5$   | > 0    |         |       |
|              | Antal $\rho_{ver} < 0.5$   | > 0    |         |       |
|              |                            |        |         |       |

**Table 5.8.** Farvekategoriseringer til vurderingskriterier.

Med udgangspunkt i sammenligningstabellen, udledes hvilken indflydelse det pågældende parameter har på kvaliteten, samt ved hvilke værdi kravsspecifikationen kan overholdes.

Denne fremgangsmåde følges ved analyse af hvert af parametrene A-D.

## 5.9 Opsamling

Der er i dette kapitlet udarbejdet en konkret fremgangsmåde til eksperimentet. Eksperimentet skal anvendes til at analysere følgende parametres indflydelse på kvalitet i et monitoringsnetværk på Lillebæltsbroen;

- (A) Fixpunkters placering
- (B) Fixpunkters antal
- (C) Opstillinger
- (D) Vægtning - præcision af instrument og antal satser

Indflydelsen af hvert af disse parametre analyseres ved at teste netværk med forskellige værdier/konfigurationer til hvert parameter. Netværkene sammelignes med en sandartopsætning gennem de opstillet vurderingskriterier, der afspejler kravsspecifikationen. Analysen af hvert parameter afsluttes med at konkludere hvilken indflydelse parlamentet har på kvaliteten af netværket. Derefter anvendes viden vedrørende hvert af parametrene til at udarbejde det netværk der anbefales til den nye permanente monitoring på Lillebæltsbroen. Analysen indeholder test af; 19 netværk vedrørende parametrene (se tabel 5.9), standardopsætning samt 1. ordensdesignet og det anbefalede netværk (efter 2. ordensdesignet).

|                             | Parameter              | Standard | 1        | 2          | 3          | 4              |
|-----------------------------|------------------------|----------|----------|------------|------------|----------------|
| A                           | Fixpunkter - placering | 200 m    | 10 m     | 100 m      | 400 m      | 600 m          |
| B                           | Fixpunkter - antal     | 4        | 2        | 4          | 6          | 10             |
| C                           | Opstilling             | P1, P4   | P2, P3   | P1, P2, P4 | P1, P3, P4 | P1, P2, P3, P4 |
| 1. ordens design fastlægges |                        |          |          |            |            |                |
| D                           | Vægtning               | TS16     | 2 satser | 3 satser   | 5 satser   | 8 satser       |
|                             |                        | TS30     | 2 satser | 3 satser   | 5 satser   | 8 satser       |
| 2. ordens design fastlægges |                        |          |          |            |            |                |

**Table 5.9.** Oversigt over test der udføres i eksperimentet.

# Testnet 6

---

Formålet med dette kapitel er at udføre de planlagte testnet i kapitel 5 og analysere kvaliteten af netværkene. For hvert parameter præsenteres de testede værdier, efterfulgt af en opsummering af værdierne til vurderingskriterierne i tabelform. Alle testnettene kan findes i zipfil: \6.Testnet. Herefter følger en skriftlig analyse af parameteren baseret på:

- Tabellerne 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 med værdier til vurderingskriterier. Datagrundlaget for disse tabeller er resultatfiler fra GeoAdjust og efterfølgende beregning i Matlab, disse filer findes i: zipfil \6.Testnet. Der er oprettede en mappe til hver parameter.
- Analyse af årsager til variationer i værdierne til vurderingskriterier (hvad er spændet af værdier og hvilke observationer foresager de høje værdier?). Findes i Appendix G.
- Beregning af procentvise ændringer. Resultater og grafer findes i Appendix G, beregningsgrundlaget findes i: Zipfil \6.Testnet \Procentberegninger.xlsx.

Efter analysen, opsummeres parameterens indflydelse på kvaliteten af et netværk i en kort konklusion. Som beskrevet i læsevejledningen referes der i dette kapitel gentagende gang til konkrete punktnumre, og der anbefales derfor at printe appendix B.1 og have dette kort liggende fremme sideløbende med læningen.

## 6.1 Standardsetup

Indledningsvis beregnes et testnet for standardsetuppet, da dette er sammenligningsgrundlaget for alle de følgende testnet. Standardopsætningningen består af 2 opstillinger (pille 1 og 4), 4 fixpunkter 200 m fra broen, målt med 2 satser med TS30.

Til stadartopsætningen er der gennem GeoAdjust beregnet en forventede gennemsnitlig fixpunktsspredning på 1.7 mm, 1.8 mm, 1.4 mm for hhv. E, N og H. Beregningen af den forventede fixpunktsspredning findes i: Zipfil \Testnet \Fixpunktsspredninger \Standart.asc.

Værdierne til vurderingskriterierne er opsummeret i tabel 6.1.

### Nøjagtighed

Standardopsætningen overholder, som vist i tabel 6.1 nøjagtighedskravene for punktmiddelfejlen og kotespredningen. Punktmiddelfejlen er ved hovedparten af detailpunkterne 1.56 mm, mens punkt 506 og 606 er bestemt med en punktmiddelfejl på 1.79 [appendix G.1]. At punktmiddelfejlen er højere på disse punkter, skyldes at spredningen på E-koordinaten på disse punkter er 1.3 mm. Hvorimod spredningen på andre detailpunkter er 1.1 mm i både E og N-retningen. Hvilket betyder at 506 og 606 er ringere bestemt i E-retningen end i N-retning, mens de resterende detailpunkter er lige godt bestemt i begge retninger. Undersøges placeringen af disse to punkter er disse detailpunkter placeret på kanten af den geometri fixpunkterne udspænder. Årsagen til at det kun er E-koordinaten som er højere, forventes at være fordi N-koordinaten pga. koordinatsystemets placering, primært bestemmes af afstandsmålingen.

|              | Vurderingskriterier         | Standard |
|--------------|-----------------------------|----------|
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm]  | 1.59     |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [·]  | 0        |
|              | Gens. kotespredning [mm]    | 0.96     |
|              | Kotespredning > 2 mm [·]    | 0        |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [·] | 0.75     |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [·] | 0.75     |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [·] | 0.75     |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [·]      | 0        |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [·]      | 0        |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [·]      | 0        |
|              | IP gens. afs [mm]           | 4.00     |
|              | IP gens. hor [mm]           | 3.72     |
|              | IP gens. ver [mm]           | 3.77     |
|              | IP afs. max [mm]            | 4.00     |
|              | IP hor. max [mm]            | 4.04     |
|              | IP ver. max [mm]            | 4.21     |
|              | EP E max [mm]               | -3.1     |
|              | EP N max [mm]               | -1.7     |
|              | EP H max [mm]               | -2.0     |
|              | EP E 95% fraktil [mm]       | 0.6      |
|              | EP N 95% fraktil [mm]       | 0.5      |
|              | EP H 95% fraktil [mm]       | -0.5     |

**Table 6.1.** Værdier til vurderingskriterier for standardsetuppet. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet\Standart.

## Redundans

Netværkets gennemsnitlige redundanstal er 0.75, hvilket er væsentligt over de anbefalede 0.5 udledt i afsnit 5.7.3. Derover er alle redundanstal på målinger til detailpunkter over 0.5. Derfor vurderes redundansen at være tilfredsstillende ved dette netværk.

## Intern Pålidelighed

Værdien for den interne pålidelighed er generelt ensartede, både indenfor hver af de 3 observationstyper ( afstand, horisontalretning og vertikalvinkel) og påtværs af de tre observationstyper, da alle IP-værdier ligger i spændet 3.40-4.04 mm [appendix G.1]. At værdierne er ensartede viser at netværket har en homogen evne til at opdage grovefejl. Undersøges de mindre variationer der forekommer i IP-værdierne, har detailpunkter der måles fra opstilling på samme bropille som detailpunktet, lavere IP-værdier for horisontalretning og vertikalvinkel, end detailpunkter længere fra opstillingen [appendix G.1]. Dette skyldes at IP er omregnet til mm, hvorved en vinkelfejl får større indflydelse over en længere afstand. Den interne pålidelighed er 4.00 mm for afstandmåling til alle detailpunkter.

## Ekstern pålidelighed

En lige akkurat opdagelig grov fejl kan i dette netværk i værste fald påvirke koordinaterne til detailpunkterne hhv. -3.1, -1.7 og -2.0 mm i E, N og H. Den maximale EP-værdi er for N og H, ens for alle detailpunkterne. Den eksterne pålidelighed for E varierer derimod for detailpunkterne, hvor værdien er lavest for centraltplacerede punkter (218, 318 og 305), og derefter stiger, og er højest på 505 og 606, som er placeret på landfæsterne [appendix

G.1]. Årsagen til samtlige EPmax-værdier er 'observationen' af fixpunktskoordinater, hvilket betyder, at en grov fejl, der kun lige akkurat kan opdages på en fixpunktskoordinat, kan forplante sig op til 3.1 mm til et detailpunkt. Dette betyder, at en grov fejl, der kun lige akkurat kan opdages, vil påvirke koordinaterne for detailpunkterne mest, hvis fejlen opstår ved de oplyste fixpunktskoordinater. Dermed er netværket mindst modstandsdygtigt over for grove fejl, i tilfælde hvor den grove fejl er på fixpunktskoordinaterne.

Undersøges den eksterne pålidelighed for 95% fraktilen (efterfølgende kaldet EP95), ligger dette på op til 0.6 mm, hvilket betyder at en mere "sandsynlig" påvirkning på detailpunkterne er i størrelsesorden op til 0.6 mm. Hvor alle detailpunkter ved EPmax havde samme værdier for N og H, er det ved EP95 E og H der har samme værdier for alle detailpunkter. De højeste EP95-værdier forårsages af afstands, horisontalretning og vertikalvinkels observationer til 118 og 418, hvor EP95 ligger i størrelsesordenen 0.5 mm [appendix G.1]. For de resterende detailpunkter, er EP95-værdierne forårsaget af observationer til fixpunkterne, hvor horisontalretningen påvirker E-koordinaten, afstandsmålingen påvirker N-koordinaten og vertikalvinklen påvirker. Dette skyldes at koordinatsystemet er orienteret langs broen [appendix G.1].

#### Konklusion:

Dette netværk overholder nøjagtighedskravene. Den største påvirkning på detailpunkternes koordinater kan ske ved fejl på fixpunktskoordinater. Indenfor 95% fraktilen kommer der største indflydelse på detailpunkternes koordinater oftest fra observationer til fixpunkterne. Ved korte sigter som til 218 og 418 påvirker afstandsobservationen og horisontalretnings-observationen til detailpunktet op til 0.6 og 0.5 mm på hhv E- og N- koordinaten. Det bemærkes at EP95, dvs. en "sandsynlig fejl" kun har en størrelsesorden på op til  $\pm 0.5$  mm, hvilket er lavt sammenlignet med krav på 2 mm.

## 6.2 A: Fixpunkter - placering

Koordinaterne til følgende fixpunkter er beregnet, ved først at beregne midten af broen ved hver af de to landfæster. Der efter er der trukket fx 400 m fra og lagt 400 m til Y-koordinaten for broen. Foryderligere forklaring og beregning se Appendix F og Matlabsript i: zipfil\6.Testnet \BroensCentrum.m.

#### Analyse:

Nøjagtigheden, af både på plane koordinater og koten, falder når afstanden til fixpunkterne stiger [tabel 6.2]. Punktmiddelfejlen og kotespredningen for de fem testnet vedr. parameter A samt 'Standard' er vist på figur 6.1. Fra 10-200 m der er minimal forskel mellem de tre netværk A1, A2 og Standard, både ift. punktmiddelfejl og kotespredning. Fra 200 m stiger særligt kotespredning med afstanden, hvilket kan ses af figur 6.1. Punktmiddelfejlen stiger kun 0.17 mm fra 10 til 600 m, dette stigning skyldes spredningen på N der stiger med afstanden, mens spredningen på E forbliver på samme størrelsesorden [Appendix G.2].

Kravsspecifikationen kan ved 600 m (scenarie A4) ikke længere overholdes, fordi spredningen på koterne er over 2 mm jf. tabel 6.2. Det asymmetriske netværk A5 placerer sig ift. nøjagtighed mellem Standard og A3. Dermed svækker en asymmetrisk netværksgeometri nøjagtigheden sammenlignet med 'Standard', men overholder uden problemer kravsspecifikationen.

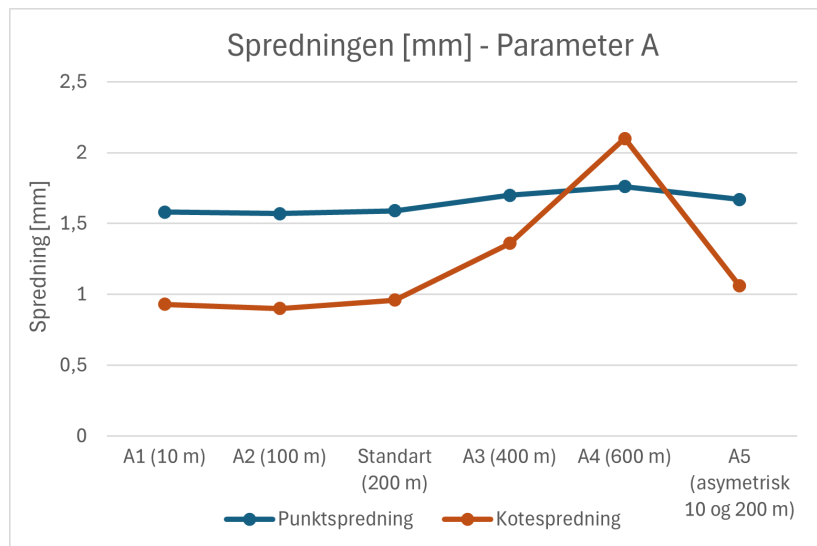
|              | Vurderingskriterier                             | Standard<br>200 m   | A1<br>10 m          | A2<br>100 m         | A3<br>400 m         | A4<br>600 m         | A5<br>Vestlig side<br>af broen, 10<br>m og 200 m |
|--------------|-------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------------------|
|              | Anvendt fixpunks-<br>spredning<br>(E, N, H)[mm] | 1.8<br>1.55<br>0.98 | 1.75<br>1.50<br>1.0 | 1.75<br>1.45<br>0.9 | 1.85<br>1.9<br>1.45 | 1.8<br>2.15<br>2.33 | 1.70<br>1.78<br>1.20                             |
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl<br>[mm]                   | 1.59                | 1.58                | 1.57                | 1.70                | 1.76                | 1.67                                             |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm<br>[.]                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                                                |
|              | Gens. kotespredning<br>[mm]                     | 0.96                | 0.93                | 0.90                | 1.36                | 2.10                | 1.06                                             |
|              | Kotespredning > 2 mm<br>[.]                     | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 9/9                 | 0                                                |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [.]                     | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                                             |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit[.]                      | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                                             |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [.]                     | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                | 0.75                                             |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [.]                          | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                                                |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [.]                          | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                                                |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [.]                          | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                                                |
|              | IP gens. afs [mm]                               | 4.00                | 4.00                | 4                   | 4.00                | 4.00                | 4.00                                             |
|              | IP gens. hor [mm]                               | 3.72                | 3.72                | 3.72                | 3.72                | 3.72                | 3.72                                             |
|              | IP gens. ver [mm]                               | 3.77                | 3.77                | 3.77                | 3.77                | 3.77                | 3.77                                             |
|              | IP afs. max [mm]                                | 4.00                | 4.00                | 4.00                | 4.00                | 4.00                | 4.00                                             |
|              | IP hor. max [mm]                                | 4.04                | 4.04                | 4.04                | 4.04                | 4.04                | 4.04                                             |
|              | IP ver. max [mm]                                | 4.21                | 4.21                | 4.21                | 4.21                | 4.21                | 4.21                                             |
|              | EP E max [mm]                                   | -3.1                | -3.2                | -3.7                | -2.8                | -2.4                | -2.8                                             |
|              | EP N max [mm]                                   | -1.7                | -1.3                | -1.3                | -1.9                | -2.3                | -1.9                                             |
|              | EP H max [mm]                                   | -2.0                | -1.8                | -1.8                | -2.9                | -4.1                | -2.6                                             |
|              | EP E 95% fraktil [mm]                           | 0.6                 | 0.6                 | 0.6                 | -0.8                | -0.8                | 0.4                                              |
|              | EP N 95% fraktil [mm]                           | 0.5                 | -0.5                | -0.5                | -0.5                | -0.5                | -0.5                                             |
|              | EP H 95% fraktil [mm]                           | -0.5                | -0.4                | -0.4                | -0.9                | -1.5                | -0.5                                             |

**Table 6.2.** Parameter A: Fixpunkter - placering. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet \A\_FixPlacering.

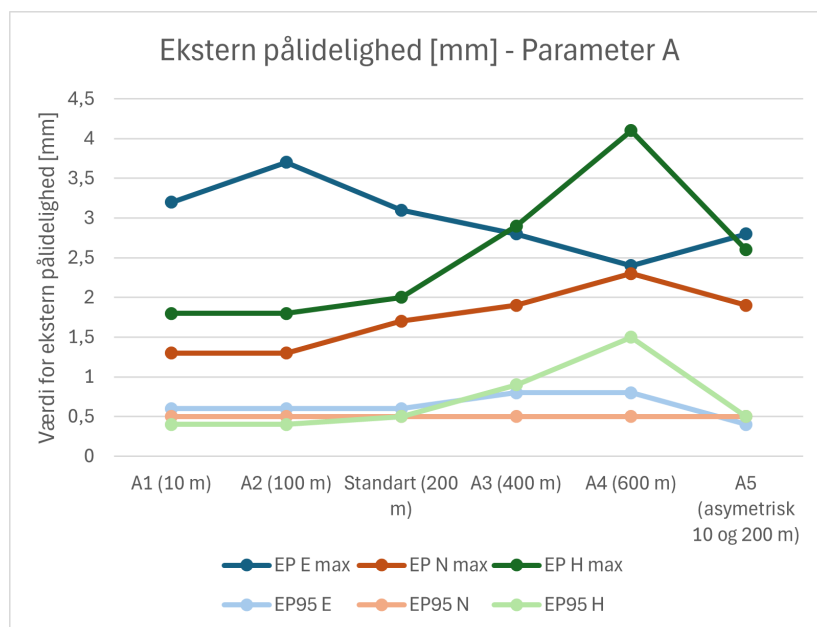
### Pålidelighed:

Hverken redundansen eller den interne pålidelighed af detailpunkterne påvirkes af fixpunks placeringen ud [figur 6.2.]. Af figur 6.2 fremgår en graf over EPmax og EP95%. Af figuren udledes at EP-værdierne overordnet set stiger, når afstanden til fixpunkterne øges, særligt på koten. Dette betyder den eksterne pålidelighed svækkes. Eksempelvis tre-dobles EP95% fraktil på koten når fixpunkterne er placeret 600 m fra broen frem for 200 m. En EP95% værdi på 1.5 mm vurderes have en væsentlig risiko for at svække muligheden for at overholde kravsspecifikationen ift  $\sigma_P > 2mm$ .

A1, A2, A3 og A4 følger samme mønster for EP som Standard. Hvilket betyder at 'EP N max' og 'EP H max' er ens for alle detailpunkter mens 'EP E max' varierer, hvor de højeste værdier er på 506 og 606. Årsagerne til alle 'EP max' værdier, er ligesom ved 'Standard', fixpunktskoordinaterne [appendix G.2]. Den højeste værdi indenfor 95%fraktilen stiger for E og H når afstanden øges, mens N forbliver -0.5. Årsagen for



**Figure 6.1.** Punktmiddelfejl og kotespredning for de fem testnet vedr. parameter A samt 'Standard'



**Figure 6.2.** Ekstern pålidelighed for de fem testnet vedr. parameter A samt 'Standard'

EP95 er hovedsageligt observationerne til fixpunkterne, hvor horisontalretningen påvirker E-koordinaten, afstandsmålingen påvirker N-koordinaten og vertikalvinklen påvirker. De højeste EP95 værdier fremgår ved punkt 118 og 418, forsaget af horisontalvinkel-observation til punkterne. Fælles for disse to punkter er er meget korte sigter til disse to punkter (2.5-3.5 m).[appendix G.2]

Det asymmetriske net (A5) afviger fra det mønster der ses ved 'Standard', A1, A2, A3 og A4., ved at detailpunkternes EP-værdier varierer mere. I dette netværk ses de højeste 'EP E max' værdier på 102, 118, 402 og 418 [appendix G.2]. Fælles for disse punkter er, at de observeres fra opstilling på samme pilletop, som detailpunktet er beliggende på, hvilket medfører kortere sigter. Netværkets asymmetri ses også ved at 'EP max' for koten er -2.2 mm for detailpunkter målt fra pille 1, mens den er -2.6 mm for detailpunkter målt fra opstillingen på pille 4. Dette

betyder at en lige akkurat grov fejl, i højere grad vil forplante sig til detailpunkterne målet fra opstillingen på pille 4, end fra opstillingen på pille 1. Ved alle detailpunkterne er årsagen til 'EP H max', koten på det nærmeste fikspunkt.[appendix G.2]

I forhold til EP95% på koten har alle detailpunkter den samme EP95-værdi i de symmetriske netværk (Standard, A1, A2, A3, A4). Værdien stiger des længere fikspunkterne placeres fra broen, hvilket viser at større fejle kan gemme sig i observationerne når fixpunkterne er placeret længere væk.

#### **Konklusion:**

Nøjagtigheden af både planekoordinater og koten falder med afstanden hvormed fixpunkterne placeres fra broen, koten påvirkes i langt højere grad end de plane koordinater. Placeres fixpunkterne 10-200 m fra broen er nøjagtighedsforskellen dog ubetydelig. Redundansen og den interne pålidelighed påvirkes ikke af fixpunkternes placering. Overordnede set stiger EP værdierne med afstanden, hvilket betyder at den eksterne pålidelighed svækkes. Særligt mellem 400 og 600 m (A3 og A4) stiger EP95 på koten til -1.5 mm, hvilket vurderes at kunne have en væsentlig indflydelse på nettes pålidelighed, sammenholdt med kravspecifikationen på 2 mm på koten.

Det anbefales at placere fixpunkterne op til 400 m fra broen. En asymmetrisk fixpunksplacering, med alle fixpunkter placeret på broens ene side, har en lavere nøjagtighed end 'Strandart', men det ser ikke ud til at have en betydelig indflydelse på kvaliteten sammenlignet med kravene.

## **6.3 B: Fixpunkter - antal**

I parameter B testes indflydelsen af antallet af fixpunkter. På baggrund af konklusionen fra test A, fordeles antallet af fixpunkter jævnt inden for 400 m fra broen. B2 er derfor magen til A3. Fordelingen følger konceptskitserne fra afsnit 5.6.2 i 'Eksperimentdesign'.

#### **Analyse**

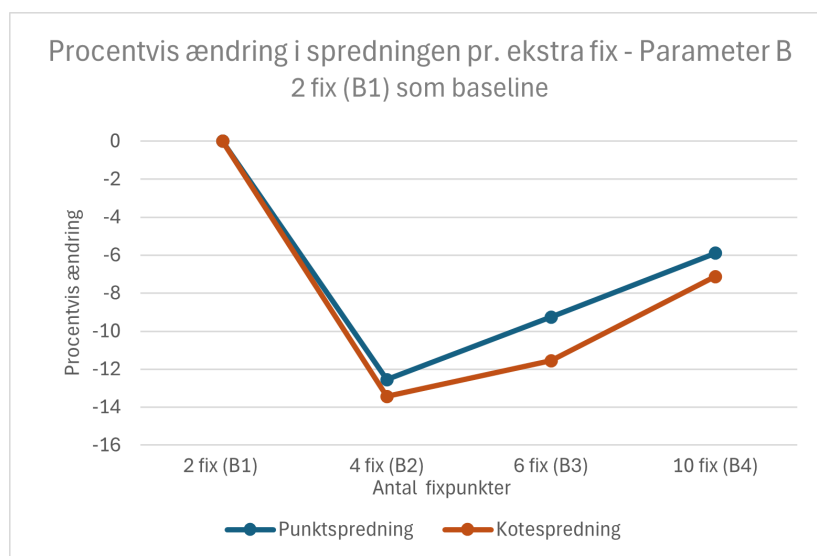
Værdierne til vurderingskriterierne fremgår af tabel 6.3. Heraf udledes at nøjagtigheden forbedres når der anvendes flere fixpunkter. Figur 6.3 viser den procentvise ændring i spredningen pr. ekstra anvendt fixpunkt. Af grafen kan det aflæses, at punktmiddelfejlen forbedres 13% pr. ekstra fixpunkt, når der anvendes 4 frem for 2 fixpunkter (baseret på forskellen mellem B1 og B2). Derimod forbedres punktmiddelfejlen kun 6% pr. fixpunkt ved at anvende 10 frem for 2 fixpunkter. Dette betyder, at der ses en aftagende effekt af at tilføje flere fixpunkter, hvilket stemmer overens med det teoretiske grundlag beskrevet i afsnit 5.6.2.

Kravsspecifikationen kan ikke overholdes med kun to fixpunkter (B1), da punktmiddelfejlen bliver over 2 mm (se tabel 6.3), derudover er spredningen på koten kun lige akkurat overholdt.

At inkludere flere fixpunkter i netværket påvirker ud fra tabel 6.3 ikke redundansen eller den interne pålidelighed, men tilgængelig øges den eksterne pålidelighed. Dette skyldes at den enkelte observation ikke forbedres ved flere fixpunkter, men at netværket bliver mere modstandsdygtig overfor grove fejl, når der anvendes flere fixpunkter, hvilket medfører at en grov fejl forplanter sig i lavere grad.

|              | Vurderingskriterier                         | Standard<br>4 fix  | B1<br>2 fix          | B2<br>4 fix          | B3<br>6 fix            | B4<br>10 fix           |
|--------------|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
|              | Anvendt fixpunksspredning<br>(E, N, H) [mm] | 1.8, 1.55,<br>0.98 | 1.8,<br>1.9,<br>1.45 | 1.8,<br>1.9,<br>1.45 | 1.79,<br>1.78,<br>1.25 | 1.79,<br>1.64,<br>1.13 |
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl<br>[mm]               | 1.59               | 2.27                 | 1.70                 | 1.43                   | 1.20                   |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [.]                  | 0                  | 9/9                  | 0                    | 0                      | 0                      |
|              | Gens. kotespredning [mm]                    | 0.96               | 1.86                 | 1.36                 | 1.00                   | 0.80                   |
|              | Kotespredning > 2 mm [.]                    | 0                  | 0                    | 0                    | 0                      | 0                      |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [.]                 | 0.75               | 0.75                 | 0.75                 | 0.75                   | 0.75                   |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [.]                 | 0.75               | 0.75                 | 0.75                 | 0.75                   | 0.75                   |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [.]                 | 0.75               | 0.75                 | 0.75                 | 0.75                   | 0.75                   |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [.]                      | 0                  | 0                    | 0                    | 0                      | 0                      |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [.]                      | 0                  | 0                    | 0                    | 0                      | 0                      |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [.]                      | 0                  | 0                    | 0                    | 0                      | 0                      |
|              | IP gens. afs [mm]                           | 4.00               | 4.00                 | 4.00                 | 4.00                   | 4.00                   |
|              | IP gens. hor [mm]                           | 3.72               | 3.72                 | 3.72                 | 3.72                   | 3.72                   |
|              | IP gens. ver [mm]                           | 3.77               | 2.77                 | 3.77                 | 3.77                   | 3.77                   |
|              | IP afs. max [mm]                            | 4.00               | 4.00                 | 4.00                 | 4.00                   | 4.00                   |
|              | IP hor.. max [mm]                           | 4.04               | 4.04                 | 4.04                 | 4.04                   | 4.04                   |
|              | IP ver. max [mm]                            | 4.21               | 4.21                 | 4.21                 | 4.21                   | 4.21                   |
|              | EP E max [mm]                               | -3.1               | -9.0                 | -2.8                 | -1.8                   | 1.0                    |
|              | EP N max [mm]                               | -1.7               | -5.9                 | -1.9                 | -1.1                   | 1.0                    |
|              | EP H max [mm]                               | 2.0                | -8.3                 | -2.9                 | -1.9                   | 1.0                    |
|              | EP E 95% fraktil [mm]                       | 0.6                | 0.8                  | -0.8                 | 0.5                    | 0.1                    |
|              | EP N 95% fraktil [mm]                       | 0.5                | 0.6                  | -0.5                 | 0.2                    | 0.3                    |
|              | EP H 95% fraktil [mm]                       | -0.5               | 1.1                  | -0.9                 | -0.5                   | -0.2                   |

**Table 6.3.** Parameter B: Antal af fixpunkter. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet \B\_FixAntal.



**Figure 6.3.** Den procentvise ændring i spredningen ved tilføjelse af flere fixpunkter, pr. fixpunkt. Grafen tager udgangspunkt i data fra test af netværkene B1, B2, B3 og B4. Beregningen findes i: Zipfil \6.Testnet \Procentberegninger)

Den største lige akkurat opdagelige fejl ('EP max') skyldes i B1, B2 og B3 koordinaterne til fixpunkterne, såsom det var tilfældet ved Standard [appendix G.4]. 'EP max' falder når der anvendes flere fixpunkter, hvilket skyldes at der er flere overbestemmelser til at definere nettets absolutte placering. Derved bliver det tydeligere hvis der er fejl på fixpunktskoordinaten på et af fixpunkterne. Ved B4 hvor der indgår 10 fixpunkter, er det ikke længere udelukkende fixpunktskoordinaterne som forårsager 'EP max', men også; horisontalretningsmålingen til detailpunkter påvirker E-koordinaten, afstandsmålingen til detailpunkterne påvirker N-koordinaten og vertikalvinklen til detailpunkterne, påvirker koten [appendix G.4]. At det er hz-målingen der påvirker E-koordinaten osv., skyldes at koordinatsystemet er orienteret således detailpunkterne og opstillingerne er parallel med en af koordinatsystemets akser, i dette tilfælde y-aksen. Dette er dog ikke tilfælde ved observationer der foretages på samme bropille, da disse målinger ikke foretages parallelt med N-aksen.

EP95 falder ligeledes når der anvendes flere fixpunkter. Årsagen til EP95-værdierne er observationerne til fixpunkterne [appendix G.4].

### Konklusion

Nøjagtigheden forbedres og størrelsesordenen af den mindste 'lige akkurat opdagelige' grove fejl mindske, når der anvendes flere fixpunkter. Den største grove fejl der kan påvirke detailpunkterne er generelt fixpunktens koordinater. Baseret på tesnettene kan kravsspecifikationen overholdes med 4 fixpunkter. Det er dog bedre ift. nøjagtigheden hvis fixpunkterne er placeret 200 m fra broen (som 'Standard') end 400 m fra broen (B2).

## 6.4 C: Opstillinger

I parameter C testes indflydelsen af netværkets opstillinger. I Standardopsætningen indgår to opstillinger på pille 1 og 4. I C1 og C2 indgår tre opstillinger på hhv. pille 1, 2 og 4 samt pille 1, 3 og 4. I C3 er der én opstilling på hver af broen fire piller.

### Analyse:

Alle testnettene overholder kravsspecifikationens nøjagtighedskrav, baseret på tabel 6.4. Punktmiddelfejlen og kotenspredningen falder med flere opstillinger. Forbedringen af punktmiddelfejlen er 4%, 4%, 3% pr. ekstra opstilling for hhv. C1, C2 og C3 [Appendix G, tabel G.7]. Tilsvarende er forbedringen i kotespredningen 16%, 13%, 9% pr. ekstra opstilling for hhv. C1, C2 og C3. Dette vurderes som en relativt lille forbedring, sammelignet med omkostningerne forbundet med de ekstra opstillinger.

Redundansen for observationerne stiger, fordi nogle punkter observeres fra flere opstillinger [tabel 6.4] Af samme årsag bliver de gennemsnitlige IP-værdier mindre. De maksimale IP-værdier for horisontalretning ved C3 samt vertikalvinkel ved både C2 og C3, er tilgængelig højere end i 'Standard'. For både horisontalretning og vertikalvinkel er den maksimale IP-værdi på observationer mellem pille 2 og 3 [appendix G.6]. Brofaget mellem pille 2 og 3 er længere end de andre brofag, og derfor bliver sigterne til detailpunkter længere end i 'Standard'. Den eksterne pålidelighed forbedres jf. tabel 6.4 ved anvendelse af flere opstillinger i netværket. Forbedringen af 'EP max' er størst fra 2 til 3 opstillinger (ca. 34% pr. opstilling), derefter bidrager en 4. opstilling kun med en forbedring af den eksterne pålidelighed på ca. 11% pr. opstilling [Appendix G, tabel G.7]. Årsagerne til 'EP max' og 'EP95' er lige som ved 'Standard', hhv. fixpunktskoordinaterne og observationer til fixpunkterne.

|              | Vurderingskriterier                      | Standard<br>P1, P4 | C1<br>P1, P2, P4 | C2<br>P1, P3, P4 | C3<br>P1,<br>P2,P3,P4 |
|--------------|------------------------------------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------------|
|              | Anvendt fixpunksspredning (E, N, H) [mm] | 1.8, 1.55, 0.98    | 1.8, 1.55, 0.98  | 1.8, 1.55, 0.98  | 1.8, 1.55, 0.98       |
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm]               | 1.59               | 1.53             | 1.53             | 1.50                  |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [·]               | 0                  | 0                | 0                | 0                     |
|              | Gens. kotespredning [mm]                 | 0.96               | 0.81             | 0.84             | 0.78                  |
|              | Kotespredning > 2 mm [·]                 | 0                  | 0                | 0                | 0                     |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [·]              | 0.75               | 0.80             | 0.80             | 0.83                  |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [·]              | 0.75               | 0.80             | 0.80             | 0.83                  |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [·]              | 0.75               | 0.80             | 0.80             | 0.82                  |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [·]                   | 0                  | 0                | 0                | 0                     |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [·]                   | 0                  | 0                | 0                | 0                     |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [·]                   | 0                  | 0                | 0                | 0                     |
|              | IP gens. afs [mm]                        | 4.00               | 3.89             | 3.89             | 3.83                  |
|              | IP gens. hor [mm]                        | 3.72               | 3.65             | 3.62             | 3.61                  |
|              | IP gens. ver [mm]                        | 3.77               | 3.82             | 3.71             | 3.73                  |
|              | IP afs. max [mm]                         | 4.00               | 4.00             | 4.00             | 4.00                  |
|              | IP hor. max [mm]                         | 4.04               | 3.96             | 4.18             | 3.96                  |
|              | IP ver. max [mm]                         | 4.21               | 4.6              | 4.53             | 4.43                  |
|              | EP E max [mm]                            | -3.1               | -3.3             | -3.3             | -3.2                  |
|              | EP N max [mm]                            | -1.7               | -1.5             | -1.5             | 1.4                   |
|              | EP H max [mm]                            | 2.0                | -1.3             | -1.4             | -1.2                  |
|              | EP E 95% fraktil [mm]                    | 0.6                | 0.3              | 0.3              | -0.2                  |
|              | EP N 95% fraktil [mm]                    | 0.5                | 0.2              | 0.2              | -0.2                  |
|              | EP H 95% fraktil [mm]                    | -0.5               | -0.3             | 0.3              | -0.2                  |

**Table 6.4.** Værdier til Vurderingskriterier vedr. Parameter C - Opstillinger. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet \C\_opstillinger.

### Konklusion:

Antallet af opstillinger påvirker kvaliteten i et netværk ved at reducere både punktmiddelfejlen og kotespredningen. Derudover stiger redundansen, fordi nogle detailpunkter måles fra flere opstillinger, og både den interne og eksterne pålidelighed forbedres. Størrelsesorden af forbedringerne er relativt lille sammenlignet med omkostningerne forbundet med de ekstra opstillinger. Alle testnettene overholder kravsspecifikationens nøjagtighedskrav.

## 6.5 1. ordens design

I de forrige afsnit 6.2, 6.3 og 6.4 er der udført testnet med henblik på at analysere hhv. fixpunkternes placering og antal samt opstillingernes indflydelse på netværkets kvalitet. I dette afsnit opsummeres og sammenlignes de tre parameters påvirkning på vurderingskriterierne, hvilket fører til fastlæggelse af et 1. ordens design, der arbejdes videre med.

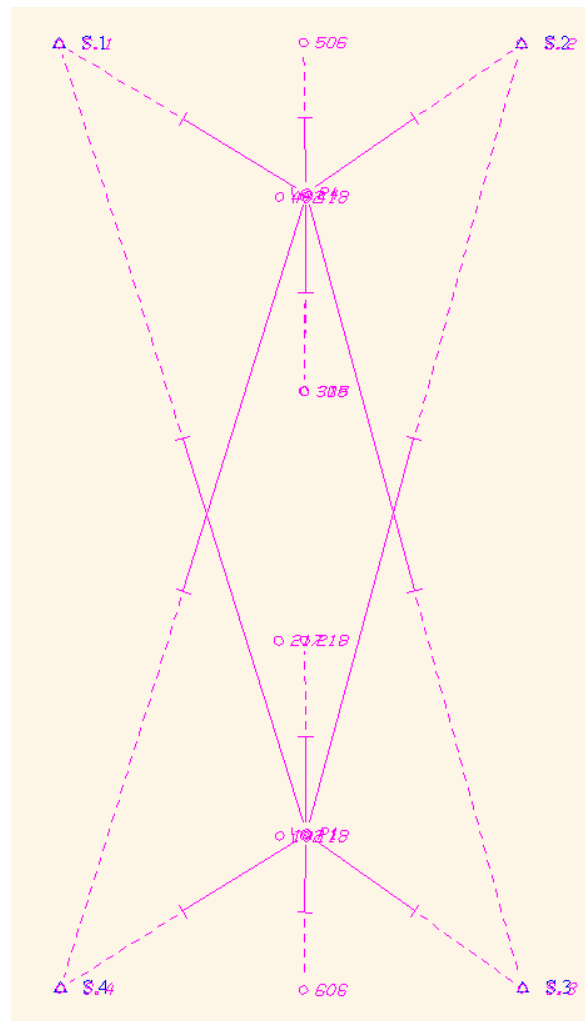
### Fastlæggelse af 1. ordensdesign

På baggrund af test af parameter A, B og C kan følgende opsummeres:

- A: Fixpunkterne bør placeres op til 400 m fra broen, den bedste nøjagtighed og pålidelighed opnås op til 200 m.

- B: Antallet af fixpunkter øger nøjagtigheden og den eksterne pålidelighed. 4 fixpunkter bør være tilstrækkeligt, såfremt de er placeret 200 m fra broen.
- C: Flere opstillinger forbedre nøjagtigheden og pålideligheden, dog kun i størrelsesordenen; 0.09 mm for punktmiddelfejlen og 0.18 mm for koten.

På dette grundlag fastlægges 1. ordensdesignet (netværkets geometri) til at bestå af 4 fixpunkter placeret 200 m fra broen, hvor detailpunkterne måles fra to opstillinger (pille 1 og 4). Derved er 1.ordensdesignet sammenfaldende med 'Standard'. Figur 6.4 viser en netskitse af 1.ordensdesignet.



**Figure 6.4.** Foreslag til 1. ordens design

1. ordens designet er et bud på en netværksgeometri der forventes at kunne overholde kravsspecifikationen billigst muligt. Det er dog ikke fuldt ud muligt på nuværende tidspunkt, at bekræfte om dette vil være den mest optimale netværksdesign, da instrumenter og antallet af satser endnu ikke er inkluderet i analysen. 1. ordens designet skal derfor ses som "bedste nuværende bud", som eventuelt skal tilrettes efter der senere opnås kendskab til størrelsesordenen på instrumenter og antal satsers indflydelse på kvaliteten.

### Hvilke kvalitetsmål er væsentligt at fokusere på fremadrettede?

I forhold til nøjagtighed indikerer den foreløbige analyse af testnettene at flere af de testede netværk kan overholde nøjagtighedskravet fra kravsspecifikationen. Men nøjagtighed, særligt på de planekoordinater vurderes fortsat væsentligt at forsøge at optimere på .

Redundanstillene er derimod langt over anbefalingerne og er derfor ikke så væsentlige at fokuseres på fremadrettede.

Det vurderes at være væsentligere at forbedre den eksterne pålidelighed end den interne pålidelighed, da EP viser indflydelse på koordinaterne til detailpunkterne.

Derved ligger fokus ift. 2. ordensdesignet primært på punktmiddelfejlen og den eksterne pålidelighed.

## 6.6 D: Kombinationer at instrumenter og antal satser

Parameter D tester hvilken indflydelse det anvendte instrumentet og antallet af satser har på kvalitetskriterier. Værdierne til vurderingskriterierne fremgår af tabel 6.5.

|              | Vurderingskriterier         | TS30     |      |      |      | TS16 |      |      |      |
|--------------|-----------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|
|              |                             | Standard | 3    | 5    | 8    | 2    | 3    | 5    | 8    |
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm]  | 1.59     | 1.49 | 1.43 | 1.35 | 1.77 | 1.60 | 1.48 | 1.42 |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [·]  | 0        |      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|              | Gens. kotespredning [mm]    | 0.96     | 0.86 | 0.76 | 0.70 | 1.14 | 0.96 | 0.84 | 0.72 |
|              | Kotespredning > 2 mm [·]    | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [·] | 0.75     | 0.83 | 0.90 | 0.94 | 0.75 | 0.83 | 0.90 | 0.94 |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [·] | 0.75     | 0.83 | 0.90 | 0.94 | 0.75 | 0.83 | 0.90 | 0.94 |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [·] | 0.75     | 0.83 | 0.90 | 0.94 | 0.75 | 0.83 | 0.90 | 0.94 |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [·]      | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [·]      | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [·]      | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|              | IP gens. afs [mm]           | 4.00     | 3.80 | 3.70 | 3.60 | 4.90 | 4.60 | 4.40 | 4.40 |
|              | IP gens. hor [mm]           | 3.72     | 3.50 | 3.42 | 3.28 | 4.35 | 4.14 | 3.95 | 3.86 |
|              | IP gens. ver [mm]           | 3.77     | 3.61 | 3.44 | 3.39 | 4.37 | 4.14 | 3.97 | 3.92 |
|              | IP afs. max [mm]            | 4.00     | 3.80 | 3.70 | 3.60 | 4.90 | 4.60 | 4.40 | 4.40 |
|              | IP hor. max [mm]            | 4.04     | 3.77 | 3.77 | 3.50 | 5.39 | 5.12 | 4.85 | 4.73 |
|              | IP ver. max [mm]            | 4.21     | 3.77 | 3.77 | 3.77 | 5.39 | 5.12 | 4.85 | 4.85 |
|              | EP E max [mm]               | -3.1     | -3.3 | -3.4 | -3.3 | -3.5 | -3.4 | -3.3 | -3.2 |
|              | EP N max [mm]               | -1.7     | -1.5 | -1.5 | -1.4 | -1.5 | -1.5 | -1.5 | -1.5 |
|              | EP H max [mm]               | -2.0     | -1.8 | -1.5 | -1.3 | -2.4 | -2.0 | -1.5 | -1.5 |
|              | EP E 95% fraktil [mm]       | 0.6      | 0.4  | 0.2  | 0.1  | 0.7  | 0.4  | 0.3  | 0.1  |
|              | EP N 95% fraktil [mm]       | 0.5      | 0.2  | 0.1  | -0.1 | -0.5 | 0.2  | 0.1  | 0.1  |
|              | EP H 95% fraktil [mm]       | -0.5     | -0.3 | -0.2 | -0.1 | -0.7 | -0.5 | -0.3 | -0.2 |

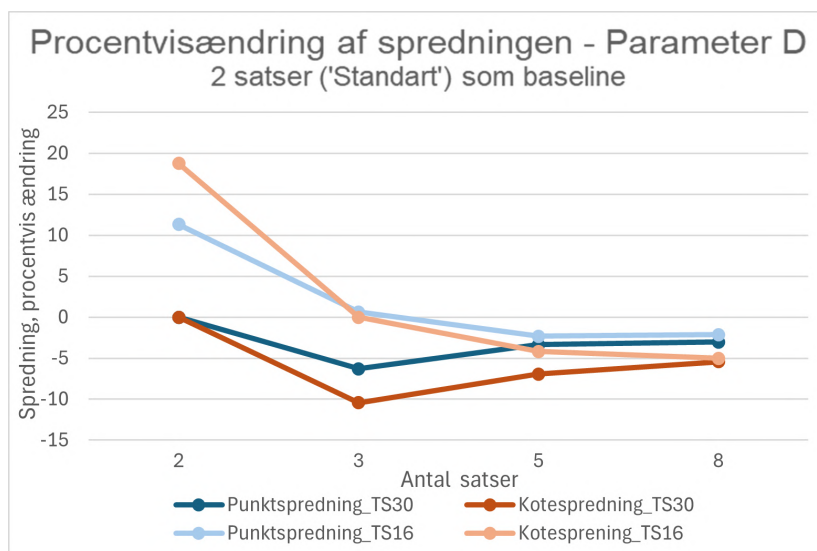
**Table 6.5.** Kombinationer at instrumenter og antal satser. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet \D\_vægt

### Analyse

Overordnede set kan kravspecifikationen overholdes med begge instrumenter. Måles der 2 satser med TS16 er punktmiddelfejlen dog i den orange kategori. Ud fra testen i tabel 6.5 kan instrumentets ringere specifikationer kompenseres ved at måle flere satser. Ved måling af

3 satser med TS16 opnå samme nøjagtighed (både punktmiddelfejl og spredning på koten) som ved måling af 2 satser med TS30.

Nøjagtigheden forbedres ved flere satser. Figur 6.5 viser den procentvise ændring i hhv. punktmiddelfejlen og spredning på koten for TS16 og TS30. I beregningen er 'Standard' dvs. 2 satser anvendt som baseline. Af figuren kan det aflæses at den procentvis ændring pr. sats aftager ved mange satser. Dette skyldes at overbestemmelser forbedre en spredning med:  $\sigma/\sqrt{n}$ , og stemmer overens med det forventede baseret på teorien bag parameteret (afsnit 5.6.4)



**Figure 6.5.** Procentvis ændring i spredningen pr. sats, 2 satser som baseline

Den gennemsnitlige IP-værdi ved 2 satser er 16-23% bedre for TS30 end TS16 [Appendix G, figur G.10]. Forskellen i IP-værdierne kan ud fra tabel 6.5 ikke kompenseres for, ved at måle flere satser. Dette udledes af at den gennemsnitlige IP-værdi er hhv. 4.00, 3.72 og 3,77 mm for afs., hor. og ver. for TS30 med 2 satser ('Standard'), hvilket IP-værdierne ikke kan bringes ned til med 8 satser med TS16.

'EP max' værdierne påvirkes kun svagt af satserne og instrumentet, hvilket udledes af en variation på op til 0.4 mm for E og N samt 0.7 mm for H [Tabel 6.5]. Ligeledes er der ved EP95-værdierne og kun en forskel af betydning mellem de to instrumenterne på koterne. EP95 falder tilgængelig 33%, 60% og 40% for hhv. E, N og H, ved at øge fra 2 til 3 satser [Appendix G, figur G.10]. Dette forventes at skyldes at EP max-værdierne er forårsaget af fixpunktskoordinaterne, hvilket ikke forbedres med flere målinger. Mens EP95-værdierne er forårsaget af observation til fixpunkter eller 118 og 418, hvilket forbedres ved gentagne målinger.

### Konklusion

Der kan, i forhold til nøjagtighed og ekstern pålidelighed, kompenseres for instrumentets specifikationer ved at måle flere satser. Til denne monitoringsopgave ser TS16 ud til at være tilstrækkelig. Anbefaler minimum 3 satser ved TS30 og min. 5 satser ved TS16, flere satser er en økonomisk fordelagtig måde at øge nøjagtigheden og den eksterne pålidelighed.

## 6.7 Anbefalet netværk - 2. ordens design

Efter analysen af indflydelsen af antallet af satser og instrumentets specifikationer, fastlægges netværkets 2.ordens design. Dette vurderes, som tidligere beskrevet, ud fra at kravsspecifikation kan overholdes tilfredsstillende på en økonomisk måde, hvilket betyder at der ikke ensidigt søges den højest mulige nøjagtigheden og pålidelighed.

Geometrien til det anbefalede netværk er baserede på 1. ordensdesignet præsenteret i afsnit 6.5. Skal instrumenterne nyanskaffes, vurderes det bedst at kunne betale sig at anvende TS16 til netværket, da denne ud fra test D kan overholde kravsspecifikationerne, ved at måle 3 satser. På Lillebæltsbroen anvendes der i forvejen 2 TS30'ere i det nuværende monitoringsystem. Ved fortsat at anvende disse totalstationer undgås nyanskaffelser af instrumenter. Derfor anbefales i det konkrete tilfælde, fortsat at anvende de 2 TS30'ere. Der måles 3 satser (kravsspecifikationen kræver min. 2 satser), for derigennem at opnå en bedre nøjagtighed. Det anbefalede netværk består således af;

- 4 fixpunkter 200 m fra broen - baseret på parameter A og B.
- Der måles fra 2 opstillinger som er placeret på hhv. pille 1 og 4, hvilket skyldes at der kan sigtes til de krævede detailpunkter, med bare to opstillinger fra disse placeringer - baseret på parameter C.
- Der anvendes TS30'ere da disse indgår i det eksisterende monitoring, hvorved omkostningerne kan minimeres. - baseret på parameter D.
- Der måles med 3 satser, da den ekstra sats giver en forbedring af punktmiddelfejlen på 6% og kotesspredningen på 10% - baseret på parameter D.

Der beregnes et testnet for det anbefalede netværk, og værdierne til vurderingskriterierne fremgår af tabel 6.6. Af tabellen fremgår yderligere den procentvise forskel med 'Standard' og det anbefalende netværk. Af tabellen udledes at det anbefalede netværk er bedre end Standard på alle vurderingskriterierne, på nær 'EP E max' der er sammenlignelig. Særligt EP95%-værdierne vurderes størrelsesordenen af ændringen at have en indflydelse.

|              | Vurderingskriterier         | Standard | Anbefalede netværk | Ændring [%] |
|--------------|-----------------------------|----------|--------------------|-------------|
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm]  | 1.59     | 1.49               | -6.3%       |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [.]  | 0        | 0                  |             |
|              | Gens. kotespredning [mm]    | 0.96     | 0.86               | -10.4%      |
|              | Kotespredning > 2 mm [.]    | 0        | 0                  |             |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [.] | 0.75     | 0.83               | 10.7%       |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit[.]  | 0.75     | 0.83               | 10.7%       |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [.] | 0.75     | 0.83               | 10.7%       |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [.]      | 0        | 0                  |             |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [.]      | 0        | 0                  |             |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [.]      | 0        | 0                  |             |
|              | IP gens. afs [mm]           | 4.00     | 3.80               | -5.0%       |
|              | IP gens. hor [mm]           | 3.72     | 3.50               | -5.9%       |
|              | IP gens. ver [mm]           | 3.77     | 3.61               | -4.2%       |
|              | IP afs. max [mm]            | 4.00     | 3.80               | -5.0%       |
|              | IP hor. max [mm]            | 4.04     | 3.77               | -6.7%       |
|              | IP ver. max [mm]            | 4.21     | 4.04               | -4.0%       |
|              | EP E max [mm]               | -3.1     | -3.2               | 3.2%        |
|              | EP N max [mm]               | -1.7     | -1.5               | -11.8%      |
|              | EP H max [mm]               | 2.0      | -1.8               | -10.0%      |
|              | EP E 95% fraktil [mm]       | 0.6      | 0.4                | -33.3%      |
|              | EP N 95% fraktil [mm]       | 0.5      | 0.2                | -60.0%      |
|              | EP H 95% fraktil [mm]       | -0.5     | -0.3               | -40.0 %     |

**Table 6.6.** Vurderingskriterier for 2. ordens designet. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet\2.ordensdesign.

I tabel 6.7 præsenteres koordinaternes spredning af de enkelte detailpunkter, og spredningerne er ligeledes vist grafisk på figur 6.6. Af tabellen og figuren ses:

- $\sigma_Y$  er ens for alle punkter i nettet. Dette forventes at skyldes at Y-koordinaten er bestemt af afstandsmålingen.
- $\sigma_Y$  varierer fra 1.1-1.3 mm, hvor spredningen er lavest i centrum af netværket.
- $\sigma_H$  varierer fra 0.8-0.9, hvor spredningen er lavest ved punkt 102, 118, 402 og 418. Disse punkter er målet fra en opstilling på samme pille (opstilling er vist med sort cirkel på figur 6.6).

| Pkt. | $\sigma_X$ [mm] | $\sigma_Y$ [mm] | $\sigma_H$ [mm] |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 606  | 1.3             | 0.9             | 0.9             |
| 102  | 1.2             | 0.9             | 0.8             |
| 118  | 1.2             | 0.9             | 0.8             |
| 218  | 1.1             | 0.9             | 0.9             |
| 305  | 1.1             | 0.9             | 0.9             |
| 318  | 1.1             | 0.9             | 0.9             |
| 402  | 1.2             | 0.9             | 0.8             |
| 418  | 1.2             | 0.9             | 0.8             |
| 506  | 1.3             | 0.9             | 0.9             |

**Table 6.7.** Koordinatspredninger på detailpunkterne. Datagrundlag: zipfil\6.Testnet \2.ordens-design.



**Figure 6.6.**  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$  og  $\sigma_H$  til detailpunkterne. Informationerne er på kortet præsenteret i følgende rækkefølge; punkt nr,  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Y$ .

### Muligheder for forbedring af netværket - Hvilke parametre påvirker de forskellige kvalitetsmål?

Det præsenterede netværk kan, baseret på testnettet, baseret på testnettet, opfylde kvalitetsmålene. I tilfælde af at der efter implementeringen bliver behov for at forbedre netværket på et bestemt kvalitetsmål, analyseres her, hvilke parametre der er mest effektive at justere på. I tabel 6.8 er der opsummeret hvilke vurderingskriterier der kan påvirkes af

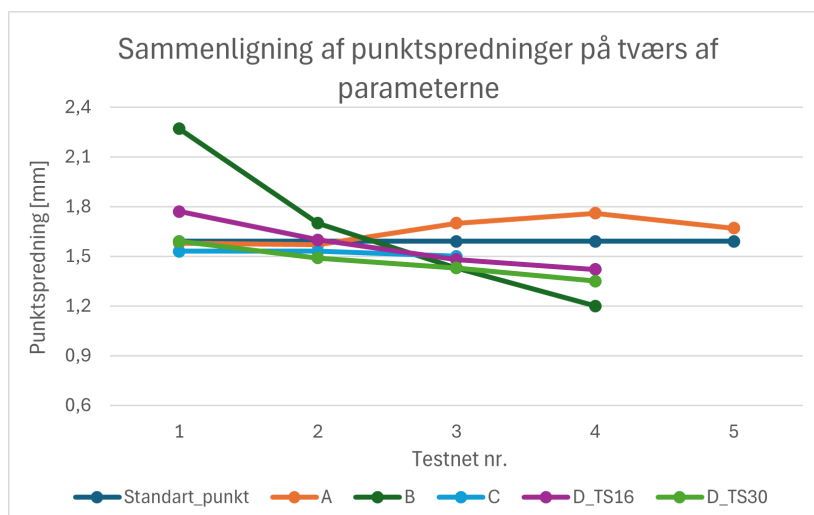
parameterne A, B, C og D, hvilket uddybes herunder.

|                      | A | B | C   | Satser | D<br>Instrument |
|----------------------|---|---|-----|--------|-----------------|
| Nøjagtighed          | x | x | x   | x      | x               |
| Redundans            | - | - | (x) | x      | -               |
| Intern pålidelighed  | - | - | (x) | x      | x               |
| Ekstern pålidelighed | x | x | x   | x      | x               |

**Table 6.8.** Opsamling af hvilke kvalitetsmål der påvirkes af parametrene.

Nøjagtighed:

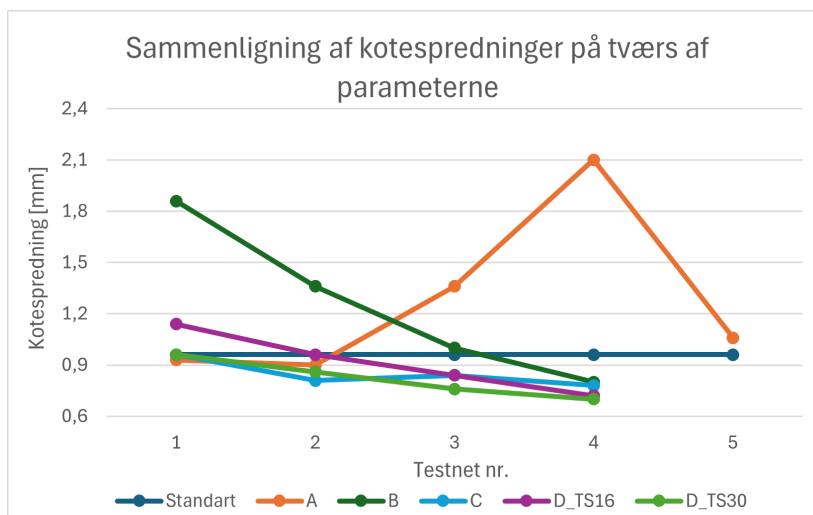
Ud fra analysen af testnettene, påvirkes nøjagtigheden af alle fire parametre. Skal punktmiddelfejlen eller kotespredningen sænkes er antallet af fixpunkter (parameter B) eller parameter D de mest effektive. Dette vurderes på baggrund af figur 6.7 og 6.8, der viser hhv. punktmiddelfejl og kotespredningen for alle de testede netværk. Parametrene er vist med hver deres linje og referet til med parameterens bogstav. På x-aksen vises testnr. og y-aksen viser spredning. Eksempelvis skal figur 6.8 læses som testnet A4 (dvs. 'Fixpunkter - placering' test nr. 4) har en kotespredning på 2.1 mm. Af figuren udledes at den laveste punktmiddelfejl opnås med B5 der er anvendelse af 10 fixpunkter. Supplering af flere fixpunkter er yderligere forbundet med væsentligt færre omkostninger end fx flere opstillinger. I forhold til koten opnås en spredning på 0.7-0.8 mm ved både B4, C4, D\_TS16 og D\_TS30 [figur 6.8]. I tilfælde af at netværkets nøjagtighed ønskes øget, vurderes det, at dette opnås mest effektivt ved at anvendes flere fixpunkter i netværket, eventuelt kombineret med en forøgelse af antallet af satser.



**Figure 6.7.** Sammenligning af punktmiddelfejl fra samtlige testnet. Beregningen findes i: Zipfil \6.Testnet \Procentberegninger.xlsx.

Redundans:

Redundansen kan øges ved at måle flere satser. Derudover stiger redundansen i testene vedrørende opstillinger. Dette skyldes dog ikke i sig selv flere opstillinger, men i stedet at nogle detailpunkter måles flere gange, idet detailpunktet måles fra flere opstillinger. Netværkenes redundansværdier er dog langt over anbefalingerne og derfor er redundansen ikke så væsentligt at fokuseres på.



**Figure 6.8.** Sammenligning af kotespredninger fra samtlige testnet. Beregningen findes i: Zipfil \6.Testnet \Procentberegninger.xlsx.

Den interne pålidelighed påvirkes af instruments præcision og antallet af satser. Den interne pålidelighed forbedres derudover også i testene vedrørende opstillinger. Dette skyldes dog ligesom ved redundans at nogle detailpunkter måles flere gange.

Den eksterne pålidelighed påvirkes af alle parametre. EP max kan reduceres mest effektivt ved at tilføje flere fixpunkter til netværket. Med 10 fixpunkter (B4) kan EP max reduceres til 1 mm for både E, N og H. EP95 kan reduceres gennem flere forskellige parametre; både flere fixpunkter (B) og Antallet af satser (D), hvor 'EP95' kan reduceres ned til 0.1 mm mm for både E, N og H.

## 6.8 Opsamling

I dette kapitel er indflydelsen af fire parametre; A - antal fixpunkter, B - placering af fixpunkter, C - opstillinger og D - vægtning (satser og instrumenter,) på kvaliteten i et netværk analyseret. På baggrund af denne analyse er der præsenteret et anbefalet netværk, ud fra en optimeringsvurdering om at opfylde kravsspecifikationen og samtidig tage højde for økonomien i etableringen af netværket. Den anbefalede netværk præsenteret i afsnit 6.7 opnår følgende nøjagtighedsmål:

- Punktmiddelfejl:
  - Gennemsnit: 1.49 mm
  - Antal detailpunkter > 2 mm: 0
- Spredning koten:
  - Gennemsnit: 0.86 mm
  - Antal detailpunkter > 2 mm: 0

Derved indikerer testnettet, at dette netværk kan overholde kravsspecifikationen (se afsnit 3.5) på 2 mm på både plane koordinater og koter. Den højeste punktmiddelfejl er på punkt 506 og 606, disse er placeret på landfæsterne og er dermed i udkanten af nettet.

Netværket redundans ligger på 0.83 og er dermed over det anbefalede på 0.5. Netværket redundans er ud fra testnet analysen ikke en udfordring.

Netværkets maximale værdier for intern pålidelighed ligger på 3.8, 3.5 og 3.6 mm for hhv. afstand, horisontalretning og vertikal vinkel. IP-værdierne er generelt ensartet i netværket, hvilket betyder at netværkets evne til at detektere grove fejl er homogen.

Den eksterne pålidelighed er et mål for hvormeget én 'lige akkurat opdagelige' grov fejl i netværket kan påvirke koordinaterne på detailpunkterne. Derfor er netværkets eksterne pålidelighed vurderet som et væsentligt fokuspunkt. I analysen af testnet indgår 'EPmax' som er indflydelsen i værste tilfælde, samt 'EP95' der er den højeste værdi i 95%fraktil. Den maximale eksterne pålidelighed påvirkes særligt af antallet af fixpunkter, hvor et netværk med 2 fixpunkter (B1) har 'EP max' værdier på -9.0, -5,9 og -8,3 mm for hhv. E, N og H, mens 'EP max' i det anbefalede netværk er reduceret til -3.2, -1.5 og -1.8 mm. for hhv. E, N og H. De maximale EP-værdier udløses i hovedparten af netværkene af "observationen" til fixpunktskoordinaterne. Hvilket betyder at en grov fejl der kun lige akkurat kan opdages, vil påvirke detailpunkternes koordinater mest, hvis fejlen er på de oplyste fixpunktskoordinater. Dermed er netværket er mindst modstandsdygtig over for grove fejl, i tilfælde hvor den grove fejl er på fixpunktskoordinaterne. I forhold til 'EP95', der i analysen anvendes som en mere sandsynlige indflydelse af en grov fejl, nedbringes dette til 0.4, 0.2 og -0.3 mm for hhv. E, N og H. EP95 kan nedbringes yderligere ved flere fixpunkter eller flere satser. EP95-værdierne skyldes oftest observationen til fixpunkterne, hvor horisontalretningen påvirker E-koordinaten, afstandsmålingen påvirker N-koordinaten og vertikalvinklen påvirker. De højeste EP95-værdier ses 118 og 418 forårsaget af horisontalvinkel-observation til punkterne, Fælles for disse to punkter er er meget korte sigter til disse to punkter (2.5-3.5 m).

Herudfra udledes følgende punkter der, baseret på analysen af testnettene, forventes at kunne give udfordringer i forbindelse med bestemmes af koordinater til detailpunkterne:

- Koordinaterne til fixpunkterne
- Observationerne til fixpunkterne
- Observation til 118 og 418 (korte afstande).

# Etablering af nettet

# 7

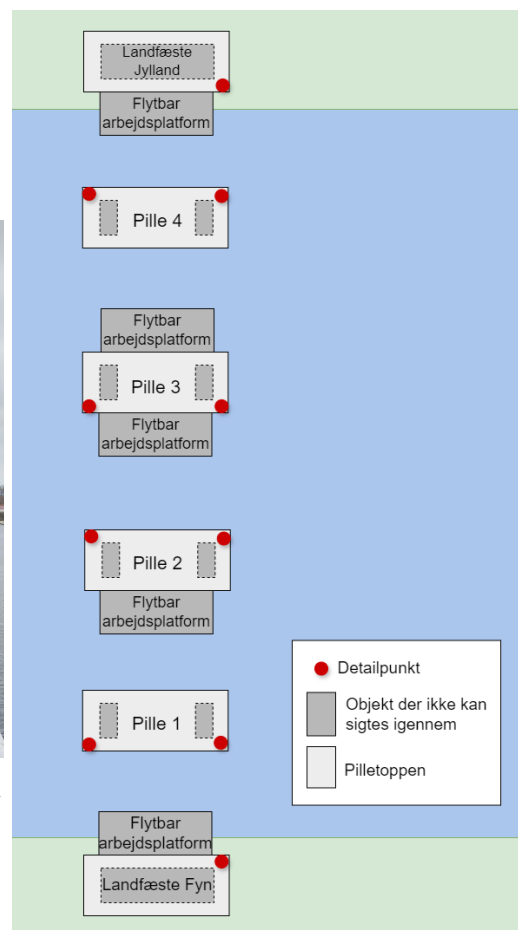
*I forgående kapitel, er der gennem testnet beregnet et anbefalet netværk der forventes at kunne overholde kravsspecifikationen, samt en forståelse for hvordan ændringer i netværket påvirker kvaliteten. Denne viden er udgangspunktet for etableringen af netværket, når der i dette kapitel forholdes til hvordan det er praktisk muligt at gennemføre. Målet er efter dette kapitel at have etableret et monitoringnetværk på Lillebæltsbroen. For at nå der hen, beskrives de praktiske overvejelser forud for etableringen samt selve etableringen af netværket der sker i to trin; først indmåling af nye fixpunkter og derefter opsætning totalstation og detailpunkter .*

## 7.1 Praktiske overvejelser og undersøgelser forud for etablering

Udgangspunkt for etableringen af netværket er anbefalingerne på baggrund af testnettene i kapitel 6. Med dette udgangspunkt, er det vurderet hvordan der helt praktisk kan etableres et monitorings netværk på broen. I det optimale netværk er fixpunkterne symmetriske med detailpunkterne i centrum af nettet, men et asymmetrisk netværk kan ud fra testnet analysen også opfylde kravsspecifikationen. På broen, er der mellem hver af bropillerne en arbejdsplatform der kan flyttes. Arbejdsplatformen ses på figur 7.1. Arbejdsplatformen kan give udfordringer i forhold til at have at have fixpunkter både øst og vest for broen, da sigterne til fixpunkterne spærres i tilfælde hvor arbejdsplatformen placeres ved pille 1 eller pille 4. Arbejdsplatformene og deres placering ifh. pillerne og detailpunkterne er skitseret på figur 7.2. På figuren er illustreret en placering af arbejdsplatformene, hvor det er muligt at måle fixpunkter på begge sider af broen fra opstilling på pille 1 og pille 4. Men da broen en måleperioden er under renovering og arbejdsplatformene derfor dagligt er i brug, vurderes det at der med det symmetriske netværk, er for stor risiko for spærring af sigter til fixpunkter. Derfor vælges at etablere et asymmetrisk netværk kun fixpunkter på den østlige side af broen (inspireret af test A5). Ulempen ved denne geometri, er at detailpunkterne ikke er omkranset af fixpunkterne. Derfor er det i forbindelse med placeringen af fixpunkterne prioriteret at få et fixpunkt på så tæt som muligt på broen på både nord og syd siden.



**Figure 7.1.** Billede af arbejdsplatformens placering ift. pillerne [Eget billedemateriale].



**Figure 7.2.** Skitse af detailpunkternes placering samt objekter der kan hindre sigtelinjer. Skitsen er ikke målbar.

Overvejelser ved undersøgelse af hvad der er praktisk muligt:

- Opstillinger: Hvor på pille 1 og 4 kan der fastmonteres en totalstation, hvor der samtidig er sigtelinjer til fixpunkter og detailpunkter?
- Fixpunkter:
  - hvor er det muligt at fastmontere prisme til fixpunkter nær broen og ca 200 m fra på begge sider af havet?
  - Alle fixpunkter skal kunne måles fra begge opstillinger.
- Detailpunkter: Hvordan monteres prisme i detailpunkterne

### 7.1.1 Opstillinger

Hvor på pille 1 og 4 kan der fastmonteres en totalstation, hvor der samtidig er sigtelinjer til fixpunkter og detailpunkter?

Alle piller og begge landfæster har minimum ét detailpunkt i broens østlige side, så ved placering af opstillingen på bropillens østlige side, kan der måles til detailpunkter på nabopiller samt fixpunkter (se figur 7.2). For at der kan måles flere punkter på pillerne, hvilket jf. afsnit 3.5 er et ønske fra Banedanmark, placeres opstilling i det skraveret område illustreret på figur

7.3. Skitsen er bareret på pille 1, men samme princip anvendes på pille 4, hvor detailpunkterne er placeret på den nordlige side.



**Figure 7.3.** Skitse af opstillingsmuligheder, eksempel fra pille 1. Opstillingen bør placeres i det skraverede område.

### 7.1.2 Fixpunkter

- hvor er det muligt at fastmontere prismer til fixpunkter nær broen og ca 200 m fra på begge sider af havet?
- Alle fixpunkter skal kunne måles fra begge opstillinger.

| Fixpunkt nr. | Hvordan?                                   | Hvor?                                               |
|--------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1            | Magnetprismeholder på hegn                 | ca. 15 m fra broen                                  |
| 2            | Bores i beton fundament                    | ca. 15 m fra broen                                  |
| 3            | Magnetprismeholder på beslag til flagsting | På lystbådehavnen Snoghøj bådlaug (185 m fra broen) |
| 4            | Magnetprismeholder på spundsen             | På lystbådehavnen Kongebrogården (380 m fra broen)  |

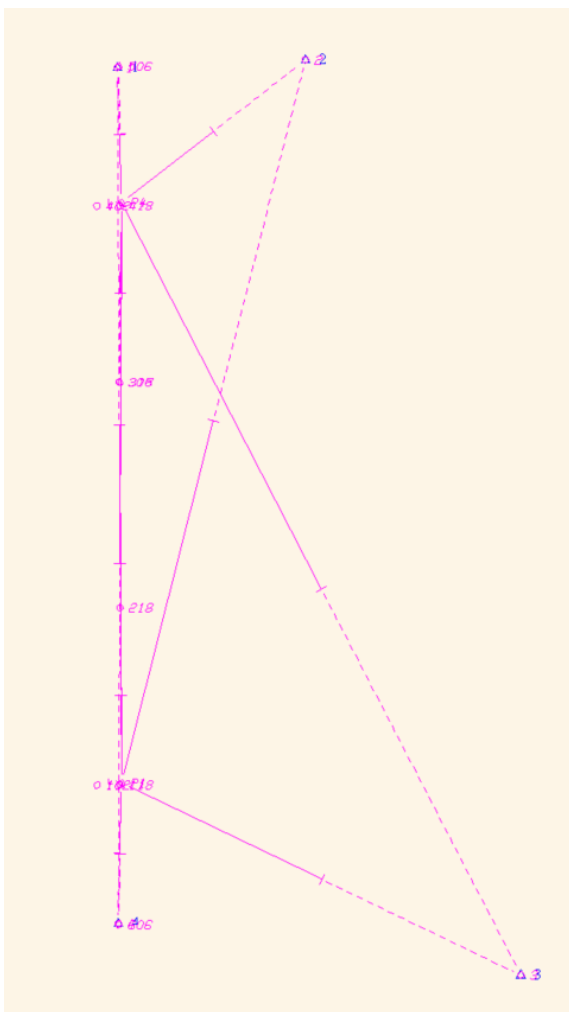
**Table 7.1.** Plan for etablering af fixpunkter.

## 7.2 Testnet for netværket der forventes at etableres

Placeringen af fixpunkter, opstillinger og detailpunkter der indgår i netværket ses af figur 7.4, sigtelinjerne for netværket er vist på figur 7.5. Der beregnes et nyt testnet med den konkrete placering af fixpunkter, dette sammelignes i tabel 7.2 med kvaliteten af den anbefalende netværk. Tidligere er fixpunksspredningen beregnet ud fra at der anvendes 2 satser til at indmåle de nye fixpunkter. Nu forudsættes at fixpunkterne måles med 3 satser, da det udfra test D giver en væsentlig forbedring af præcisionen. Fixpunksspredningen beregnes i testnet til: 1.76, 1.58, 0.93 mm (Zipfil \7.Etablering \Testnet \Etableret\_fixpunksspred.dok\_GeoADJUST).



**Figure 7.4.** Skitse over detailpunkter, fixpunkter og opstillinger i det nye monitoringsnetværk.



**Figure 7.5.** Testnet-skitse for det nye monitoringsnetværk der forventes at etableres på Lillebæltsbroen.

Ud fra tabel 7.2 er forskellen mellem det "optimale" netværk og forslaget efter en praktisk vurdering lille. Derfor vurderes at det praktiske forslag gennemføres, da kvalitetsforskellen er ubetydelig lille sammenlignet med risikoen for spærrede sigter ved det "optimale" netværk.

IP max både E, N og H er på fixpunktet ved kongebro lystbåd havn, hvilket også er det fixpunkt der er placeret længst væk. Den maximale EP værdi er i alle tilfælde på koordinaterne til fixpunkterne.

EP max H er højere for detailpunkter målt fra opstillingen på pille 1 end opstillingen på pille 4 (-2.3 mm vs. -1.8 mm). Den maximal EP værdi ligger alle sammen på koordinaterne til fixpunkterne, hvor det ved opstilling på pille 1 er koden for fixpunkt 4 der kan give den maximale indflydelse på detailpunkterne, mens det for punkter målt fra opstillingen på pille 4, er koden på fixpunkt 1. Det betyder at EP max for koden ligger på fixpunktet nær broen.

|              | Vurderingsparametre         | "optimale"<br>netværk | Forslag til<br>etablering af<br>netværk | Difference |
|--------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|------------|
| Nøjagtighed  | Gens. punktmiddelfejl [mm]  | 1.49                  | 1.55                                    | 0.06       |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm [·]  | 0                     | 0                                       | 0          |
|              | Gens. kotemiddelfejl [mm]   | 0.86                  | 0.84                                    | -0.02      |
|              | Kotemiddelfejl > 2 mm [·]   | 0                     | 0                                       | 0          |
|              |                             |                       |                                         |            |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [·] | 0.86                  | 0.86                                    | 0          |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [·] | 0.86                  | 0.86                                    | 0          |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [·] | 0.87                  | 0.88                                    | 0          |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [·]      | 0                     | 0                                       | 0          |
|              | $\rho_{hor} < 0.5$ [·]      | 0                     | 0                                       | 0          |
|              | $\rho_{ver} < 0.5$ [·]      | 0                     | 0                                       | 0          |
|              | IP gens. afs [mm]           | 3.80                  | 3.80                                    | 0          |
|              | IP gens. hor [mm]           | 3.50                  | 3.50                                    | 0          |
|              | IP gens. ver [mm]           | 3.61                  | 3.61                                    | 0          |
|              | IP afs. max [mm]            | 3.80                  | 3.80                                    | 0          |
|              | IP hor.. max [mm]           | 3.77                  | 3.77                                    | 0          |
|              | IP ver. max [mm]            | 4.04                  | 4.04                                    | 0          |
|              | EP E max [mm]               | -3.2                  | -3.5                                    | 0.3        |
|              | EP N max [mm]               | -1.5                  | -1.6                                    | 0.1        |
|              | EP H max [mm]               | -1.8                  | -2.3                                    | 0.4        |
|              | EP E 95% fraktil [mm]       | 0.4                   | 0.4                                     | 0          |
|              | EP N 95% fraktil [mm]       | 0.2                   | -0.3                                    | 0.1        |
|              | EP H 95% fraktil [mm]       | -0.3                  | -0.3                                    | 0.1        |

**Table 7.2.** Sammenligning af værdier til vurderingskriterierne for det "optimale" netværk og det etablerede, samt differencen mellem de to netværk. Datagrundlag: Zipfil \7.Etablering \Testnet \Etableret.dok\_GeoADJUST og Etableret.m.

## 7.3 Indmåling af nye fixpunkter

For at komme i det lokal koordinatsystem anvendt ved 'Manuel måling', anvendes der, som beskrevet i afsnit 5, de samme planefixpunkter som ved 'Manuel måling'. Som kotefikpunkter, anvendes punkter der er nivelleret til forbindelse med 'Manuel måling'.

### 7.3.1 Etablering af fixpunkter

Det er forud for etableringen planlagt hvor fixpunkterne kan etableres, se tabel 7.1, og etableringen går planmæssigt. Hvordan fixpunkterne er etableret er vist på figur 7.6, 7.7, 7.8 og 7.9.



*Figure 7.6.* Fixpunkt 1.



*Figure 7.7.* Fixpunkt 2.



*Figure 7.8.* Fixpunkt 3.



*Figure 7.9.* Fixpunkt 4.

### 7.3.2 Indmåling af nye fixpunkter

Koordinaterne til de ny etablerede fixpunkter bestemmes ved polærmåling fra to opstillinger. I forbindelse med indmålingen skal arbejdsplatformene flyttes, så det er muligt at sigte til fixpunkterne. Motoren til platformen mellem pille 4 og landfæste Jylland er i midlertidigt gået i stykker, hvilket betyder at platformen i øjeblikket ikke kan flyttes. Arbejdsplatformen står op ad pille 4, hvilket medfører at der i indmålingen af fixpunkter, ikke kan måles til det ene af de eksisterende fixpunkter fra 'Manuel måling' (punkt 53).

Netskitse for indmålingen af de nye fixpunkter fremgår af 7.10. Som beskrevet i kapitel 5 'Eksperimentdesign', indmåles fixpunkterne fra to opstillinger, således detailpunkterne (de ny fixpunkter) er overbestemte. I begge opstillinger anvendes fixpunkterne fra 'Manuel måling' (pkt. 51, 52 og 57) som plane fixpunkter. Ved opstillingen på pille 1 anvendes PT00-1, PT00-2, PT00-3 og 102 som kotefixpunkter, mens PT64-1, PT64-2, PT64-3, 318 og 402 anvendes som kotefixpunkter ved opstillingen på pille 4. Fra begge opstillinger observeres der til de 4 nye fixpunkter.

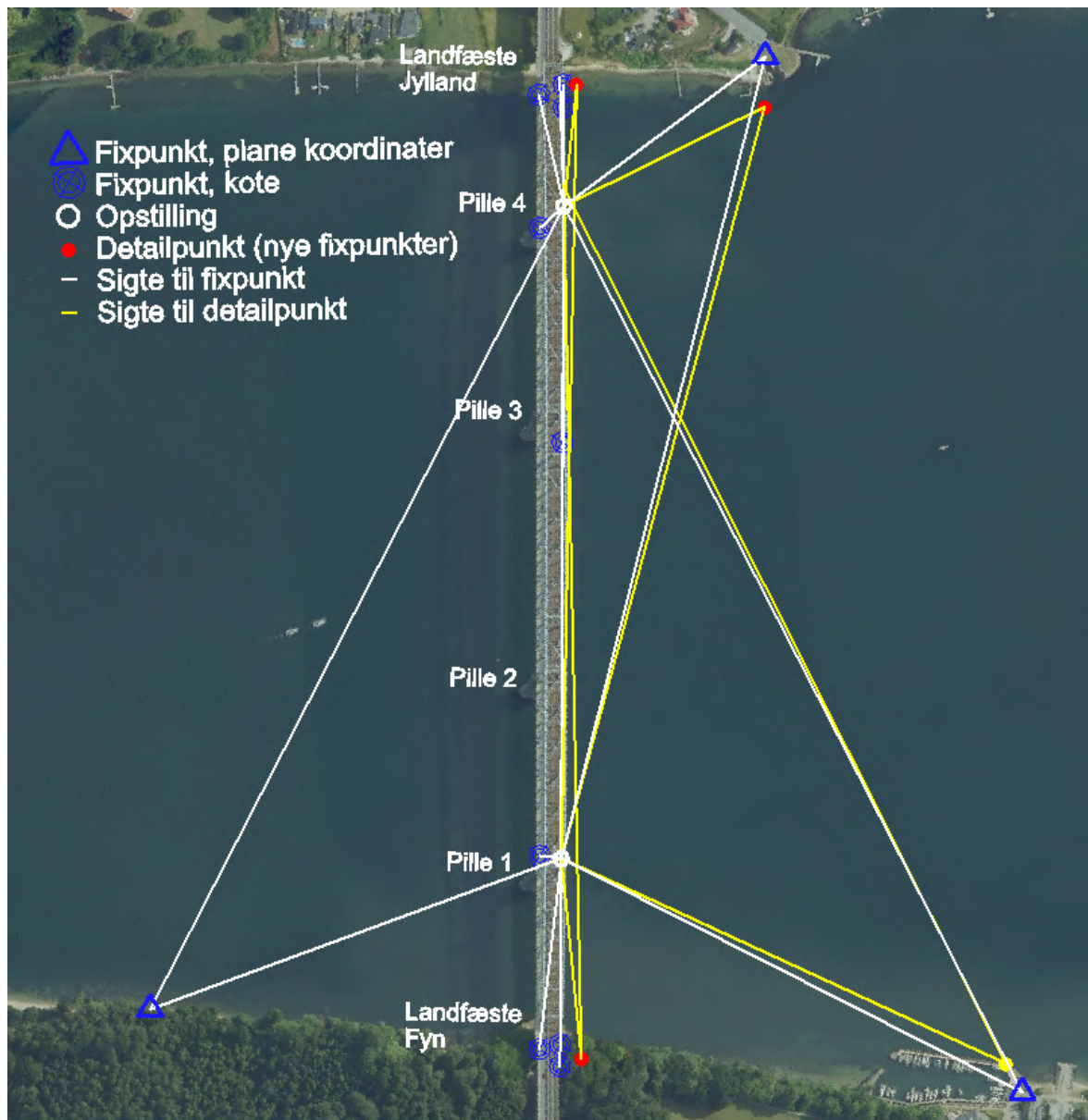


Figure 7.10. Netskitse over indmålingen af nye fixpunkter.

### 7.3.3 Beregning

Beregningen af koordinaterne til de nye fixpunkter foretages i to trin for både de plane koordinater og koten. Først foretages en fri udjævning, hvilket viser hvor godt målingerne passer sammen indbyrdes. Derefter foretages en fastudjævning, hvor der beregnes koordinater til de nye fixpunkter. Spredningen på vægtenheden, antal grove fejl samt spredningen på X, Y og h for de nye fixpunkter fremgår af tabel 7.3. Gennemgang af udjævningerne ses i Appendix H og resultatfilerne findes i Zipfilen (\Etablering \Fixpunksberegning). Beregningen af koordinater er foretaget i SDL, da udjævning i GeoAdjust ikke var kommet op at køre på dette tidspunkt.

I forhold til observationerne af plane koordinaterne, er  $\sigma_0$  fra den frie udjævning over 1, hvor udfra det udledes at målingerne er forløbet ringere end forventet baseret på apprioriværdierne. Ved den fastholdte udjævning for den plane koordinater stiger  $\sigma_0$ , og  $\sigma_x$  stiger fra 0.5-

0.7 mm til 2.1-2.7 mm . Dette indikerer at fixpunktskoordinaterne fra 'Manuel måling' er fejlbehæftede. Dette stemmer overens med det forventede, da der ved transformationen i 'Manuel måling' i 2023 har været en gennemsnitlig korrektion af fixpunkterne på 2.7 mm (beskrevet i afsnit 5.4). Koordinaterne til fixpunkter beregnet ved fast udjævning anvendes fremadrettede som fixpunktskoordinater.

|                             | $\sigma_0$ | Spredning på de 4 nye fixpunkter |                 |                 |
|-----------------------------|------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
|                             |            | $\sigma_X$ [mm]                  | $\sigma_Y$ [mm] | $\sigma_H$ [mm] |
| Plane koor., fri udjævning  | 1.45       | 0.5-0.7                          | 0.5-0.7         |                 |
| Plane koor., fast udjævning | 4.27       | 2.1-2.7                          | 2.0-2.5         |                 |
| Koter, fri udjævning        | 8.36       |                                  |                 | 3.1-4.3         |
| Koter fast udjævning        | 1.85       |                                  |                 | 0.8-1.0         |

**Table 7.3.** Udvalgte værdier fra fri og fast udjævning af observationer i forbindelse med indmålingen af nye fixpunkter. Data findes i Zipfilen (\7.Etablering \ 'FriUdjPlan.RES', 'FastUdjPlan.RES', 'FriUdjKote.RES' og 'FastUdjKote2.RES').

### 7.3.4 Sammenligning med testnet

Den forventede fixpunktsspredning (testnet) sammenlignes i tabel 7.4 med spredningen i indmålingen af de nye fixpunkter. Af tabellen ses at fixpunktsspredningen er blevet ringere ved etableringen end forventede baseret på testnettet. Særligt fixpunkt 4, der er placeret længst fra broen, får en højere fixpunktsspredning end forventede. Spredningen på koten på fixpunkt 1-3 er derimod kun 0.1 mm højere end testnet, hvilket vurderes at være en ubetydelig størrelsesorden. Når fixpunktsspredning generelt er højere end der er beregnet med i testnet, må det forventes at give ringere bestemmelse af detailpunkterne senere hen.

| Pkt.       | Fixpunktsspredning [mm] |            |            |            |            |            |
|------------|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|            | Testnet                 |            |            | Udjævning  |            |            |
|            | $\sigma_X$              | $\sigma_Y$ | $\sigma_H$ | $\sigma_X$ | $\sigma_Y$ | $\sigma_H$ |
| 1          | 2.3                     | 1.6        | 0.9        | 2.3        | 2.0        | 0.8        |
| 2          | 1.8                     | 1.6        | 0.9        | 2.1        | 2.0        | 0.8        |
| 3          | 2.3                     | 1.6        | 0.9        | 2.3        | 2.0        | 0.8        |
| 4          | 1.8                     | 1.9        | 1.3        | 2.7        | 2.5        | 1.0        |
| Gennemsnit | 2.1                     | 1.7        | 1.0        | 2.4        | 1.3        | 0.9        |

**Table 7.4.** Sammenligning af den forventede (testnet) og faktiske fixpunktsspredning. Data findes i Zipfil \7.Etablering \ FastUdjPlan.res, FastUdjKote2.res samt Zipfil \7.Etablering \ Etableret.dok\_GeoADJUST .

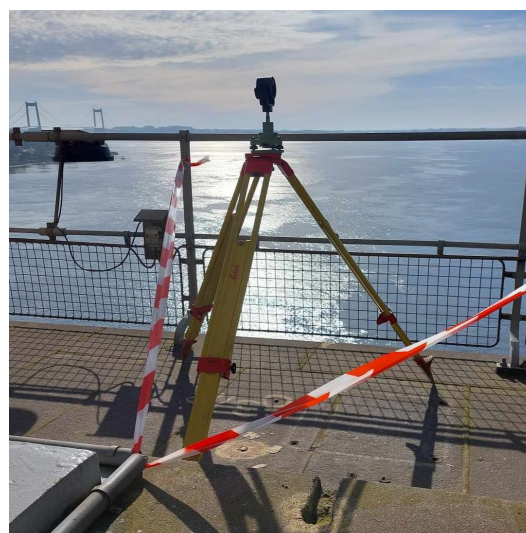
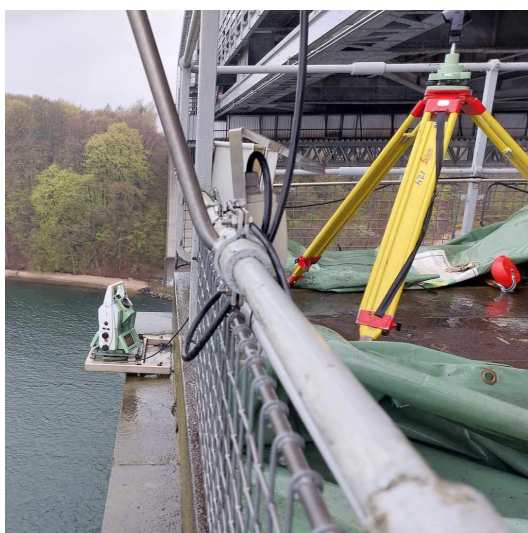
## 7.4 Etablering af totalstationer og detailpunkter

I forbindelse med etablering af totalstationer var der flere udfordringer der medfører at der foretages ændringer i monitoringsnetværket på etableringsdagen.

- Samtidig som det var planlagt at netværk skal etableres, er der vedligehold (slibning) af konstruktionen, hvilket betyder forøgede risiko for beskadigelse af totalstationerne, hvis der ikke er skærm rundt om totalstationen. Det er ikke muligt at sætte skærm på den planlagte løsning. Derfor vælges det at anvende de to totalstationer der allerede er

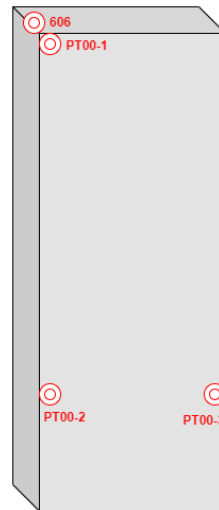
monteret på broen til den nuværende permanente monitoring. Disse totalstationer er placeret i Pille 1 og pille 4, ligesom det i dette netværk var planlagt. Derfor ændre dette ikke væsentligt på netværkets geometri. Ændringen medføre dog at det ikke er muligt at måle punkt 102, 305 og 402 fra netværket, fordi totalstationer er placeret på ydersiden af pillen, hvor okkularret er under pilletoppen (se figur 7.11 der viser totalstations placering på pille 1). Ved sigte til fx 102 brydes sigtelinjen af pillen. Men med et stejlt sigte, det muligt at sigte til 118 som vist på figur 7.11. Kravsspecifikationen er stadig overholdt når disse detailpunkter undlades, idet kravet er minimum et af de eksistere detailpunkter på hver pille samt landfæster. Sikkerheden mindskes dog, Banedanmark ville gerne fortsat, jf. 3.3.3 have koordinater på flere punkter i tilfælde af a et punkt går tabt.

- Fastmontering i betondækket på broen er ikke tilladt alligevel, hvilket medfører at prismene ikke kan fastmonteres i detailpunkterne som forventede. Som alternativ placeres prismen på stativer i punkterne. Eksempler er vist på figur 7.11 og 7.12.
  - Der gøres dog opmærksom på at der i testnettene er anvendt en centreringsspredning på 1 mm, hvilket afspejler centrering af måling til prismer. I testnettene er der således ikke inkluderet et fejlbidrag fra opstillingen i punktet, hvilket der bør når nu prismet ikke er fastmonteret.
  - De to punkter på landfæsterne (506 og 606) er placeret på toppen af et rækværk, og derfor er det ikke praktisk muligt at observere disse punkter uden at fastmontere prismen. Som alternativ observeres der til to eksisterende monitoringsprismer, der er placeret på hver sit landfæste. Placeringen er vist på figur 7.13, der illustrerer, at placeringen af punkt 606 og PT00-1. Forskellen mellem punkt 606 og PT00-1 er baseret på koordinater fra 'Manuel måling' 2023 (X, Y, H): 0.819 m, -0.044 m, 0.059 m. Fordi punkterne er placeret så tæt, antages det, at kvaliteten af observation til punkt PT00-1 er tilsvarende 606. Ligeledes antages det, at kvaliteten af observation til punkt PT64-1 er tilsvarende punkt 506. Derfor anvendes punkt PT00-1 og PT64-1 til at give en indikation på, hvilken kvalitet koordinaterne til et punkt på landfæstet kan bestemmes med."



**Figure 7.11.** Totalstation på pille 1 og **Figure 7.12.** Prisme placeret i punkt 318. prisme i punkt 118.

Ændringerne i hvilke detailpunkter der indgår i netværket er opsummeret i tabel 7.5



**Figure 7.13.** Skitsering af placering af PT00-1 i forhold til 606 på landfæste Fyn, skitsen er ikke målfast. Udarbejdet med udgangspunkt i [LIFA, 2018]

|                   | Planlagte detailpunkter | Etablerede detailpunkter |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| Landfæste Fyn     | 606                     | PT00-1                   |
| Pille 1           | 102, 118                | 118                      |
| Pille 2           | 218                     | 218                      |
| Pille 3           | 305, 318                | 318                      |
| Pille 4           | 402, 418                | 418                      |
| Landfæste Jylland | 506                     | PT64-1                   |

**Table 7.5.** Ændringer i detailpunkter der indgår i monitoringsnetværket

## 7.5 Opsætning i Geomos

Ved opsætningen af udstyret måles fixpunkter samt detailpunkterne en enkelt gang manuelt fra totalstationen, således totalstationen kender den omtrentlige position. Derefter styres alle observationer gennem Geomos. Herigennem kan fx

- Definere hvilke punkter der indgår i måleserien
- Antal statser
- Frekvensen af måleserier
- grænseværdier for afvigelser

Dataen visualiseres både direkte i Geomos og i GemosNow. I GeomosNow definere brugere selv hvilke informationer eks. koordinatafgivelse, absolutte koordinater eller rå observationer.

For at skabe et overblik over observationerne dannes følgende grafer i GeomosNow:

- Fixpunkter, afvigelse fra baseline for X, Y, H
- Totalstationens placering, X, Y, H
- Detailpunkternes afvigelse fra baseline for X, Y, H

Disse grafer samt Geomos anvendes til dagligt at tjekke at systemet kører. I monitoring anvendes der traditionelt alarmering ved udfald [Middelton et al., 2016, s. 19-20], men dette er ikke sat op til denne testperiode.

## 7.6 Opsamling

Det nye monitoringsnetværk er etableret på Lillebæltsbroen. I forbindelse med etableringen har der været praktiske udfordringer, der resulteret i ændringer i netværket. Udfordringerne, løsninger og konsekvenserne af ændringer opsummeres i tabel 7.6.

| Udfordring                                                                                                                                                      | Løsning                                                                             | Konsekvens                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Motoren på en af arbejdsplatformen er gået i stykker, arbejdsplatformen kan derfor ikke flyttes og spærre med den placering sigtet fra pille 4 til fixpunkt 53. | Fixpunkt 53 undlades i indmålingen af nye fixpunkter                                | De nye fixpunkter indmåles med opstillinger hvor der anvendes 3 frem for 4 fixpunkter.                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Der må ikke borres i betonen.                                                                                                                                   | Prismerne placeres i stativer og centres over detailpunkterne med tvangscentrering. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Punkt 506 og 606 kan ikke måles. Som erstatning observeres PT00-1 og PT64-1 der er placeret 1 m fra 606 og 506.</li> <li>- Risiko for at stativet arbejder ved temperaturændringer.</li> <li>- 'Centreringspredningen, prismer' er i testnettene er sat til 1 mm, hvilket forventes værende for lavt med disse ændringer.</li> </ul> |
| Der arbejdes med slibning og malerarbejde på broen, hvorved der er for stor risiko for at beskadiget totalstationerne hvis der ikke er skærm på.                | Det to totalstationer til det nuværende monitoringsystem anvendes.                  | <p>Det er ikke muligt at måle punkt 102, 305 og 402 fra netværket.</p> <p>Kravspecifikationen er stadig overholdt, men der måles nu kun ét detailpunkt på hver pille.</p>                                                                                                                                                                                                     |

**Table 7.6.** Ændringer i det planlagte netværk samt konsekvenserne heraf.

Monitoringsnetværket er etableret som vis på figur 7.14.

De nye fixpunkter er indmålt med en gennemsnitlig spredning på 2.4, 8.7, 0.9 mm(X, Y, H). Dette er højere end det forventede baserede på testnetberegningerne af fixpunksindmålingen, hvilket forventes at påvirke kvaliteten hvormed detailpunkterne kan bestemmes med senere hen. Der er, som beskrevet i afsnit 5.4, netspændinger mellem de oprindelige fixpunkter. Disse netspændinger videreføres til de nye fixpunkter.



**Figure 7.14.** Det etablerede moniteringsnetværk.

# Beregning og vurdering af data 8

---

*I dette kapitel behandles dataen fra det etableret monitoringsnetværk. Målet er at kunne vurdere hvorvidt dette netværk kan overholde kravspecifikationen. For at nå dertil opbygges kapitlet af tre dele. Først analyseres målingernes ændringer over tid i afsnit 8.1. Derefter sammenlignes udjævningen af observationer med testnette, for i afsnit 8.2 at kunne udledes i hvilken grad testnet afspejler observationerne. Sidst gennemgås kravspecifikations punkter, for at vurdere om netværket kan overholde disse.*

## 8.1 Generelt om målingerne

Behandlingen af målingerne indledes med at give et overblik over hvordan målingerne ser ud over tid samt om der variationer i målinger. Hvilket er væsentligt både for at forstå fejkilder, men også når dedr senere udvælges enkelte måleserier som beregnes gennem udjævning. Det generelle overblik over målingerne opnåes gennem programmet GeomosNow, der er Leicas monitoringssoftware (Geomos er beskrevet i afsnit 7.5. Geomos indeholder derudover visualiseringsmuligheder, således brugeren kan opsætte visualiserer af data over tid. Dette anvendes til det generelle overblik over målingerne, da det giver et overblik uden at skulle fortage manuelle udjævninger af hvert enkelt observations sæt. Der gøres i den forbindelse opmærksom på at Geomos ikke fortager udjævning af observationerne, som der er beregnet med i testnet.

Monitoringsnetværket har indsamlet data i perioden 30/4 kl 15 til 23/5 kl 11, monitoringen stoppede fordi testlicensen til Geomos udløb. Med en observationsfrekvens på 1 time, består datasættet af op til 552 måleserier. Ikke alle observationer har kunne gennemføres, dette behandles nærmere i afsnit 8.3.1. Prismet i punkt 418 var pga. vedligehold på broen nødvendt at nedtage den 6/5, og indgår herefter ikke i datasættet. Prismet i punkt 118 kan fra 16/5 ikke længere findes af totalstationen (årsag uddybes i afsnit 8.3.1), og indgår herefter ikke længere i datasættet. I observationsperioden er der fortaget ændringer i måden hvorpå Geomos beregner koordinaterne, disse ændringer er dokumenteret i Appendix I. Det komplette observationsdata findes i: Zipfil \8.Beregning \Observationsdata\_hz\_V\_dist\_April30\_Maj23.csv.

I analysen af malingerne fokuseres der på ændringer i koordinater til fixpunkter og detailpunkter over tid. Hertil anvendes to begreber:

- 'Spike': en pludselig og markant ændring
- Spænd: spænd fra laveste til højeste værdi i datasættet, som ikke er spike.

I afsnittet baseres analysen på grafer over ko ordinaternes afvigelse fra baseline. Baseline for detailpunkterne er koordinaterne fra 'Manuel måling' 2023, mens baseline for fixpunkterne er koordinaterne bestemt ved fixpunksindmålingen i afsnit 7.3. Alle graferne i dette afsnit

viser data for perioden 1/5 2014 kl 16 - 7/5 2024 kl 16. Denne periode er valgt, da der ikke foretages ændringer i opsætningen af Geomos. Dermed er beregningsmetoden for Geomos-kordinaterne ens i denne periode. Et døgn markeres af de lodrette streger på graferne.

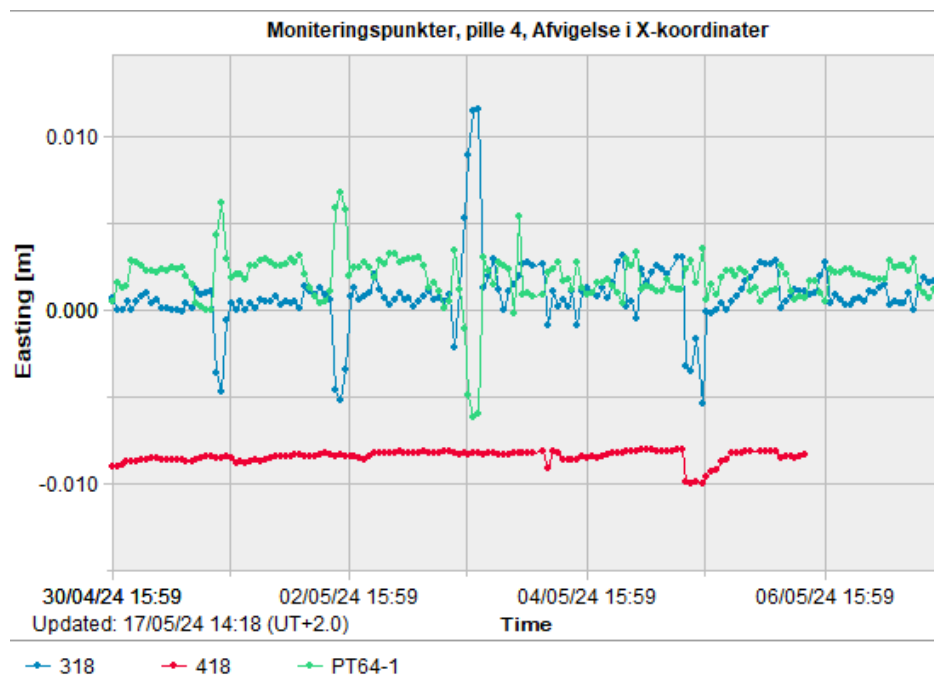
### 8.1.1 Koordinater til detailpunkter fra Geomos

Herunder analyseres ændringerne i koordinaterne til detailpunkterne.

#### X-koordinater:

Ændringer i x-koordinaterne til detailpunkterne målt fra pille 4 fremgår af figur 8.1. X-koordinaterne til detailpunkterne målt fra pille 1 følger samme mønster.

- På målinger til 218, PT00-1, 318 og PT64-1 ses systematiske variationer med frekvens af et døgn, hvor x-koordinaten har et spænd på ca. 3 mm.
- På 218, 318, PT00-1 og PT64-1 er der 'spikes' i om eftermiddagen (kl. 12-16). Dette ses ved at x-koordinaten for 318 fra den 2/5 2024 har en 'spike' på -0.006 m, mens PT64-1 der måles i modsatretning, har en 'spike' på ca +0.006 m i sammetidsrum. Dette kunne tyde på at punkter der måles mod solenretning i dette tidsrum (PT00-1 og 318) får lavere x-koordinater, mens punkter der måles modsat retning får højere x-koordinater i sammen størrelsesorden.
- Spændet i 118 og 418 er kun 1 mm - disse to punkter måles inde på pillen, mens de restante punkter måles over vand.



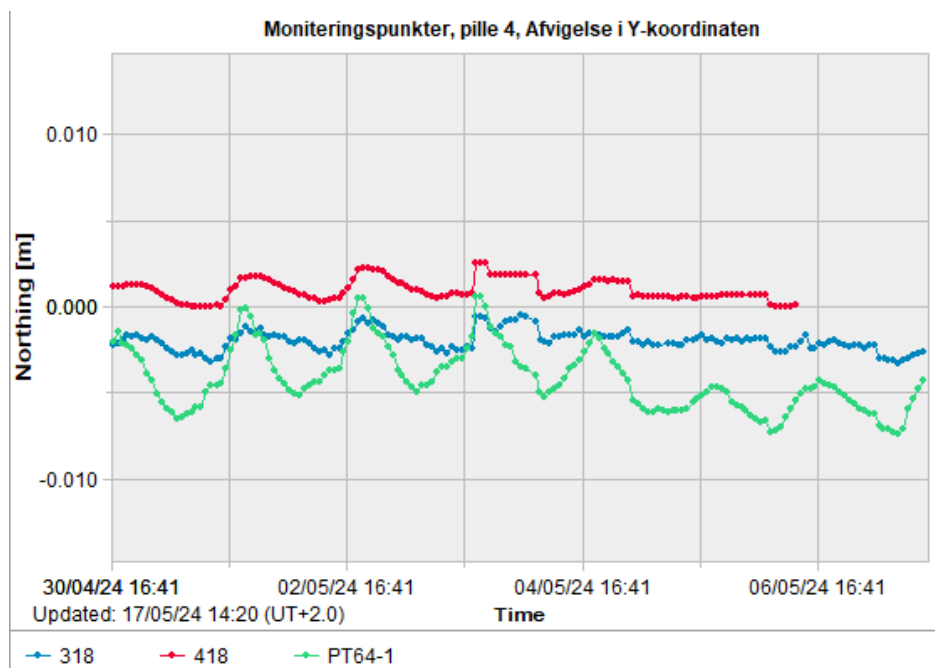
*Figure 8.1.* Afvigelse i x-koordinaten for monitoringspunkter målt fra pille 4[Geomos Now].

#### Y-koordinater:

Ændringer i Y-koordinaterne til detailpunkterne målt fra pille 4 fremgår af figur 8.2 . Y-koordinaterne til detailpunkterne målt fra pille 1 følger samme mønster.

- Overordnet set systematiske variationer med frekvens som et døgn. Spændet i dataen bliver mindre eller forsvinder helt fra den 5. og 6. maj.

- Størrelsesordenen af spændet er generelt ca 3 mm, mens spændet for PT64-1 er 6 mm.

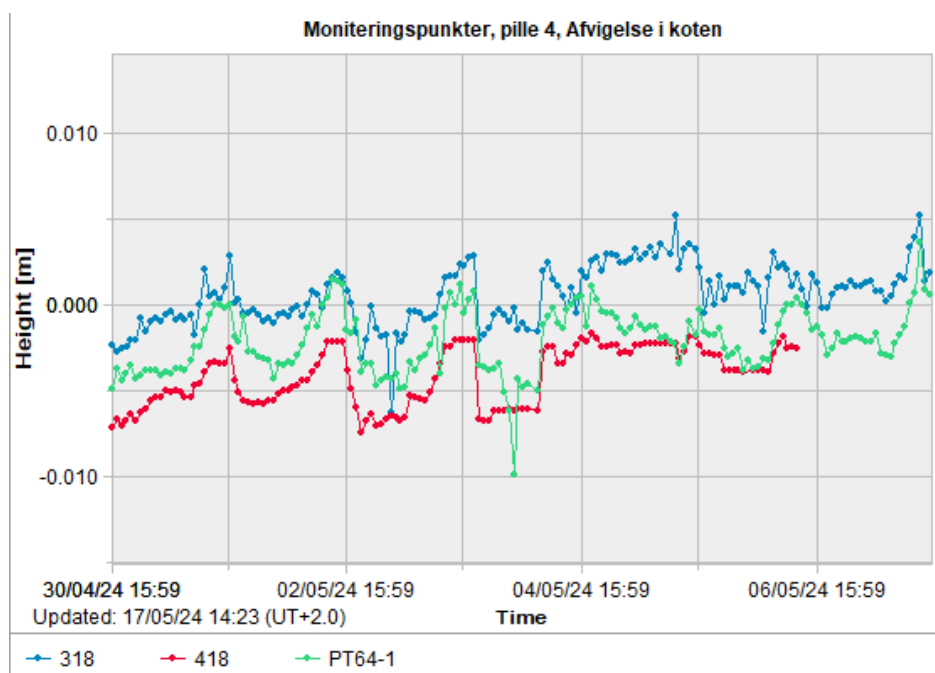


*Figure 8.2.* Afvigelse i y-koordinaten for monitoringspunkter målt fra pille 4[Geomos Now].

#### Koter:

Ændringer i koterne til detailpunkterne målt fra pille 4 fremgår af figur 8.3. Y-koordinaterne til detailpunkterne målt fra pille 1 følger samme mønster.

- Spænd af størrelseordene 6 mm
- Spænd er mindre systematiske end for X- og Y-koordinaterne.
- Generelt måles der højest koter om eftermiddagen og lavest om natten.



*Figure 8.3.* Afvigelse i koten for monitoringspunkter målt fra pille 4[Geomos Now].

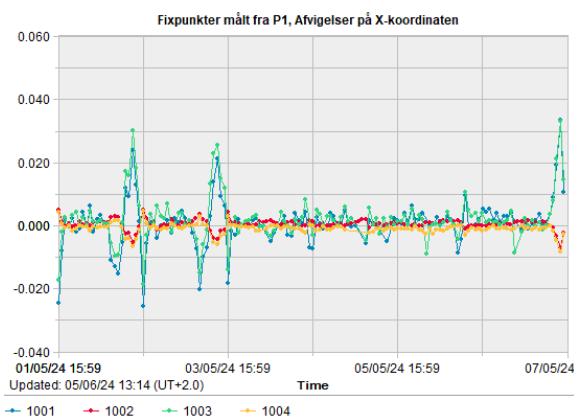
### 8.1.2 Fixpunkter fra Geomos

Herunder analyseres X, Y, koten for fixpunkterne i netværket. Fixpunkter målt fra opstilling 1 er navngivet 1000, mens de samme fixpunkter målt fra opstilling 4 navngives 4000.

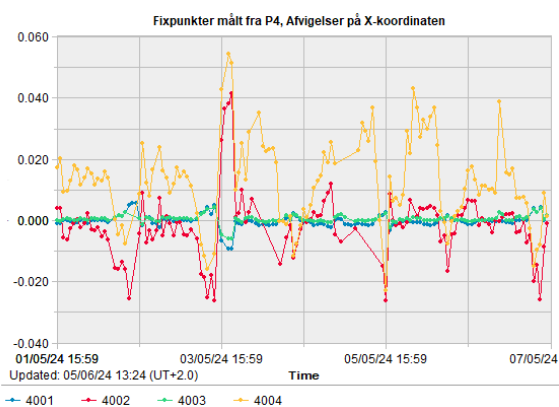
#### X-koordinater:

Ændringer i x-koordinaterne til de 4 fixpunkter (observeret fra 2 opstillinger) fremgår af figur 8.4 og 8.5.

- Målinger på tværs af bæltet (pkt. 1001, 1003, 4001 og 4002) har spikes på op til 6 cm. Ved fixpunkter målt ind mod kysten (1002, 1004, 4001 og 4003) forekommer der ikke spikes, og det daglige spænd i x-koordinaten har en størrelsesorden på ca 1 cm.
- Ved 1001 og 1003 forekommer der 'spikes' i dataen kl 11-15, mens 4002 og 4004 har længere perioder med store afvigelser fra baseline.
- Den 4.-6. maj er spændet af x-koordinaterne for 1001 og 1003 betydeligt mindre.



**Figure 8.4.** Afvigelse i X-koordinaten for fixpunkter målt fra pille 1 [Geomos Now].

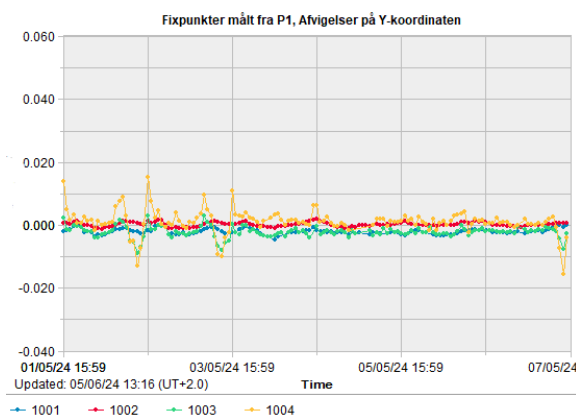


**Figure 8.5.** Afvigelse i X-koordinaten for fixpunkter målt fra hhv pille 1 [Geomos Now].

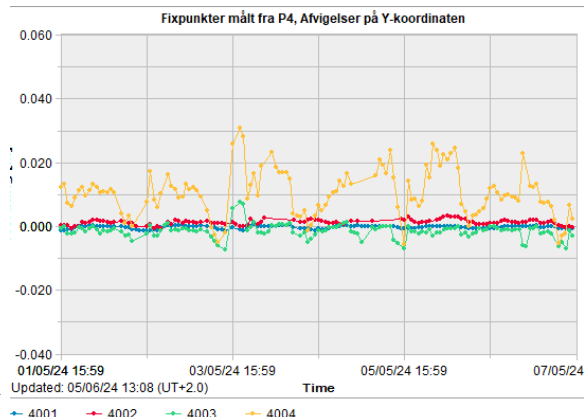
#### Y-koordinater:

Ændringer i Y-koordinaterne til de 4 fixpunkter (observeret fra 2 opstillinger) fremgår af figur 8.6 og 8.7.

- Y-koordinaten til fixpunkt 1 og 2 har fra begge opstillinger et spænd på op til 5 mm.
- Ved fixpunkt 4 ses spikes i målingerne fra begge opstillinger, særligt ved måling fra pille 4 til fixpunkt 4 er der store udsving i Y-koordinaten. Dette sigte er med 808 m netværket længste.



**Figure 8.6.** Afvigelse i Y-koordinaten for fixpunkter målt fra pille 1[Geomos Now].

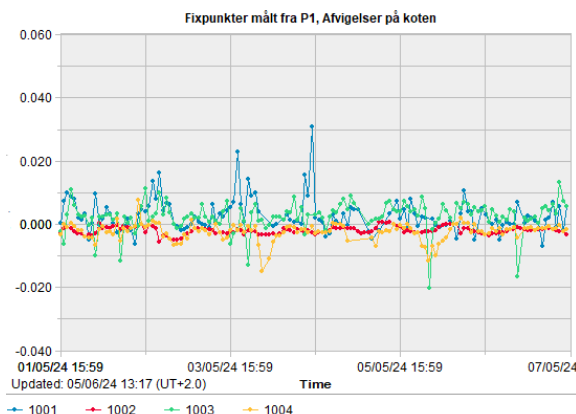


**Figure 8.7.** Afvigelse i Y-koordinaten for fixpunkter målt fra pille 4[Geomos Now].

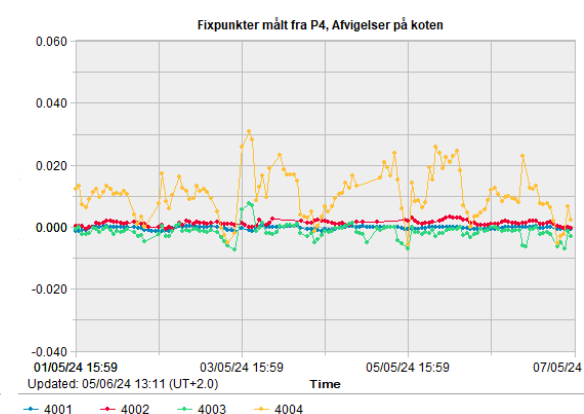
### Kote:

Ændringer i koten til de 4 fixpunkter (observeret fra 2 opstillinger) fremgår af figur 8.8 og 8.9.

- Ved målinger på tværs af bæltet (1001, 1003, 4002, 4004) er der større forskel fra en måling til den efterfølgende måling, hvilket ses ved at graferne for disse punkter er mindre homogene.
- Målinger til fixpunkter ind mod kysten (1002, 1004, 4001 og 4003) har systematiske variationer, med et spænd på 0.7 mm.



**Figure 8.8.** Afvigelse i koten for fixpunkter målt fra pille 1[Geomos Now].



**Figure 8.9.** Afvigelse i koten for fixpunkter målt fra pille 4[Geomos Now].

### 8.1.3 Tendenser

Ud fra datavisualiseringen gennem Geomos er der observeret følgende tendenser: Detailpunkter:

- Størrelsesordenen af spændet er op til: X: 3 mm, Y: 3-6 mm, h: 6 mm.
- X-koordinaterne er stabile, men med 'spikes' i målingen kl 12-16 ved målinger over vand. Indikation på at punkter der måles mod solretning i dette tidsrum (PT00-1 og 318) får lavere x-koordinater, mens punkter der måles modsat retning får højere x-koordinater i sammen størrelsesorden.
- Y-koordinaterne har systematisk variationer med frekvens af et døgn.

- Koden til detailpunkterne har indikation på variationer med frekvens af et døgn, men kurverne er mindre ensartede end for Y-koordinaten.

#### Fixpunkter

- Fixpunktsobservationer overbæltet har spikes i x-koordinaten og koden. I forhold til Y-koordinaten er der spikes i malingerne til fixpunkter 4 fra begge opstillinger.

At der er systematiske variationer i detailpunkterne af størrelsesorden 6 mm i de målt koordinater, indikerer at der kan være stor forskel, alt efter hvilke observationssæt der udvælges. Idet der ses en systematik i 'spikes' i tidsrummet 11-16, anbefales det at anvende måleserier uden for dette tidrum.

#### 8.1.4 Giver Geomos de samme resultater som udjævning?

Undersøgelsen af målingerne over tid genne Geomos, leder til overvejelsen; er Geomos resultaterne repræsentative/ens med udjævnede målinger? dette undersøges ved at udvælge 5 måleserier. Disse udjævnes i GeoAdjust og resultatet (koordinater) sammenlignes med den samme måleseriefra Geomos. Til sammenligningen udvælges 5 observationssæt. Observationssættene udvælges så det inkludere både 'spikes' og observationer tættere på middel. Apprioriværdierne sættes som ved testnet. Fixpunkterne anses i Geomos som fastholdte, og derfor beregnes det også således i GeoAdjust, hvor fixpunksspredningen sættes til 0.1 mm.

Observationerne kan kun udlæses fra Geomos som middel af de 3 målte satser. Derfor korrigeres spredningen på; horisontalretningen, vertikalvinklen og afstanden. Ved middeltal af gentagne målinger der er uafhængige af hinanden, forbedres spredningen  $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . De 3 satser anses værende uafhængige af hinanden, og derfor anvendes der i GeoAdjust følgende spredninger vedrørende instrumentet:

$$\sigma_{\text{hzo}gV} = \frac{0.150mg}{\sqrt{3}} = 0.087mg \quad (8.1)$$

$$\sigma_{\text{GrundDist}} = \frac{0.600mm}{\sqrt{3}} = 0.346mm \quad (8.2)$$

$$\sigma_{\text{AfstandDist}} = \frac{1.000ppm}{\sqrt{3}} = 0.577ppm \quad (8.3)$$

Afvigelsen mellem detailpunkternes koordinater bestemt i Geomos og gennem udjævning ses i tabel 8.1 og spredningen på afvigelsen er beregnet i tabel 8.2. Udfra spredningen på afvigelsen kan udledes det at koordinaterne generelt er sammenlignlige. Dog observeres Y-koordinaten til PT00-1 konsekvent 19 mm lavere i Geomos end i udjævningen, og omvendt er PT64-1 konsekvent ca 16 mm højere i Geomos end i udjævningen. Koden er også konsekvent lavere i Geomos end udjævningen. Fordi forskellen mellem Geomos og udjævningen er konsekvent, antages det, at de viste variationer i koordinaterne fra Geomos, er repræsentative for variationer i koordinater ved udjævning.

|              |        | Afvigelse mellem detailpunks koor. fra<br>Geomos og udjævning (GeoAdjust) [m] |         |         | Kvalitetsmål<br>for udjævningen |                    |
|--------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------------------------------|--------------------|
|              | Pkt.   | X                                                                             | Y       | H       | $\sigma_0$                      | Grovefejl, fjernet |
| 5. maj kl 20 | 118    | -0.0002                                                                       | -0.0003 | -0.0028 | 3.64                            | 0                  |
|              | 218    | -0.0012                                                                       | -0.0022 | -0.0021 |                                 |                    |
|              | 318    | -0.0012                                                                       | 0.0012  | -0.0036 |                                 |                    |
|              | 418    | -0.0014                                                                       | 0.0010  | -0.0031 |                                 |                    |
|              | Pt00-1 | -0.0011                                                                       | -0.0194 | -0.0009 |                                 |                    |
|              | PT64-1 | -0.0017                                                                       | 0.0156  | -0.0026 |                                 |                    |
| 3. maj kl 17 | 118    | 0.0004                                                                        | -0.0003 | -0.0041 | 3.89                            | 0                  |
|              | 218    | 0.0000                                                                        | -0.0012 | -0.0048 |                                 |                    |
|              | 318    | 0.0097                                                                        | 0.0014  | -0.0006 |                                 |                    |
|              | 418    | -0.0005                                                                       | 0.0010  | -0.0003 |                                 |                    |
|              | Pt00-1 | -0.0003                                                                       | -0.0195 | -0.0029 |                                 |                    |
|              | PT64-1 | -0.0099                                                                       | 0.0188  | -0.0001 |                                 |                    |
| 3. maj kl 03 | 118    | -0.0004                                                                       | -0.0027 | -0.0035 | 3.06                            | 0                  |
|              | 218    | 0.0003                                                                        | -0.0027 | -0.0035 |                                 |                    |
|              | 318    | 0.0010                                                                        | 0.0031  | -0.0068 |                                 |                    |
|              | 418    | 0.0000                                                                        | 0.0017  | -0.0068 |                                 |                    |
|              | Pt00-1 | -0.0005                                                                       | -0.0199 | -0.0017 |                                 |                    |
|              | PT64-1 | -0.0006                                                                       | 0.0195  | -0.0051 |                                 |                    |
| 1 maj kl 11  | 118    | 0.0000                                                                        | -0.0002 | -0.0023 | 2.14                            | 0                  |
|              | 218    | 0.0007                                                                        | -0.0010 | -0.0014 |                                 |                    |
|              | 318    | -0.0009                                                                       | 0.0016  | -0.0043 |                                 |                    |
|              | 418    | -0.0008                                                                       | 0.0013  | -0.0039 |                                 |                    |
|              | Pt00-1 | Null                                                                          | Null    | Null    |                                 |                    |
|              | PT64-1 | -0.0012                                                                       | 0.0180  | -0.0030 |                                 |                    |
| 4. maj kl 02 | 118    | 0.0002                                                                        | -0.0023 | -0.0035 | 2.09                            | 0                  |
|              | 218    | 0.0002                                                                        | -0.0035 | -0.0042 |                                 |                    |
|              | 318    | -0.0024                                                                       | -0.0002 | -0.0061 |                                 |                    |
|              | 418    | -0.0013                                                                       | -0.0005 | -0.0058 |                                 |                    |
|              | Pt00-1 | Null                                                                          | Null    | Null    |                                 |                    |
|              | PT64-1 | -0.0010                                                                       | 0.0169  | -0.0047 |                                 |                    |

**Table 8.1.** Sammenligning af detailpunkternes koordinater fra Geomos og udjævning (GeoAdjust). 'Null' betyder at punktet ikke er observeret i den pågældende måleserie. Rådata og databehandling findes i: Zipfil \8.Beregning \GeomosGeoAdjutSammenlign.

Den gennemsnitlige spredning på afvigelsen beregnes for X, Y, og H med formel 8.4 og fremgår af tabel 8.2 .

$$\sigma_{i\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_{i\Delta}^2}{n}} \quad (8.4)$$

[Jensen, 2020, s. 168]

| $\sigma_{i\Delta X}$ | $\sigma_{i\Delta Y}$ | $\sigma_{i\Delta H}$ |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0.0028 m             | 0.100 m              | 0.0038 m             |

**Table 8.2.** Spredning på afvigelsen mellem koordinater til detailpunkter fra Geomos og udjævnedes koordinater (GeoAdjust). Beregningen findes i: Zipfil \8.Beregning \GeomosGeoAdjutSammenlign \GeomosGeoAdjustSammenlign.m'

Årsager til forskelle:

- Geomos udjævner ikke observationerne. Derved opfattes fixpunkter ikke som samme punkter, målt fra to opstillinger.
- I Geomos bestemmes totalstationens position som et gennemsnit baseret på de sidste 6 timers målinger til fixpunkter. I udjævningen bestemmes totalstationens position ud fra observationer til fixpunkterne én måleserie.

## 8.2 Sammenligning med testnet

I kapitel 6 blev der regnet testnet på netværk, men hvordan afspejler testnettet virkeligheden?. Derfor sammenlignes et testnet af det etablerede netværk med udjævning af observationer.

Observationerne udjævnes i programmet GeoAdjust, som ligeledes anvendes til testnet. Dataforberedelse til en udjævning er forbundet med en del manuelt datahåndtering, da hver udjævning kræver følgende:

- Data udvælges i GeomosNow, og eksporteres i en kommasepareret fil. Se eksempel på årdata i Zipfilen \8.Beregning \Observationsdata\_April30\_Maj23.
- Observationerne inddeles i kolonner i Excel
- Observationer vedr. Hz, V og D kopieres for hvert punkt ind i en skabelon. Skabelonen følger formatet for udjævnings-fil til GeoAdjust. I skabelonen er eks. forløbige koordinater, fixpunktskoordinater, opstillinger, detailpunkter, appriorispredninger og sigteskivehøjder. Skabelonen til udjævningens-filen findes i Zipfilen \8.Beregning \TestnetVsUdj \Template.udj.

På grund af den manuelle datahåndtering laves der stikprøver på udjævninger.

Til denne sammenligning anvendes en fixpunktspredning svarende til nøjagtigheden hvormed fixpunkterne er indmålt (se kapitel 7 tabel 7.3). Testnettet og udjævning af observationer sammenlignes på vurderingskriterier for nøjagtighed, hvilket præsenteres i tabel 8.3. Resultatfiler for testnettet og udjævningen samt beregningen og sammenligningen af middelfejl findes i: Zipfil \8.Beregning \TestnetVsUdj \'Maj5kl20.dok\_GeoADJUST', 'Testnet2.dok\_GeoADJUST' og 'TestnetUdj.m'. Af tabellen kan det udledes at testnettet for det etableret netværk ikke kan overholde kravsspecifikationen, da 2 af detailpunkterne har en punktmiddelfejl over 2 mm. Dette er punkt PT00-1 og PT64-1 der er placeret på landfæsterne (udledt af beregningen i 'TestnetUdj.m'). At punktmiddelfejlen er højere her, end ved testnettet beregnet forud for etableringen (se 7), skyldes at fixpunkterne er indmålt med en højere fixpunktspredning, end forventet baseret på testnettet for fixpunksindmåling.

Sammenlignes testnettet med udjævningen af observationer, er den gennemsnitlige punktmiddelfejl 3.45 mm højere for observationerne end beregnet i testnettet jf. tabel 8.3. Ligeledes er kotespredningen 2.33 mm højere ved udjævning af observationer end i testnettet.

| Vurderingsparametre        | Testnet | Observationer | Difference |
|----------------------------|---------|---------------|------------|
| Gens. punktmiddelfejl [mm] | 1.92    | 5.38          | -3.45      |
| Punktmiddelfejl > 2 mm [.] | 2/6     | 6/6           |            |
| Gens. kotespredning [mm]   | 0.80    | 3.13          | -2.33      |
| Kotespredning > 2 mm [.]   | 0/6     | 6/6           |            |

**Table 8.3.** Sammenligning af nøjagtigheden for testnet af det etablerede netværk og udjævning af observationer (stikprøve med 5. maj kl 20). Datagrundlag og beregning findes i: Zipfil \8.Beregning \TestnetVsUdj \Maj5kl20.dok\_GeoADJUST', 'Testnet2.dok\_GeoADJUST' og 'TestnetUdj.m'

Herefter fokuseres på de enkelte detailpunkter. I tabel 8.4 indgår  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$  og  $\sigma_H$  for her af detailpunkterne beregnet ved hhv. testnet og udjævning samt en difference mellem udjævning og testnet. Af 'Difference' udledes at forskellen i spredningen på detailpunkterne beregnet i testnet og observationer er relativt ensartet i netværket. Dette indikerer at forskellene på detailpunkternes nøjagtighed intern i nettet er ens i testnet og observationerne. Et eksempel her på, at at detailpunkterne på landfæsterne ifølge testnet-analysen bør har højere  $\sigma_X$  end de resterende punkter i netværket, hvilket ud fra sammenligningen i tabel 8.4 også er tilfældet ved udjævningen. Når forskellen er systematisk, betyder det at testnet stadig kan anvendes til at estimere om et netværk er bedre end et andet.

| Pkt.   | Testnet    |            |            | Udjævning  |            |            | Difference |            |            |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|        | $\sigma_X$ | $\sigma_Y$ | $\sigma_H$ | $\sigma_X$ | $\sigma_Y$ | $\sigma_H$ | $\sigma_X$ | $\sigma_Y$ | $\sigma_H$ |
| PT00-1 | 1.7        | 1.2        | 0.8        | 4.5        | 3.6        | 3.4        | 2.8        | 2.3        | 2.3        |
| 118    | 1.5        | 1.2        | 0.8        | 3.8        | 3.5        | 3.0        | 2.3        | 2.3        | 2.2        |
| 218    | 1.3        | 1.2        | 0.9        | 3.8        | 3.6        | 3.5        | 2.4        | 2.5        | 2.6        |
| 318    | 1.3        | 1.2        | 0.8        | 3.8        | 3.6        | 3.2        | 2.4        | 2.5        | 2.4        |
| 418    | 1.5        | 1.2        | 0.7        | 3.8        | 3.4        | 2.6        | 2.2        | 2.3        | 1.9        |
| PT64-1 | 1.7        | 1.2        | 0.8        | 4.5        | 3.6        | 3.1        | 2.4        | 2.8        | 2.3        |

**Table 8.4.** Sammenligning af den forventede (testnet) og faktiske fixpunktsspredning (stikprøve med 5. maj kl 20). Data findes i Zipfilen \8.Beregning \TestnetVsUdj \Maj5kl20.dok\_GeoADJUST', 'Testnet2.dok\_GeoADJUST' og 'TestnetUdj.m'.

At punktmiddelfejlen er væsentligt højere end forventet samt at  $\sigma_0$  jf., tabel 8.1 er over 1, indikerer at observationerne påvirkes af andre fejlkilder. Som beskrevet i kapitel 2 Metode beregner testnettet de forventede kvalitet baseret på de tilfældige fejl. Nøjagtighedsforskellen mellem testnet og observationerne, kan dermed skyldes; at de tilfældige fejl optræder anderledes end forventet, grove fejl eller systematiske fejl. I forhold til grove fejl, er der i observationsættet ikke fundet observationer med et normaliserede residual over 3. I forhold til de systematiske fejl, er totalstationsmålinger påvirket af følgende systematiske fejl der ikke elimineres ved gennemslag, stavdrejning og refraktion undersøges nærmere. Stavisdrejning da prisme i punkt 118, 218, 318 og 418 er placeret i stativer, og refraktion, da der måles over lange afstande.

### 8.2.1 Stativdrejning

Denne systematiske fejl relaterer sig traditionelt til stativet hvorpå totalstationen sidder, men i dette tilfælde er der tale om prisme der er placeret i stativer. Fire ud af de seks prisme sidder i stativer, mens de resterende 2 er fastmonteret. Derfor undersøges det, om der er større variationer i horisontalretningen på 218 og 318 end på PT00-1 og PT64-1. Dette

undersøges ved at beregne spredningen på hz til hver af detailpunkterne. Spredningen er beregnet ud fra 10 dages målinger, hvilket giver 140-216 hz-retning observationer til hvert detailpunkt, der er forskel i antallet af observation pga udfald og 418 blev taget ned før tid. Beregning kan findes i Zipfil \BeregningObservationer \SammenlignTestnetObservationer \Stativdrejning.m. Spredningen præsenteres i tabel 8.5, hvorudfra spredningen på horisontalretningen er 0.0015-0.0016 mgon for 218, 318, PT00-1 og PT64-1, mens spredningen er 0.0056-0.0057 på 118 og 418. Spredningen på horisontalretningen er dermed markant højere på 118 og 418, som er afstande på ca 2 m, end på de resterende punkter. Men der kan ikke udledes højere spredning på horisontalretningen ved prismer på stativer sammelignet med fastmonterede prismer.

| Spredning på hz [gon] |        |        |        |                       |        |
|-----------------------|--------|--------|--------|-----------------------|--------|
| Prismer på stativer   |        |        |        | Fastmonterede prismer |        |
| 118                   | 218    | 318    | 418    | PT00-1                | PT64-1 |
| 0.0056                | 0.0016 | 0.0016 | 0.0057 | 0.0015                | 0.0015 |

**Table 8.5.** Spredning på horisontalretningen til detailpunkterne. Beregning findes i Zipfil \8.Beregning \TestnetVsUdj \Stativdrejning.m

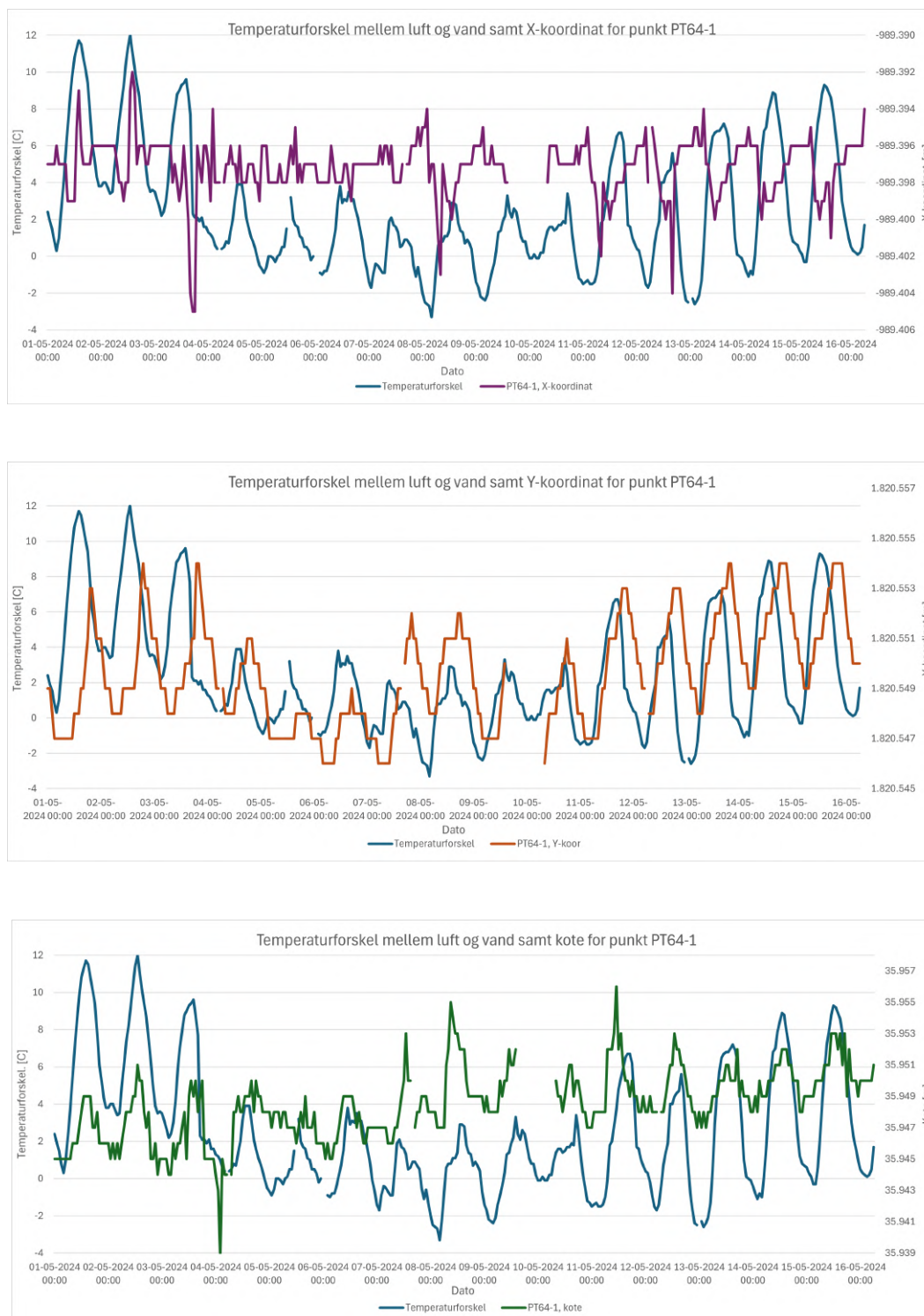
### 8.2.2 Refraktion

Totalstationens sigtelinje påvirkes af temperatur, tryk og luftfugtighed, da disse ændre på brydningsforholdet i luften. Når brydningsforholdet i luften som lyset passerer, ikke er konstant bliver sigtelinjen krum, også kaldet refraction. Dette kan fx skyldes at terrænoverfladen er varmere end luften, hvorved den varme luft stiger og blander sig med den køligere luft. Dette skaber turbulens i luften, så brydningsforholdet kommer til at variere langs sigtelinjen, hvilket medfører en skiftende refraction. Refractionen vil derfor ofte være mere stabil når terrænet og luften har samme temperatur. [Jacobi et al., 2002, s. 24-25].

Derudover blev der i afsnit 8.1.3 identificeret systematiske udsving i de observerede koordinater med en frekvens af et døgn. Idet temperaturen ofte ændre i cykluser af et døgn, kan de daglige udsving måske skyldes refraction. Dette leder til følgende hypotese; De systematiske udsving med frekvens af et døgn, skyldes refraction. Refractionen kendes ikke, derfor testes hypotesen, ved at sammenholde variationerne i målingerne med temperaturforskellen mellem luften og vandet. Temperaturforskellen mellem luft og vand samt koordinaterne til punkt PT64-1 vises på figur 8.10. Punkt PT64-1 er valgt som eksempel, da dette punkt er ét af de fire punkter der observeres over vand. Fælles for de tre grafer på figuren er at x-aksen er observationstidspunktet, og y-aksen til venster viser temperaturforskellen mellem luften og vandet (lufttemp - vandtemp.), denne akse relaterer sig til den blå graf. Y-aksen til højre på de tre grafer viser koordinat til PT64-1, denne akse varierer mellem de tre grafer, da 1. graf repræsenterer X-koordinaten med lilla, 2. graf Y-koordinaten med orange og 3. graf koten med grøn.

Af graferne udledes en korrelation mellem temperaturforskellen, og særligt Y-koordinaten og koten. Refraction bør kun påvirke vertikalvinklen, og dermed bør kun koten være påvirket af temperaturen hvis det skal verificeres, at udsvingene skyldes refraction. Derfor kan det udledes at der er korrelation mellem udsvingene i observationerne og temperaturforskellen, men det kan ikke bekræftes at korrelationen er forårsaget af refraction. En måde hvorpå refractionens indflydelse på observationerne kunne fastlægges, er ved at gennemføre et

gensidigt trigonometrisk nivellement, hvilket betyder at vertikalvinklen observeres i begge endepunkter [Jacobi et al., 2002, s. 74-75]. Herved elimineres indflydelsen af jordkrumning og refraction, under den antagelse, at refractionen er ens i de to målinger. Denne måleprocedure er ikke testet i dette projekt.



**Figure 8.10.** Datagrundlag: Luft og vandtemperatur fra [DMI, 2024]. Databehandling fremgår af: Zipfil \8.Beregning \TestnetVsUdj \Temperaturindflydelse.xlsx

### 8.3 Er kravsspecifikationen overholdt?

Hvor det tidligere afsnit gav et indblik i målingerne over tid, fokuseres der i dette afsnit på om kravsspecifikationen er overholdt. Formålet er at kunne konkludere om netværket kan overholde kravsspecifikationen fra afsnit 3.5, som er følgende:

1. Koordinater defineres i det lokal koordinatsystem der anvendes til Manuel måling.
2. Der måles X, Y, H til minimum 1 af det fysisk afmærkede detailpunkter på hver af de 4 piller samt de to landfæster. Gerne til flere på hver pille.
3. Der måles minimum 1 gang i timen.
4. Der måles minimum to satser.
5. Normaliserede residual på den enkelte måling maks. 3.0.
6. Punkterne skal minimum bestemmes med følgende nøjagtighed:
  - Punktmiddelfejl: maks 2 mm
  - Kotespredning: maks 2 mm

1. krav er overholdt, i og med at de nyetablerede fixpunkter er indmålt i koordinatsystemet fra Manuel måling.

2. krav: I netværket indgår følgende punkter:

- Landfæste Fyn: PT00-1
- Pille 1: 118
- Pille 2: 218
- Pille 3: 318
- Pille 4: 418
- Landfæste Jylland: PT00-1

Derved måles der X, Y og H til hver af de 4 piller samt de 2 landfæster. På pillerne måles de fysisk afmærkede punkter som kravsspecifikationen forskriver. På de to landfæster, var det til denne test ikke muligt at placere prismer i de afmærkede punkter (506 og 606) uden fastmontering. Som erstatning måles der til 2 eksisterende monitoringsprismer. Punkt PT00-1 erstatter punkt 606, mens punkt PT64 erstatter 506. Da erstatningspunkterne er placeret under 1 m fra hhv. 506 og 606 antages det at kvaliteten af observationer er ens. Derfor anvendes punkt PT00-1 og PT64-1 til at give en indikation på hvilken kvalitet koordinaterne til et punkt på landfæstet kan bestemmes med. Det er sikret at sigtelinjer til de afmærkede punkter (506 og 606), det kræver således bare at der fastmonteres prismer i de to punkter.

4. krav: Der måles 3 satser i hver måleserie, så dette krav er overholdt.

5. krav overholdes ved at grove fejl, dvs. observationer med normaliserede residual over 3.0, er fjernet i udjævningen.

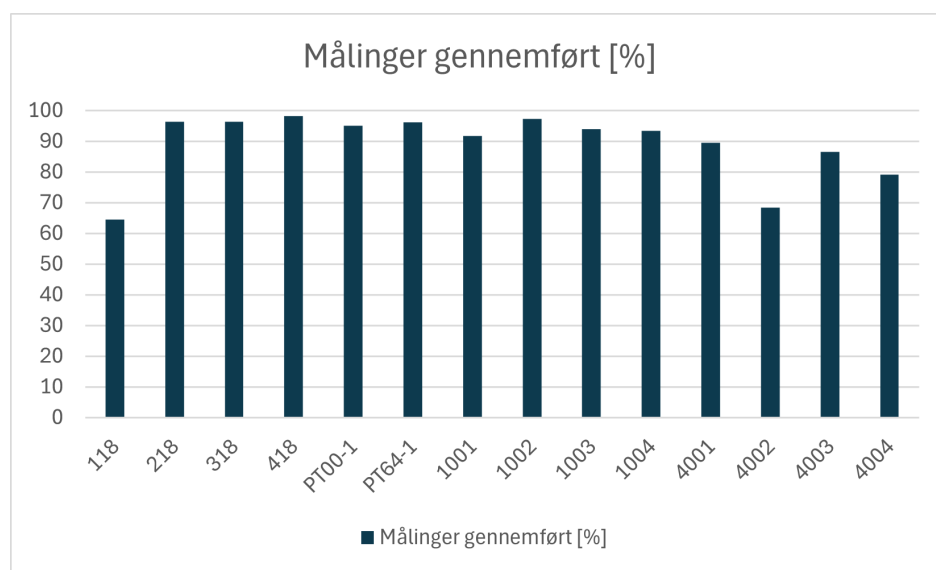
Krav 3 og 6 kræver en mere dybdegående analyse for at kunne besvare, dette analyseres i hhv afsnit

#### 8.3.1 Krav 3 - måling af detailpunkterne minimum en gang i timen

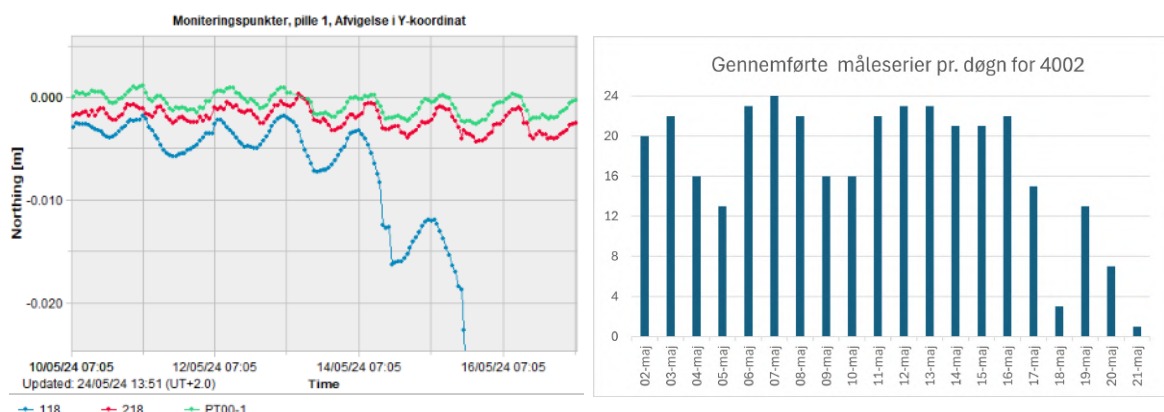
Totalstationerne, er som beskrevet i 7, sat til at måle 1 gang i timen. Men i løbet af observationsperioden, har der ofte været serier hvor enten enkelt eller alle prismer ikke er

fundet. Figur 8.11 viser hvor mange procent af de forventede målinger der er gennemført for hver af både fixpunkter og detailpunkter. På figuren er fixpunkterne navngivet fx 4001, hvor det sidste tal henviser til hvilket fixpunkt, mens det første tal angiver hvilke opstilling fixpunktet er målt fra. Dvs 4001 er fixpunkt 4 målt fra opstillingen på pille 4. Af figuren udledes at 118 og 4002 har en markant lavere andel af gennemførte målinger. Ved 118 skyldes dette at totalstationen fra den 16/5 ikke længere kunne finde prismet. Figur 8.12 viser ændringer i Y-koordinaten for detailpunkter målt fra pille 1 frem til tidspunktet hvor målingerne stoppede. På baggrund af grafen, hvor Y-koordinater for 118 falder ca 1 cm på 5 timer, forventes det, at der mellem kl 14 og 15 er blevet skubbet til stativet med prismet.

I forhold til 4002 fordeler de gennemførte målinger sig som vist på figur 8.13. Af figuren ses at der er få gennemførte målinger i de sidste dage af observationsperioden. Natten mellem 8. og 9. maj har der været strømafbrydelse på broen, hvilket medfører at ingen målinger er foretaget.



**Figure 8.11.** Graf over procentdelen af målinger der er gennemført for hvert af punkterne for perioden 1/5 kl 17 til 23/5 kl 10. Datagrundlag fremgår af: Zipfil \8.Beregning \Oppetid.xlsx



**Figure 8.12.** Måling til detailpunkter på pille 1, hvor 118 ændre y-koordinat drastisk. Data fra GeomosNow.

**Figure 8.13.** Gennemførte målinger til fixpunkt 4002 pr. døgn. Datagrundlag: Zipfil \8.Beregning \Oppetid.xlsx

### 8.3.2 Krav 6 - detailpunkternes nøjagtighed

For at kunne vurdere nøjagtigheden af detailpunkterne dette udvælges to observationssæt der udjævnes gennem GeoAdjust.

Udjævnes en enkelt måleserie, er detailpunkterne bestemt med en punktmiddelfejl på 4.85 mm, og samtlige detailpunkter over kravet på 2 mm. Ligeledes er kotespredningen 3.75 mm og alle 6 detailpunkter har en kotespredning over 2 mm. Nøjagtighedskravet kan dermed ikke overholdes ved udjævning over én måleserie. Men fordi målingerne er fortaget som fast monitoring, indsamles der mange observationer af de samme detailpunkter. Derfor undersøges det om nøjagtighedskravet kan overholdes hvis der udjævnes over fx 2, 4 og 8 måleserier. Til analysen anvendes data fra 5/5 kl 20 til 6/5 kl. 03 samt 3. maj kl 00-08. Resultatfilerne for udjævningerne fremgår af: Zipfil \8.Beregning \Kravsspec \Nøjagtighed.  $\sigma_0$ , antal grove fejl, punktmiddelfejl og kotespredningen af disse fire udjævninger fremgår af tabel 8.6. I udjævningen anvendes en grovfejlsgænse, således observationer med normaliserede residual  $>3$  fjernes fra udjævningen. Af tabel udledes:

- Punktmiddelfejl og kote spredningen falder ved udjævning over flere måleserier. Ved udjævning over 4 måleserier, kan kravsspecifikationen overholdes.
- $\sigma_0$  falder når der udjævnes over flere måleserier.
- Antallet af grove fejl stiger drastisk når der udjævnes over flere måleserier.

Det undre at  $\sigma_0$  falder ved udjævning over flere måleserier, derfor undersøges dette nærmere (se Appendix J for bagvedliggende test og hypoteser). Forklaring: ved udjævning over flere måleserier, er der flere overbestemmelser i netværket og dermed har observationerne en lavere IP. Eventuelle fejl skal derved være mindre for at blive klassificeret som en grov fejl. Dette ses i udjævningerne i tabel 8.6 ved at der ingen grove fejl er fundet, ved udjævning af 1 og 2 måleserier, mens der ved 4 måleserier er fundet 2-4 grove fejl, og ved udjævning over 8 måleserier 12-14 grovefejl. Når observationer, der er udpeget som grove fejl, fjernes, bliver udjævningen tættere på apprioriværdier, og dermed falder  $\sigma_0$ . At  $\sigma_0$  reduceres medfører at punktmiddelfejlen og kotespredning falder, fordi disse skaleres med  $\sigma_0$ . Derved hænger indflydelsen på  $\sigma_0$ , grovefejl og punktmiddelfejl samt kotespredning sammen.

Analyseres det, hvor de grove fejl optræder, er det af tabel 8.6 meget tydeligt at observationer der involvere fixpunkt 4 er overrepræsenteret. Ved udjævningen af 8 måleserier den 5. maj, involverer i 9 ud af 12 grove fejl fixpunkt 4, mens det samme er gældende for 11 ud af 14 grove fejl ved udjævningen for den 3.maj (s. Særligt udsat er horisontalretnings observationen fra pille 4 til fixpunkt 4, dvs. tværs over Lillebæltet. Denne horisontalretning observation er en grov fejl i hhv 7 ud af 8, og 8 ud af 8 serier (se tabel 8.6). Samlede set indikerer dette at der er noget problematisk ved fixpunkt 4. I forbindelse med fixpunktsindmålingen i afsnit 7.3 var fixpunkt 4, som det eneste fixpunkt, markant ringere bestemt end forventet ud fra testnet. En årsag til de mange grove fejl ved fixpunkt 4 kan derved være pga. fixpunktskoordinaten, hvilket ud fra testnet analysen i kapitel 6 også var en af netværkets største svagheder.

Af udjævningen kan det konkluderes, at kravsspecifikationens nøjagtighedskrav kan overholdes ved udjævning over 4 eller flere måleserier. Idet der kun er fortaget udjævning af to stikprøver, kan der være tidpunkter, hvor nøjagtighedskravet ikke kan overholdes. Dette vurderes ikke at være en udfordring, i og med der bare skal være minimum én måling årligt der overholder med punktmiddelfejl  $< 2$  og spredning på kote  $< 2$  mm, for at kravet til 'Manuel måling' er

opfyldt.

Alternativ kunne frekvensen af målingerne sættes op. Ved eks. frekvens af hver 15 min, vil udjævning over 4 måleserier falde inden for en time.

|                          | Antal måleserier der udjævnes over | $\sigma_0$ | Grovefejl, fjernet                                                                                                                                       | $\sigma_P$            | $\sigma_H$            |
|--------------------------|------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 5. maj kl 20 - 6. maj 03 | 1 måleserie                        | 2.89       | 0                                                                                                                                                        | 4.85 mm<br>6/6 > 2 mm | 3.75 mm<br>6/6 > 2 mm |
|                          | 2 måleserier                       | 2.20       | 0                                                                                                                                                        | 2.61 mm<br>6/6 > 2 mm | 2.02 mm<br>4/6 > 2 mm |
|                          | 4 måleserier                       | 1.84       | 2, begge på hz, P4 -> fix 4.                                                                                                                             | 1.57 mm<br>0/6 > 2mm  | 1.22 mm<br>0/0 > 2 mm |
|                          | 8 måleserier                       | 1.57       | 12 grove fejl. Fordeling:<br>P4 -> fix, hz 4: 7<br>P4 -> fix 4, afs: 2<br>P4 -> fix 2, hz:2<br>P1 -> fix 3, afs: 1                                       | 0.9 mm<br>0/0 > 2 mm  | 0.75 mm<br>0/0 > 2mm  |
| 3. maj kl 00-08          | 1 måleserie                        | 3.48       | 0                                                                                                                                                        | 5.79 mm<br>6/6 > 2mm  | 4.55 mm<br>6/6 > 2mm  |
|                          | 2 måleserier                       | 2.58       | 0                                                                                                                                                        | 3.03 mm<br>6/6 > 2mm  | 2.38 mm<br>5/6 > 2mm  |
|                          | 4 måleserier                       | 1.81       | 4, alle på hz, P4 -> fix 4                                                                                                                               | 1.53 mm<br>0/6 > 2mm  | 1.18 mm<br>0/6 > 2mm  |
|                          | 8 måleserier                       | 1.55       | 14 grove fejl. Fordeling:<br>P4 -> fix 4, hz:8<br>P4 -> fix 2 hz:1<br>P1 -> fix 1, hz:1<br>P1 -> fix 4 hz:1<br>P4 -> fix 4, afs: 2<br>P1 -> fix 3, hz: 1 | 0.94 mm<br>0/6 > 2mm  | 0.71 mm<br>0/6 > 2mm  |

**Table 8.6.** Udjævning af observationsdata over hhv 1, 2, 4 og 8 måleserier.  
Data fra resultatfiler: Zipfil \8.Beregning \Kravsspec \Nøjagtighed.

## 8.4 Opsamling

I dette kapitel er observationerne indsamlet gennem monitoringsnetværket analyseret og vurderet.

Generelt for målingerne er der observeret systematiske variationer i koordinaterne til detailpunkterne. X-koordinaterne er stabile, men med 'spikes' i målingen kl 12-16 ved målinger over vand. Indikation på at punkter der måles mod solretning i dette tidsrum (PT00-1 og 318) får lavere x-koordinater, mens punkter der måles modsat retning får højere x-koordinater i sammen størrelsesorden. Y-koordinaterne har systematisk variationer med frekvens af et døgn. Koden til detailpunkterne har indikation på variationer med frekvens af et døgn, men kurverne er mindre ensartede end for Y-koordinaten. I forhold til fixpunkterne har fixpunktsobservationer over bæltet spikes i x-koordinaten og koden. I forhold til Y-koordinaten er der spikes i målingerne til fixpunkter 4 fra begge opstillinger. Idet der ses en

systematik i 'spikes' i tidsrummet 11-16, anvendes der til den fremadrettede databehandling måleserier uden for dette tidrum.

Ved sammenligning af udjævningen af observationer med testnettet konkluderes det, at nøjagtigheden af detailpunkterne er markant ringere end beregnet i testnettet. Punktmiddelfejlen for detailpunkterne i udjævningen er 3,45 mm højere end beregnet i testnettet, og tilsvarende er den gennemsnitlige kotespredning 2,33 mm højere end forventet. Denne betydelige forskel mellem udjævningen og testnettet kan skyldes systematiske fejl, da testnettet kun beregner kvalitet baseret på tilfældige fejl. Blandt de tilfældige fejl er stativdrejning og refraktion undersøgt som potentielle årsager. Der er ikke fundet indflydelse af stativdrejning, og det kan ikke konkluderes, om variationerne i data skyldes refraktion. Derimod kan det konkluderes, at der er en korrelation mellem de daglige variationer i data og temperaturforskellen mellem luft og vand. At netværkets faktiske nøjagtighed afviger så markant fra testnettet, betyder, at testnettet i dette tilfælde kun i ringe omfang kan anvendes til at analysere netværkets forventede kvalitet, da de systematiske fejl har en så stor indflydelse.

At nøjagtigheden er markant ringere end beregnet i testnet, medfører også at netværket ved udjævning over én måleserie, ikke kan overholde kravsspecifikationens nøjagtighedskrav. Da målingerne imidlertid er foretaget som fast monitoring, indsamles der mange observationer af de samme detailpunkter. Derfor er der i projektet testet med udjævning over 1, 2, 4 og 8 måleserier. Udjævnes der over 4 måleserier bringes punktmiddelfejlen og kotespredningen for samtlige detailpunkter  $< 2\text{ mm}$ , og dermed overholdes kravsspecifikations nøjagtighedskrav. Den gennemsnitlige punktmiddelfejl for detailpunkterne ligge ved udjævning over 4 måleserier på 1.57 mm og den gennemsnitlige kotespredning til 1.22 mm. Der gøres opmærksom på at dette er udledt ved stikprøve, og nøjagtigheden vil variere fra måleserie til måleserie. End videre bør nøjagtigheden af netværket ses i relation til at detailpunkterne, ud fra afsnit 8.1 har et spænd på op til 3 mm, 3 mm og 6 mm på hhv. X, Y og koten. Disse variationer er betydelige i forbindes med at broens historik, ved manuel måling, vurderes på baggrund af én X, Y, h koordinat til hver detailpunkt.

Alle kravsspecifikationens punkter er opsummeret i tabel 8.7.

Gennem databehandlingen i dette kapitel, fremstår observationerne til fixpunkt 4 gentagne gange som afvigende:

- Observationerne til fixpunkt 4, særligt fra optillingen på pille 4, har jf. afsnit 8.1 et markant højere spænd i de opserverede koordinater, end de resterende fixpunkter.
- Grovefejl er overrepræsenteret ved observationer der involverer fixpunkt 4 jf. afsnit 8.3. Ved udjævningen af 8 måleserier er fixpunkt 4 involveret i hhv. 9 ud af 12 grove fejl og 11 ud af 14 grove fejl. Særlig er der grove fejl på horisontalretnings målingerne fra pile 4 til fixpunkt 4, hvor der er grove fejl i hhv 7 ud af 8, og 8 ud af 8 serier.

En mulig årsag til udfordringerne vedrørende fixpunkt 4, er fixpunktskoordinaterne. I forbindelse med fixpunktsindmålingen i afsnit 7.3 var fixpunkt 4, som det eneste fixpunkt, markant ringere bestemt end forventet ud fra testnet. Når fixpunkter fastholdes, vil eventuelle fejl i fixpunktskoordinaten tilskrives observationerne til fixpunktet. Netop fixpunktskoordinaterne var i Testnet-kapitlet også vurderet som en af netværkets største svagheder. Udfordringen vedrørende koordinatbestemmelse til fixpunkterne skyldes at monitoringsnetværket, jf. kravsspecifikationen, skal bestemme detailpunkternes koordinater

| Krav                                                                                                                                              | Overholdes kravet?                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Koordinater defineres i det lokal koordinatsystem der anvendes til Manuel måling                                                                  | Ja                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Der måles X, Y, H til minimum 1 af de fysisk afmærkede detailpunkter på hver af de 4 piller samt de to landfæster. Gerne til flere på hver pille. | Delvist, der måles X, Y og H til 1 punkt på hver af de 4 piller samt de to landfæster, men punkterne på landfæsterne er ikke de det specificeret fra 'Manuel måling'. Erstatningspunkterne er placeret under 1 fra de rigtige punkter, og der forventes derfor overførbare resultater. |
| Der måles minimum 1 gang i timen.                                                                                                                 | Netværket er sat til at måle 1 gang i timen. Men i observationsperioden er detailpunkterne igennemsnit målt 91% af de planlagte serier.                                                                                                                                                |
| Der måles minimum to satser.                                                                                                                      | Ja, der måles 3 satser i hver serie.                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Normaliserede residual på den enkelte måling maks. 3.0.                                                                                           | Ja, grove fejl fjernes i forbindelse med udjævningen.                                                                                                                                                                                                                                  |
| Punkterne skal minimum bestemmes med følgende nøjagtighed:<br>Punktmiddelfejl: maks 2 mm. Kotespredning: maks 2 mm                                | Nøjagtighedskravet kan overholdes ved udjævning over 4 måleserier.                                                                                                                                                                                                                     |

**Table 8.7.** Opsummering af om monitoringsnetværket overholder kravsspecifikationen.

i et lokal koordinatsystem defineret af 4 eksisterende fixpunkter. Når der i det eksisterende fixpunktsnet er netspændinger, overføres disse til de nye fixpunkter.

I beregningen af observationerne er der støt på følgende beregningstekniske forhold, som Banedanmark ved anvendelse af dette monitoringsnetværk skal tage stilling til:

- Skal fixpunkterne fastholdes?
- Hvormange serier må der udjævnes over?
- Er en stabilitet på ca. 91% for detailpunkterne og 87% for fixpunkterne tilfredsstillende til formålet?



# Konklusion 9

I dette projekt er der designet, etableret og vurderet et fælles monitoringsnetværk, med sigte på at opfylde kravsspecifikationen for de to målinger der på nuværende tidspunkt udføres sideløbende på Lillebæltsbroen. Denne problemstilling er undersøgt ud fra følgende problemformulering: *Hvordan kan et monitoringsnetværk på Lillebæltsbroen designes, således kravene til både 'Manuel måling' og eksisterende permanente monitoring opfyldes?* Netværket designes på baggrund af kravsspecifikationen opstillet i kapitel 3, hvor kraven fra den nuværende monitoring og manuel måling kombineres. Derved agerer kravsspecifikationen gennem resten af projektet som guideline for at kravene til begge målinger overholdes. Gennem projekt er der ved testnet vurderet forskellige netværkskonstellationer, og herudfra etableret et monitoringsnetværk på Lillebæltsbroen der med den estimerede kvalitet kan opfylde kravsspecifikationen. Det etablerede netværk er skitseret på figur 9.1, og indeholder:

- 2 opstillinger, placeret på pille 1 og 4 hvor totalstationerne fra den nuværende permanente monitoring anvendes.
- 4 fixpunkter.
- 6 detailpunkter, fordelt med én på hver af de fire piller samt de to landfæster.



**Figure 9.1.** Det etablerede monitoringsnetværk.

Moniteringsnetværket har indsamlet data i en periode på 23 dage med en frekvens af 1 time. Databehandlingen i forbindelse med vurdering af hvorvidt kravsspecifikationen overholdes, er fortaget som stikprøver, da der i forbindelse med udjævningen af observationsdataen indgår manuel dataformatering. Baseret på udjævningen af disse stikprøver der analyseret og vurderet følgende til kravsspecifikationens dele:

**1. Koordinater defineres i det lokal koordinatsystem der anvendes til Manuel måling.**

Det etablerede netværk anvender nyetablerede fixpunkter, der er indmålt fra fixpunkterne til Manuel måling. Derved er koordinaterne bestemt i samme koordinatsystem. Det krav medfører udfordringer i forhold til at overholde nøjagtighedskravet, hvilket skyldes at der i det lokale koordinatsystem der anvendes til Manuel måling, er netspændinger som beskrevet i afsnit 5.4.

**2. X, Y, H bestemmes til minimum én af det fysisk afmærkede detailpunkter på hver af de 4 piller samt de to landfæster. Gerne til flere på hver pille.**

Dette krav opfyldes, da der i moniteringsnetværket bestemmes X, Y og H til ét punkt på hver af de fire piller samt de to landfæster.

**3. Der måles minimum 1 gang i timen.**

Netværket er sat til at måle 1 gang i timen. Men i observationsperioden er detailpunkterne igennemsnit målt 91% af de planlagte serier.

**4. Der måles minimum to satser.**

I hver måleserie måles 3 satser.

**5. Normaliserede residual på den enkelte måling maks. 3.0.**

Grove fejl, dvs. observationer med normalisereder residual over 3.0, er fjernet i udjævningen.

**6. Detailpunkterne skal minimum bestemmes med følgende nøjagtighed:**

- Punktmiddelfejl: maks. 2 mm
- Kotespredning: maks. 2 mm

Nøjagtighedskravet kan ikke overhold ved udjævning af én enkelt måleserie. Med ved udjævning over 4 måleserier, opnås en punktmiddelfejl på 1.53-1.57 mm og en kotespredning på 1.18-1.22 mm. De udførte udjævninger indikerer derfor at nøjagtighedskravet kan overholdes ved udjævning over 4 måleserier.

På baggrund af argumentation til ovenstående punkter i kravsspecifikationen, vurderes det at kravsspecifikationen kan overholdes med det etablerede netværk, såfremt der udjævnes over 4 måleserier. Detailpunkternes nøjagtighed kan dog påvirkes kraftigt gennem flere valg i beregningsprocessen eks. fixpunksspredning og antal serier der udjævnes over. Derfor anbefales det, at der i kravsspecifikationen fastsættes en procedure til beregningen af observationer, forslag til indhold heri præsenteres i afsnit 10.3. Ønskes det at forbedre nøjagtigheden af den enkelte måleserie, kan dette jf. testnet-analysen i afsnit 6.7 opnås omkostningseffektivt ved at øge antallet af fixpunkter.

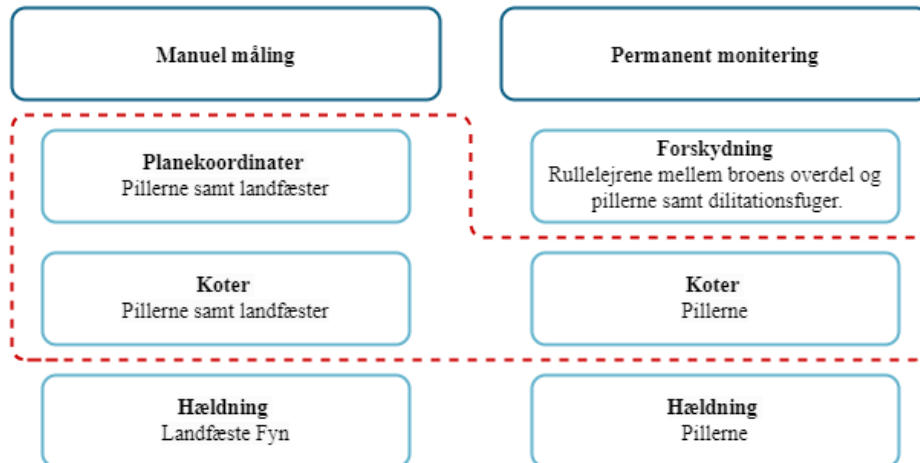
De udledte konklusioner vedrørende kvaliteten af udjævnede observationer, er fortaget som stikprøver, da udjævningen inkludere manuelt datahåndtering. Konklusioner vedrørende kvaliteten af udjævninger er derved udledt af et relativt lille datagrundlag. Dette betyder at konklusionerne er en eksemplificering fremfor generelle konklusioner.

Derudover bør den opnåede nøjagtighed af detailpunkterne ses i kontekst til, at koordinaterne varierer over døgnet. I det indsamlede datasæt er der observeret systematiske spikes i tidsrummet 11-16 spikes på X-koordinaten til detailpunkter beliggende på en anden pille, end opstillingen er placeret på. På baggrund her af, anbefales det at udlade observationer i dette tidspunkt, i forbindelse med analysen af broen historik, der på nuværende tidspunkt indsamles ved 'Manuel måling'. Dette uddybes i afsnit 10.3.

I dette projekts netværk er der betydelige afvigelser mellem detailpunkternes nøjagtighed estimeret i testnet og de indsamlede observationer. Dette kan indikere, at den estimerede nøjagtighed fra testnet ikke giver et tilstrækkeligt billede af den konkrete nøjagtighed, hvilket komplicerer designprocessen med at opfylde nøjagtighedskrav.

Det etablerede monitoringsnetværk er ét eksempel på et netværk der overholder kravsspecifikationen med få økonomiske omkostninger. Kravspecifikationen kan derudover formentlig opfyldes på mange forskellige måder, og med andre teknikker end der er afsøgt i dette projekt.

Som beskrevet i opsamlingen til kapitel 3 'Nuværende monitoring på Lillebæltsbroen' er projektet afgrænset til elementer vedr. koordinater og koter. Dette betyder at projektet har om handlet de elementer fra 'Manuel måling' og 'Nuværende permanent monitoring' der er omkranset af en rød stiplede linje på figur 9.2. For at alle elementerne er inkluderet i ét setup, bør potentiometre og inklinometre fra den nuværende permanente monitoring fortsætte uændret. Derudover bør der tilføjes et inklinometer på Landfæste Fyn, da hældningsmåling af dette landfæste er en del af 'Manuel måling'.



**Figure 9.2.** Elementerne i 'Manuel måling' og 'Nuværende permanent monitoring'. Den røde stiplede linje viser hvilke elementer der er bearbejdet i dette projekt.



# Perspektiver 10

---

## 10.1 Eksemplaritet

Eksemplaritet omhandler, hvordan viden opnået gennem projektet, kan anvendes i andre sammenhænge. Dette er relevant i forhold til at argumentere for, at den opnået viden, færdigheder og kompetencer kan anvendes i en bredere kontekst end design af monitoringsnetværk til Lillebæltsbroen.

Denne, gennem projektet opnåede, viden kan direkte anvendes til at implementere et nyt monitoringsnetværk eller fortage ændringer i det eksisterende, således 'Manuel måling' fremadrettede er unødvendig.

Gennem teori, testnet-analyse, implementering og beregning af er der opnået eksemplarisk viden, der kan overføres til design af monitoringsnetværk til andre broer og konstruktioner. For eksempel er der opnået viden om hvilke parametre der kan justeres på i et netværk, med henblik på at forbedre konkrete kvalitetsmål, eks. nøjagtigheden eller den eksterne pålidelighed. Dette øger overførbareheden til netværksdesign i andre sammenhænge.

Derudover er der opnået indsigt i forskellen mellem teori og praksis, og tilegnet praktiske erfaringer vedrørende etablering af et monitoringsnetværk.

Der er opnået en forståelse af at et krav til en punktmiddelfejl ikke kan stå alene som kvalitetsmål. Både fordi kvalitet i netværk består af både nøjagtighed og pålidelighed, men også fordi spredningen på koordinater er stærkt påvirket af de valg der træffes i beregningsprocessen, hvilket uddybes i afsnit 10.3.

## 10.2 Kommentarer på Banedanmarks krav

Det etablerede netværk anvender nyetablerede fixpunkter, der er indmålt fra fixpunkterne til manuel måling. Denne metode er valgt da Banedanmark stiller krav om at opmålingen foretages i samme lokale koordinatsystem. Det eksisterende fixpunktsnet har, som beskrevet i afsnit 5.4, netspændinger. Ved indmålingen af de nye fixpunkter videreføres disse netspændinger. Beregnes udjævningen med fastholdte fixpunkter, anses fixpunkterne som fejlfrie, og residualer tillægges derfor observationerne. Derved fremstår observationerne ringere end appriori-værdierne, hvor ved  $\sigma_0$  bliver  $> 1$ . Spredningerne på detailpunkternes koordinater skaleres med  $\sigma_0$ , og derfor medfører en  $\sigma_0$  over 1, højere spredning på detailpunkterne. Dette betyder samledeset, at netspændingerne i fixpunktsnettet gør det sværere at overholde kravsspecifikationens nøjagtighedskrav. En løsning herpå kunne, som nævnt i afsnit 5.4, være at nykoordinere fixpunkterne således netspændingerne minimeres. Ulempen herved, er at det påvirker sammenligneligheden af detailpunkternes koordinater, hvilket er årsagen til at Banedanmark ikke umiddelbart ønsker denne løsning.

På nuværende tidspunkt anvendes der ved manuel måling én X, Y, H -koordinat til hver detailpunkt pr. år, til sammenligning af broens bevægelser over tid. Hvis manuel måling erstattes af dette monitoringsnetværk, bliver der indsamlet store datamængder, hvilket kræver at der tages stilling til, hvilken måling der fremadrettede indgår i historikken. I datasættet indsamlede i forbindelse med dette projekt, er der observeret daglige variationer på 3-6 mm på X, Y og H for detailpunkterne og yderligere er der observeret spikes i tidsrummet 11-16. Derved vil det have stor indflydelse, om der anvendes de højeste, laveste eller gennemsnits koordinat. Derfor bør variationerne i dataen undersøges nærmere, også med den sæsonafhængige variation. Dette bør ende med retningslinjer for hvilke observationstidspunkter der inkluderes i broens historik, samt om der anvendes en enkeltstående observation eller en gennemsnitskoordinat beregnet over eks. 1 dag, 1 uge, 1 måned eller hele året.

### 10.3 Tilføjelse til kravsspecifikationen

Gennem bearbejdningen af observationerne fra monitoringsnetværket, er det blevet tydeligt at punktmiddelfejl som kvalitetsmål, kan påvirkes af mange valg i beregningsvalg. Derfor vurderes det at et krav til detailpunkterne punktmiddelfejl ikke kan stå alene, i forhold til at sikre en bestemt nøjagtighed. Nøjagtighedskravet bør derfor suppleres af beregningsretningslinjer, der sikre at Banedanmark får målinger af den nøjagtighed de forventer. Yderligere vil beregningsretningslinjer øge sammenligneligheden af detailpunkterne, hvilke jf. 3.3 er særligt væsentligt i 'Manuel måling'.

Beregningsretningslinjerne kunne inkludere følgende:

- Appriori-værdier skal afspejle det anvendte instrument
- Centreringsspredningen skal afspejle det anvendte prisme
- Den faste udjævning beregnes med en fixpunktsspredning på 0.001 m
- Der udjævnes over et fastsat antal måleserier

### 10.4 Forbedringsforslag til netværket

Hvis netværket skal implementeres permanent, foreslås følgende forbedringer baseret på de erfaringer, der er tilegnet gennem projektet:

- Fastmontering af prisme i detailpunkterne.
- Det anbefales at tilføje følgende detailpunkter; 102, 305 og 402, for at opfylde Banedanmarks ønske om flere detailpunkter på hver pille. Dette kræver at de eksisterende totalstationer hæves ca. 1 m i højden.
- Tilføje to fixpunkter mere til netværket, samt flytte fixpunkt 4. De to supplerende fixpunkter placeres mellem de eksisterende fixpunkter.

# Bibliography

---

- Amin Alizadeh-Khameneh et al., 2018.** M Amin Alizadeh-Khameneh, Milan Horemuž, Anna B. O Jensen and Johan Vium Andersson. *Optimal Vertical Placement of Total Station*. Journal of surveying engineering, 144(3), 2018.
- Baarda, 1968.** W. Baarda. *A testing procedure for use in geodetic networks*. Publications on geodesy, vol 2, nr. 5, 1968.
- Banedanmark, 2011.** Banedanmark. *Landmåling på banen - Banenorm BN2-94-2*, Banedanmark, 2011. URL <https://www.bane.dk/da/Leverandoer/Krav/Tekniske-normer-og-regler/-/media/55F5037655D2472B9644E03B9E7E8F5C.ashx>.
- Banedanmark, Ukendt år.** Banedanmark. *Hovedtegning af overbygning*, Ukendt år. URL `Zipfil\InterneDokumenter\PermanentMonitering`.
- Banedanmark, 2014a.** Banedanmark. *Lillebæltsbroen - Registrering af bevægelser i bropiller*, 2014a. URL `Zipfil\InterneDokumenter\PermanentMonitering\Viden21dec`.
- Banedanmark, 2018.** Banedanmark. *KRAVSPECIFIKATION (KSF) - Kontrolopmåling af store jernbanebroer*, Banedanmark, 2018.
- Banedanmark, 2023.** Banedanmark. *Lillebæltsbroen\_2023*, Banedanmark, 2023. URL `\Zipfil\InterneDokumenter\ManuelMaaling`.
- Banedanmark, 2014b.** Banedanmark. *Lillebæltsbroen, mødereferat 10 MARTS 2014*, 2014b. URL `Zipfil\InterneDokumenter\PermanentMonitering\Viden21dec`.
- Caspary, 2000.** W. F. Caspary. *Concepts og network and deformation analysis*. School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales, 2000.
- Cederholm, 2000.** Peter Cederholm. *Udjævning*. AAU, 2000.
- COWI, 2013.** COWI. *Lillebæltsbroen af 1935 - Registrering af monitoreringssystem for vandrette bevægelser i bropille 2 & 3.*, 2013. URL `Zipfil\InterneDokumenter\PermanentMonitering`.
- DMI, 2024.** DMI. *Vejrarkiv*, 2024. URL <https://www.dmi.dk/vejrarkiv>.
- Ghilsni, 2018.** Charels D. Ghilsni. *Adjustment computations - Spatial Data Analysis*. ISBN: 9781119390312. John Wiley & Sons, 2018.
- Horemuž and Andersson, 2011.** Milan Horemuž and Johan Vium Andersson. *Analysis of the Precision in Free Station Establishment by RTK GPS*. Survey review - Directorate of Overseas Surveys, 43(323), 679–686, 2011.
- Horemuž and Jansson, 2017.** Milan Horemuž and Patric Jansson. *Optimum Establishment of Total Station*. Journal of surveying engineering, 143(2), 2017.

- Jacobi et al., 2002.** Ole Jacobi, Jørgen Risager and Klaus Thiesen. *Landmåling - Instrumenter og Metoder*. Danmarks Tekniske Universitet, 2002. ISBN 87-983272-0-8.
- Jensen, 2020.** Karsten Jensen. *Landmåling i Teori og Praksis*. Aalborg Universitetsforlag, 2020. ISBN 978-87-7210-283-2.
- Khameneh, 2015.** Mohammad Amin Alizadeh Khameneh. *ON OPTIMISATION AND DESIGN OF GEODETIC NETWORKS*. Royal institute of technology, Stockholm, Licentiate Thesis in Geodesy, 2015.
- Klein et al., 2019.** Ivandro Klein, Marcelo Tomio Matsuoka, Matheus Pereira Guzzatto, Felipe Geremia Nievinski, Mauricio Roberto Veronez and Vinicius Francisco Rofatto. *A new relationship between the quality criteria for geodetic networks*. Journal of Geodesy, 2019, s. 529–544, 2019.
- Leica Geosystems, 2009.** Leica Geosystems. *Leica TS30*, 2009. URL [\Zipfil\InterneDokumenter\Leica\\_TS30](#).
- Leica Geosystems, 2015.** Leica Geosystems. *ATRplus- White Paper*, 2015. URL [https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/atrplus\\_wp.pdf?sc\\_lang=da&hash=87816B8D1E472A654467BA3A0899C1A1](https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/atrplus_wp.pdf?sc_lang=da&hash=87816B8D1E472A654467BA3A0899C1A1).
- Leica Geosystems, Ukendt år.** Leica Geosystems. *Product information, Prism dimensions*, Ukendt år. URL [https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica\\_reflectors\\_ds.pdf](https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_reflectors_ds.pdf).
- Leica Geosystems, 2019.** Leica Geosystems. *Surveying Reflectors - White Paper Characteristics and Influences*, 2019. URL [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj8zfuw5cOGAxWmFRAIHWOFC0oQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fleica-geosystems.com%2F-%2Fmedia%2Ffiles%2Fleicageosystems%2Fproducts%2Fwhite-papers%2Fleica\\_surveying\\_reflectors-\\_wp.ashx%3F%3Dru%26hash%3DE55EF1743717EC96414F64415FA417EF&usg=AOvVawOST1m1yuKvf5tejXHjc7Vv&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj8zfuw5cOGAxWmFRAIHWOFC0oQFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fleica-geosystems.com%2F-%2Fmedia%2Ffiles%2Fleicageosystems%2Fproducts%2Fwhite-papers%2Fleica_surveying_reflectors-_wp.ashx%3F%3Dru%26hash%3DE55EF1743717EC96414F64415FA417EF&usg=AOvVawOST1m1yuKvf5tejXHjc7Vv&opi=89978449).
- LIFA, Ukendt.** LIFA. *Lillebæltsbroen af 1935. Forslag til supplerende målinger (LIFA)*., Ukendt. URL [Zipfil\InterneDokumenter\PermanentMonitering\Viden21dec](#).
- LIFA, Ukendt år.** LIFA. *Fixpunktsfil - LBB\_Fix\_YX.fix*, Ukendt år. URL [Zipfil\5.eksperimentdesign\LBB\\_Fix\\_YX.fix](#).
- LIFA, 2018.** LIFA. *Lillebæltsbroen\_MoniteringsFix*, 2018. URL [Zipfil\InterneDokumenter\PermanentMonitering](#).
- LIFA, 2023a.** LIFA. *Transformation- 2023\_LBB\_tr.RES*, 2023a. URL [Zipfil\5.eksperimentdesign\2023\\_LBB\\_tr.RES](#).
- LIFA, 2015.** LIFA. *Dokumentation af monitering af lillebæltsbroen af 1935*, 2015.
- LIFA, 2022.** LIFA. *OPMÅLINGSRAPPORT LILLEBÆLTSBROEN AF 1935*, 2022.

- LIFA, 2023b.** LIFA. *Bilag B Netskitse*, 2023b. URL [Zipfil\InterneDokumenter\ManuelMaaling](#).
- Middelton et al., 2016.** Campbell R. Middleton, Paul R. A. Fideler and Paul J. Vardanega. *Bridge Monitoring - A practical guide*. ISBN: 978-0- 47277-6059-. ICE Publishing, 2016.
- Neves, 2020.** CLáudia Neves. *Structural Health Monitoring of Bridges*, 2020. URL <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1467990/FULLTEXT01.pdf>. Doctoral Thesis in Structural Engineering and Bridges.
- Ogundare, 2015.** John Olusegun Ogundare. *Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice*. Wiley, 2015. ISBN xx.
- Seemkooei, 2001a.** Alireza Amiri Seemkooei. *Strategy for designing geodetic network with high reliability and geometrical strength*. Journal of surveying engineering, 127(3), s. 104–117, 2001a.
- Seemkooei, 2001b.** Alireza Amiri Seemkooei. *Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks*. Journal of geodesy, 75, s. 227–233, 2001b.
- Sørensen, 2024.** Kathrine Rix Sørensen. *Structural Health Monitoring af broer*, AAU, 2024.
- Vaisala, 2014.** Vaisala. *Vaisala Weather Transmitter WXT520 - Access to Real Time Weather Data*, 2014. URL [\Zipfil\InterneDokumenter\Vejrstation\\_specifikation](#).
- Vaníček et al., 2001.** P Vaníček, M. R. Craymer and E. J Krakiwsky. *Robustness analysis of geodetic horizontal networks*. Journal of Geodesy, 75(July), 2001. URL <https://doi.org/10.1007/s001900100162>.
- Yetkin et al., 2008.** Mevlut Yetkin, Cevat Inal and Cemal Yigit. *Optimal design og deformation monitoring networks using PSO algorithm*. FIG, Maj, 2008.



Part I

Appendiks

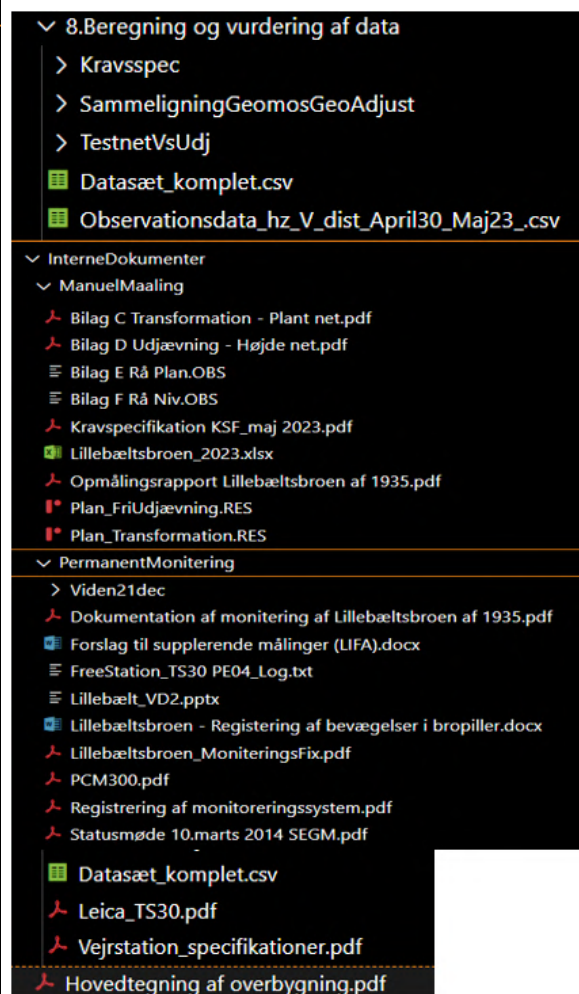
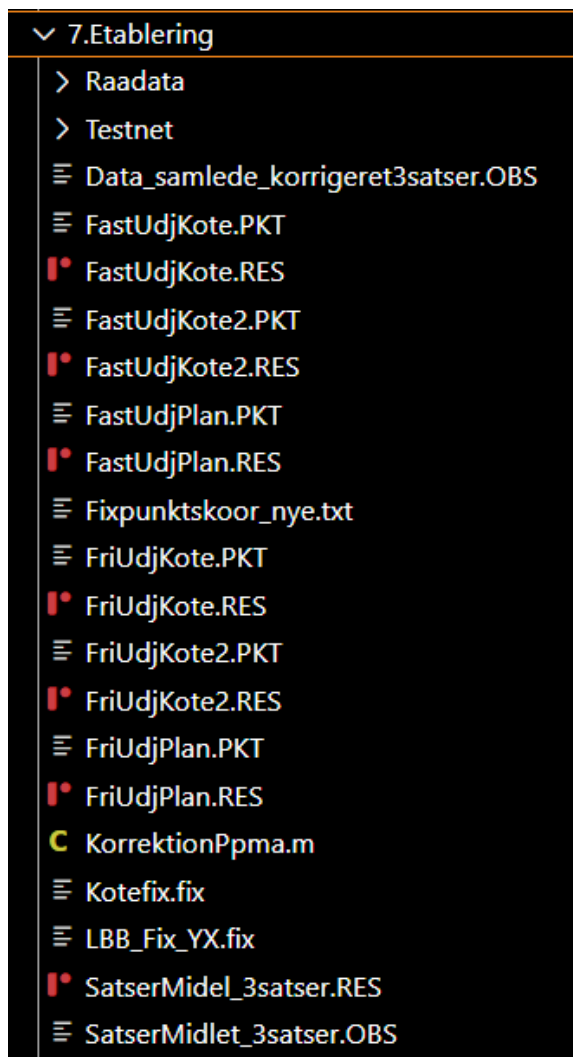
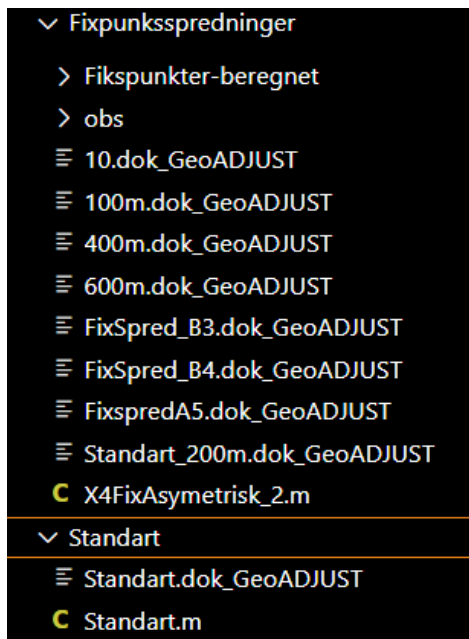


# Overblik over indhold i zipfilen



Indholdet i zipfilen er struktureret efter hvilket kapitel materialet anvendes til i rapporten .

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div><div>▼ ZIPFIL</div><div><div>▼ 5.Eksperimentdesign</div><div><div>🔴 2023_LBB_tr.RES</div><div>≡ LBB_Fix_YX.fix</div><div>🟢 Template.m</div></div></div><div><div>▼ 6.Testnet</div><div><div>▼ 2.ordensdesign</div><div><div>≡ 2.ordens.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 Ordens2.m</div></div></div><div><div>▼ A_FixPlacering</div><div><div>≡ A1.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 A1.m</div><div>≡ A2.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 A2.m</div><div>≡ A3.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 A3.m</div><div>≡ A4.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 A4.m</div><div>≡ A5.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 A5.m</div></div></div><div><div>▼ B_FixAntal</div><div><div>≡ B1.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 B1.m</div><div>≡ B3.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 B3.m</div><div>≡ B4.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 B4.m</div></div></div></div></div> | <div><div>▼ C_opstillinger</div><div><div>≡ C1.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 C1.m</div><div>≡ C2.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 C2.m</div><div>≡ C3.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 C3.m</div><div>🟢 C4.m</div></div></div> <div><div>▼ D_vaegt</div><div><div>≡ TS16_2satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS16_2satser.m</div><div>≡ TS16_3satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS16_3satser.m</div><div>≡ TS16_5satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS16_5satser.m</div><div>≡ TS16_8satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS16_8satser.m</div><div>≡ TS30_3satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS30_3satser.m</div><div>≡ TS30_5satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS30_5satser.m</div><div>≡ TS30_8satser.dok_GeoADJUST</div><div>🟢 TS30_8satser.m</div></div></div> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

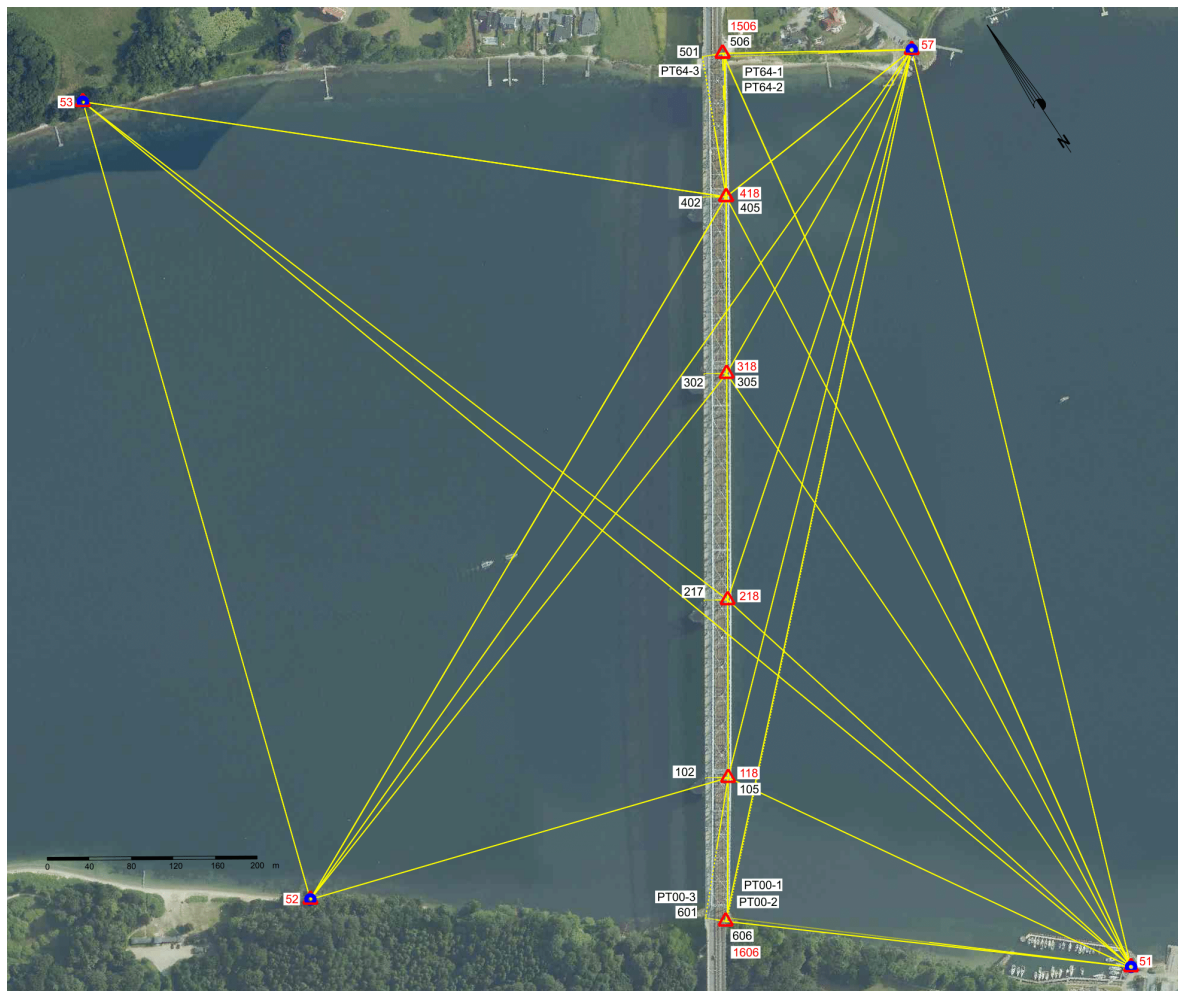


# Oversigts kort til rapportens kapitler

## B

Ved flere af rapportens kapitler anvendes punktnumre på konkrete detailpunkter. Derfor anbefales det at printe følgende kort, og have dem liggende fremme sideløbende med læsningen af rapporten.

### B.1 Netskitse fra 'Manuel måling'



*Figure B.1.* Netskitse over punkter inkluderet i 'Manuel måling'. Redigeret version af [LIFA, 2023b].

## B.2 Det etablerede netværk



**Figure B.2.** Det etablerede monitoringsnetværk.

# Samtale med BD



## 1. præsentation af mit projekt

### 2. Om Svend Erik

- Profession/ stilling
- Broingenør og Geografisk fagspecialist (syddanmark)
- Har 500 forskellige broer i Syddanmark, hvoraf Lillebæltsbroen er den største

### Punkterne

Hvordan er punkterne i den manuel måling udvalgt? Dvs. hvad er formålet med hvert enkelt punkt(hvad repræsenterer de)?

- Se skema længere nede
- Udgangspunktet var af man ville vide om pillerne og landfæsterne:
- Satte sig i højden -> kote
- Flyttede sig plant -> XY- koor
- Drejde eller tiltede -> To punkter på hver pille og landfæste
- Efter der er sat inklinometre op, er det ikke i samme grad nødvendigt at måle to punkter på hver pille.

Er det væsentligt at det er disse konkrete punkter der måles fremadrettet?

- Ja det er valgt at anvende de samme punkter, der er fysisk defineret, for at mindske fejlbidragene.
- Hvis punkterne blev ændres, bliver det svære at genfinde historikken. Særligt hvis det sker flere gange gennem historien (der er pt. Målt siden 1933)

Hvorfor ligger fx 105 å tæt på 118? (samme med hhv. 305 og 405)

- Ved ikke hvorfor der er to punkter, der ligger så tæt på hinanden (ca. 1 meters afstand).
- BD kigger på 118, 218, 318 og 418 for broens østlige side.

Hvofor 3 punkter på hver af landfæsterne?

- To for tidligere at kunne beregne pillernes dregning/hældning.

Opsummering: det væsentlige er at der målets ét af de eksisterende punkter på hvert af pillerne samt hvert af landfæsterne.

### Kravsspecifikationen

Hvorfor krav til udstyr (fx nivellement) og ikke bare nøjagtighed på koten?

- Der er et ønske om at undgå "tilfældige" procedureændringer fra måling til måling.
- Hvis der hele tiden sker små, og måske uovervejede, ændringer i proceduren, bliver der sværre at holde styr på historikken.
- Men kravet vedr. nivellement kunne godt bortfalde, så længe nøjagtighedskravet på koten kan overholdes. Derudover bør der være et overlapsår, så man kan kontrollere at det nye setup fungerer ved at sammenligne med den manuelle måling.

| Punkter             | Hvor                     | Hvad måles | Hvorfor                                                                                                                                                                                               |
|---------------------|--------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 118                 | Pilletop, øst            | X, Y, H    | Kende pilletoppens flytning i højden, samt plane flytning.                                                                                                                                            |
| 102                 | Pilletop, Vest           | X, Y, H    | Kan sammen med 118 anvendes til at beregne pillens drejning.                                                                                                                                          |
| 105                 | Pilletop, ca. 1m fra 102 | X, Y, H    | Ved ikke.                                                                                                                                                                                             |
| Moniterings-punkter | landfæster               | X, Y, H    | Er inkluderet siden 2019 for at det er muligt at koble moniteringsmlingerne til den manuelle måling. Dvs at moniteringsmulingerne kan gøres absolutte. De er ikke væsentlige for den manuelle måling. |
| 111, 211, 311, 411  | Kantbjælke cykelsti      | H          | Punkterne er overgangspunkter til nivellementet. Er et udtryk for den måleteknik der har været anvendt. Men koten for punkterne anvendes ikke til noget ved BD.                                       |

Table C.1. Caption

- Har været ved at kigge på satellit monitoring. Lavthængende satellitter flyver over hvert 6 uge og kan give en præcision på 2 mm.

- Iforhold til målingen er det ikke væsentligt om broen har flyttede sig 1 mm, der er vi nærmere oppe i halve-til hele cm før det har en betydning. Årsagen til at nøjagtighedens kravet er sat til 2 mm, er akkumulationen af måleunøjagtigheder gennem årene.

Ser i et problem i hvis målingen fremadrettede bliver beregnet som en fast udjævning frem for transformation?

- Nej det er ikke et problem, bundet igen i et ønske om at undgå de undgå "tilfældige" procedureændringer fra måling til måling.

- Kunne måske endnu give et bedre resultat

- Vær opmærksom på at det kan blive sårbart hvis fixpunkterne går tabt.

### Fremadrettede

Eventuelle yderligere ønsker til viden hvis opmålingen blev automatiseret?

- nej

### P\*V

Hvad er tanken med P\*V?

- kender ikke til kravet om P\*V

note: Jeg fortæller om P\*V og vi kigger i banenormen.

- Hører under landmålingsafdelingen.

Hvorfor P\*V og ikke normaliserede residual?

-Lyder til noget der burde ændres hvis det kun er et kvalitetsmål der anvendes indenfor BD.

- Banenormen indholder en del gamle traditioner som er ikke er blevet ryddet op i.

### Andet

Respondent spørger om økonomi bliver inkluderet i overvejelserne.

- Mener at det er væsentligt at overveje, ikke kun om det er teknisk muligt, om også om det kan svare sig økonomisk.
- Kathrine: vil gerne have den vinkel med, men er svært når budgettet for de to målinger er fortrolige pga. konkurrencevilkår for udbudsopgaverne.
- Svend erik: forslår at jeg anvender indexering til at vise om det er økonomisk rentabelt. Med det der bliver anvendt pt. på de to målinger (kr), som index 100%. Må for BD gerne inkludere beregninger af økonomien i projektet, sålængde det er indexeret.
-



**Mail korespondance med  
Lecia vedr.  
centeringsspredning**

---

D

---

## Henvendelse omkring Leica totalstationer

8 meddelelser

---

**RASMUSSEN Knud Rolsov** <knud.rasmussen@leica-geosystems.com>  
Til: "kathrinersorensen@gmail.com" <kathrinersorensen@gmail.com>

20. marts 2024 kl. 19.21

Hej Kathrine

Du har vist interesse for Leica Totalstationer på vores hjemmeside.

Har du brug for yderligere information, så må du endelig kontakte mig.

God dag.

Med venlig hilsen / Kind regards

**Knud Rolsov Rasmussen**

Sales Representative

Leica Geosystems

[Vandtårnsvej 62A, 2860 Søborg, DK](#)

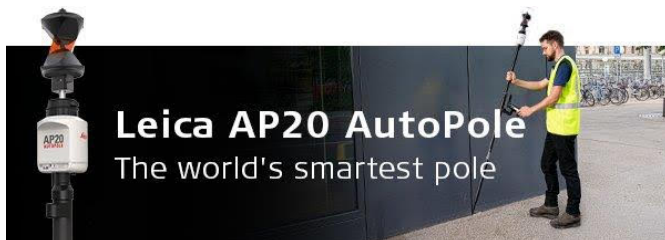
Phone: +45 7023 0032

Mobile: +45 2496 8786

E-Mail: [knud.rasmussen@leica-geosystems.com](mailto:knud.rasmussen@leica-geosystems.com)

Website: <http://www.leica-geosystems.com>

Leica Geosystems is part of [Hexagon](#)



---

**Kathrine Sørensen** <kathrinersorensen@gmail.com>  
Til: RASMUSSEN Knud Rolsov <knud.rasmussen@leica-geosystems.com>

3. april 2024 kl. 12.24

Hej Knud

Jeg er ved at skrive speciale på Landinspektøruddannelsen på Aalborg Universitet, hvor jeg arbejder med netværksdesign til monitoringsopgaver.

I den forbindelse tester jeg hvilken indflydelse forskellige parametre (fx geometri, instrument og antal satser) har på præcisionen og pålideligheden af netværkene. I testene tager jeg udgangspunkt i instrumentsspecifikationer fra TS16 og TS60, men jeg har lidt udfordringer med at udlede følgende vedrørende centreringsspredning:

- Hvor i instrumentspecifikationerne kan jeg se hvad centeringsspredningen på målingen til prisme er, når der anvendes ATR?
- Er dette fejlbidrag ensartede horisontalt og vertikalt?

Venlig hilsen  
Kathrine Rix Sørensen

[Citeret tekst er skjult]

---

**NOERNBERG Jesper** <jesper.noernberg@leica-geosystems.com>  
Til: "kathrinersorensen@gmail.com" <kathrinersorensen@gmail.com>  
Cc: RASMUSSEN Knud Rolskov <knud.rasmussen@leica-geosystems.com>

8. april 2024 kl. 12.16

Hej Kathrine

Beklager den lange responstid.

Jeg har samlet lidt forskellig materiale, som jeg håber kan hjælpe dig videre. Specielt ATRplus\_White\_Paper.pdf burde indeholder noget om det du søger.

Held og lykke med specialet.

Med venlig hilsen / Kind regards

**Jesper Rønbøg Nørnberg**  
Support  
Leica Geosystems A/S  
[Telehøjen 8](#), 5220 Odense SØ, Denmark

Phone: +45 70 23 00 32 (Support)  
E-Mail: [jesper.noernberg@leica-geosystems.com](mailto:jesper.noernberg@leica-geosystems.com)  
Website: <http://www.leica-geosystems.dk>  
Leica Geosystems is part of [Hexagon](#)

Follow us on:    



---

**From:** Kathrine Sørensen <[kathrinersorensen@gmail.com](mailto:kathrinersorensen@gmail.com)>  
**Sent:** 3. april 2024 12:24  
**To:** RASMUSSEN Knud Rolskov <[knud.rasmussen@leica-geosystems.com](mailto:knud.rasmussen@leica-geosystems.com)>  
**Subject:** Re: Henvendelse omkring Leica totalstationer

This email is not from Hexagon's Office 365 instance. Please be careful while clicking links, opening attachments, or replying to this email.

[Citeret tekst er skjult]

---

## 5 vedhæftede filer

 **ATRplus\_White\_Paper.pdf**  
3483K

 **Leica\_Nova\_TS60\_DS.pdf**  
483K

 **Leica\_Surveying\_Reflectors-\_WP.pdf**  
1384K

 **Leica\_Reflectors\_DS.pdf**  
991K

 **Leica\_Viva\_TS16\_DS.pdf**  
506K

---

**Kathrine Sørensen** <kathrinersorensen@gmail.com>  
Til: NOERNBERG Jesper <jesper.noernberg@leica-geosystems.com>

9. april 2024 kl. 11.43

Hej Jesper

Tusind tak for dit svar. Jeg har på forhånd gennemgået det vedlagte materiale, men jeg finder stadig ikke helt klart beskrevet, hvad centeringsspredningen på målingen til prismet er med ATR. Men er der rigtigt forstået at nøjagtigheden på 0.15 mgon for TS60 er med ATR? (Tabel 2 i "ATRplus - White paper"). Og dertil kommer en centeringsspredning som er afhængigt af prismet, hvilket for fx GPH1 er 1 mm både horisontalt og vertikalt?

Venlig hilsen  
Kathrine Rix Sørensen

[Citeret tekst er skjult]

---

**NOERNBERG Jesper** <jesper.noernberg@leica-geosystems.com>  
Til: Kathrine Sørensen <kathrinersorensen@gmail.com>

12. april 2024 kl. 10.22

Hej Katrine

Jeg vil mene the er præcis som du beskriver, men jeg har spurgt vores eksperter i Schweiz om din antagelse er korrekt.

Jeg vender tilbage når jeg får svar.

Mvh. Jesper

[Citeret tekst er skjult]

---

**NOERNBERG Jesper** <jesper.noernberg@leica-geosystems.com>  
Til: Kathrine Sørensen <kathrinersorensen@gmail.com>

15. april 2024 kl. 13.28

Hej Kathrine

Hermed svaret fra Schweiz.

*"The accuracy of the ATRPlus stated in datasheet is defined as how accurately this feature can determine the centre of the prism and this has no correlation with the prism type used. When considering the accuracy of the ATRPlus it is important to know that procedures for determining it are the same as for the angular accuracy of the TPS, that means that we have 0.15 mgon in Hz and 0.15 mgon in V direction.*

*When you talk about the centering accuracy of the prism, this data tells you how similar the prisms of the same prism type are. For example, if you measure a point with one GHP1 prism and then measure the same point with another GHP1 prism, you can expect that that measured points will be inside this 1mm."*

Mvh. Jesper

[Citeret tekst er skjult]

---

**Kathrine Sørensen** <kathrinersorensen@gmail.com>  
Til: NOERNBERG Jesper <jesper.noernberg@leica-geosystems.com>

15. april 2024 kl. 13.46

Hej Jesper

Mange tak for svar, det var lige den information jeg manglede. Må jeg vedlægge denne mailkorrespondance som bilag i mit speciale til dokumentation af valg af appriorispredninger?

[Citeret tekst er skjult]

---

**NOERNBERG Jesper** <jesper.noernberg@leica-geosystems.com>  
Til: Kathrine Sørensen <kathrinersorensen@gmail.com>

15. april 2024 kl. 13.53

Hej Kathrine

Selvfølgelig og endnu engang held og lykke med specialet.

[Citeret tekst er skjult]



# Fixpunktsspredning



For at få en indikation på den forventede fixpunktsspredning, hvilket indgår i standartopsætningen, laves en simpel test af et netværk med to opstillinger, på hhv. pille 1 og pille 4. - 4 overbestemte detailpunkter i hver af testene, placeringen af disse overbestemte detailpunkter (symboliserer de kommende fixpunkter) varierer i testene

Beregningen af testnet inkluderer at angive fixpunktsspredningen, dvs. hvor godt fixpunkterne forventes at være bestemt. Fixpunktsspredningen afhænger af det netværk fixpunktet er indmålt med, dvs. alle parameterne nævnt i kapitel 4 'Netværksdesign'.

Følgende indstillinger er anvendt til estimering af den plane fixpunktsspredning:

| Parameter                                 | Værdi ved estimering af fixpunktsspredning                                            |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Fixpunkter                                | De 4 fixpunkter der anvendes til manuel måling                                        |
| Opstilling                                | 2, på hhv. pille 1 og pille 4.                                                        |
| Fixpunktsspredning                        | 2.7 mm på x og y, 2 mm på koten                                                       |
| Præcision af instrument                   | TS30 (Hz og V:0.15 mgon, Afs. 0.6 mm +1 ppm).                                         |
| Antal satser                              | 2, jf. kravsspecifikationen.                                                          |
| Centeringsspredning, instrument           | Ikke relevant i frie opstillinger.                                                    |
| Centeringsspredningen, prisme             | 1 mm (der anvendes ATR).                                                              |
| Spredning på $ppm_a$ (afstandskorrektion) | Sættes ikke i GeoAdjust.                                                              |
| Spredning på refraktionskoefficienten     | 0.13.                                                                                 |
| Spredning på instrumenthøjde              | Ikke relevant i frie opstillinger.                                                    |
| Spredning på sigteskivehøjden             | 0.01 mm. Er ikke relevant da sigteskivehøjden er 0, er sat lavest muligt i GeoAdjust. |

**Table E.1.** Værdier til estimering af fixpunktsspredning

Fixpunktsspredning på fixpunkter der anvendes til den manuelle måling (51, 52,53 og 57). Punkterne har haft korrektioner i sammen størrelsesorden i årevis, hvilket indikere at punkterne ikke flytter sig på nuværende tidspunkt. Korrektionerne på op til 0.57 mm kan både skyldes fixpunkterne ikke er bedre bestemt fra begyndelsen (nogle er målt ind i 1985).

Korrektionerne på fixpunkterne ved transformationen af den manuelle måling 2023 fremgår af tabelE.2. Den gennemsnitlige korrektion var i 2023, hvilket i testnettet anvendes som et estimatet for fixpunkternes spredning.

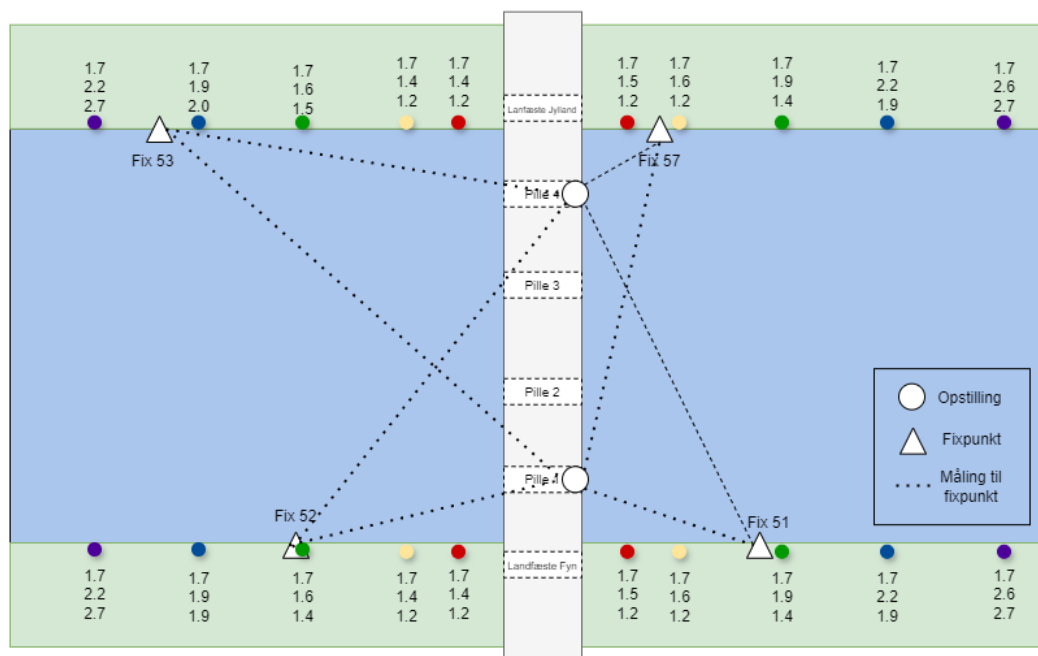
Den gennemsnitlige korrektion på fixpunkter beregnes til 2.7 mm, hvilket anvendes som fixpunktsspredning til fixpunkterne fra den manuelle måling

Resultatet fremgår af figur E.1, der viser spredningen på x, y og H. Figuren sammenfatter præcisionen af bestemmelsen af fixpunkter baseret på test af 5 netværk til indmåling af nye

|      | 51      |          | 52      |         | 53     |        | 57      |         |
|------|---------|----------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|
|      | x       | y        | x       | y       | x      | y      | x       | y       |
| 2023 | -0.0057 | - 0.0026 | -0.0022 | -0.0022 | 0.0050 | 0.0046 | -0.0016 | -0.0002 |

**Table E.2.** Korrektioner på fixpunkterne fra Manuel måling 2023 [LIFA, 2023a]

fixpunkter. Fælles for de 5 netværk er at der er anvendt 2 opstillinger, på hhv, pille 1 og 4, hvilket på figuren er vist med trekant som symbol. Opstillingerne er der målt til de 4 fixpunkter fra manuelmåling, hvilket på figuren er vist med stiblet linjer. Andre parametre fremgår af tabel E.1. Ved de 5 netværk er placeringen af detailpunkterne (der er fixpunkterne til det nye netværk) varieret. Detailpunkterne er på figuren illustreret med farvede prikker, hvor farven viser de 4 detailpunkter der er målt i samme netværk. Alle detailpunkterne er målt fra begge opstillinger, disse sigter er for overskyelighedens skyld undladt på figuren. Af figuren, kan det udledes fixpunkter nær broen kan bestemmes med lavere spredning end punkter længere væk, særligt spredningen på koten stiger med når punkterne er længere væk fra broen.



**Figure E.1.** Beregning af fixpunktsspredningen på eventuelle fixpunkter.

# Koordinater til testnet

---



I netnettene indgår foreløbige koordinater til fixpunkter, detailpunkter og opstillinger. Dette appendix forklare hvor disse koordinater kommer fra.

## F.0.1 Detailpunkter

Koordinaterne fra den manuelle måling 2023 anvendes som foreløbige koordinater [Banedanmark, 2023].

Der er ingen kote på 251, så koten fra 218 (der ligger på samme pilletop) anvendes i testnet.

## F.0.2 Fixpunkter

Der skal beregnes foreløbige koordinater til fixpunkter der er placeret 10, 100, 200, 400 og 600 m fra broen.

Midten af broen er beregnet ved hvert af det to landfæster. Dette er gjort ved at beregne midten mellem PT00-2 og PT00-3, hvilket er midten af broen ved landfæste Fyn, mens midt mellem PT64-2 og PT64-3 defineres som midten af broen ved landfæste Jylland. De foreløbige koordinater til fixpunkterne beregnes derefter ved  $\pm$  hhv. 10, 100, 200, 400 og 600 m til Y-koordinaten.

Beregningen er fortaget i Matlab, se zipfilen: \Testnet \BroensCentrum.m

## F.0.3 Opstillinger

Koordinaterne til opstillingspunkterne er lavet ved at tage koordinater op på kort i GeoAdjust.



# Analyse af værdier i testnet

---



I dette appendix er observationer til hver af de udførte testnet samlede. Observationerne er noteret i forbindelse med beregning af hvert enkelt af testnettene. Dette danner grundlaget for analyserne i kapitel 6. D

## G.1 Standatopsætning

|              | Vurderingsparametre                                                                             | Standart<br>200 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Præcision    | Gens.<br>punkt middelfejl<br>[mm]<br>Punktmiddelfejl ><br>2 mm [.]                              | Generelt: 1.56-1.79. Detailpunkterne har spredning på 1.1 i både E og N-retning, hvilket indikerer at detailpunkterne er lige godt bestemt i begge retninger. 606 og 506 som undtagelse men en spredning på E på 1.3, hvilket giver punktspredning på 1.7.                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|              | Gens.<br>kotemiddelfejl<br>[mm]<br>Kotemiddelfejl ><br>2 mm [.]                                 | Alle mellem 0.9-1.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit<br>[.]<br>$\rho_{hor}$ gennemsnit<br>[.]<br>$\rho_{ver}$ gennemsnit [.] |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$ [.]<br>$\rho_{hor} < 0.5$ [.]<br>$\rho_{ver} < 0.5$ [.]                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|              | IP gens. afs [mm]<br>IP gens. hor [mm]<br>IP gens. ver [mm]                                     | Alle afstandsobservationer til datailpunkter er på 4 mm<br>Alle ligger fra 3.4 - 4.04.<br>Alle ligger på 3.46-4.21.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|              | IP afs. max [mm]<br>IP hor.. max<br>[mm]<br>IP ver. max [mm]                                    | Alle er 4<br>Alle ligger fra 3.4 - 4.04. Højest på 218, 606, 305 og 318 og 506<br>Højest på 218, 606, 305 og 318 og 506.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|              | EP E max [mm]<br><br>EP N max [mm]<br>EP H max [mm]                                             | Generelt -2.1- -3.1. -2.1: 218,318, 305. -2.6: 402, 418, 102, 118. -3.1: 506 og 606. Dvs. lavest på punkter der ligger nær centrum, af det af fixpunkterne, udspændte polygon. Årsag: "observationen" til fixpunktskoordinater er årsag til alle EP E max, hvilket betyder at den største fejl der kan gemmen sig på detailpunkterne er hvis koordinaterne til fixpunktet er ukorrekte.<br>Alle detailpunkter har 1.7. Årsag: Fra "obs" til fixpunktskoordinater.<br>Alle detailpunkter har 2.0. Årsag: Fra "obs" til fixpunktskoordinater. |
|              | EP E 95% fraktil<br>[mm]<br>EP N 95% fraktil<br>[mm]<br><br>EP H 95% fraktil<br>[mm]            | Generelt: -3-0.6: Højeste: Afstandsmåling til 118 (også ved 418). Generelt er årsagen hz-måling til fixpunkter<br>0.2-0.5. Alle punkter, på nær 118 og 418 har 0.2. Generelt er det enten hz-målinger til punktet eller afstandsmålinger til fixpunkter der forplanter sig til detailpunkterne. Ved 118 og 418 er årsagen hz-målingerne, der er meget korte sigter til disse to punkter (2.5-3.5 m).<br>Alle detail har -0.5. Årsag: vertikal-måling til fixpunkter.                                                                        |

**Table G.1.** Standart

## G.2 A - Placering af fixpunkter

|              | Vurderingsparametre                                                           | Standart<br>200 m                                               | A1<br>10 m                                                                  | A2<br>100 m                                                                 | A3<br>400 m                                            | A4<br>600 m                                            | A5                                  |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Præcision    | Gens.<br>punktmiddelfejl<br>[mm]                                              |                                                                 | Generelt:<br>1.49-1.72.<br>SigmaN:<br>0.9-1.0,<br>SigmaE:<br>1.1-1.4        |                                                                             |                                                        | Generelt:<br>SigmaN:<br>1.3,<br>Sigma E:<br>1.1-1.3    |                                     |
|              | Punktmiddelfejl ><br>2 mm                                                     | 606 og 506 er oppe<br>på 1.7 pga en<br>spredning på E på<br>1.3 | 606 og<br>506 er<br>oppe på<br>1.7 pga<br>en<br>spredning<br>på E på<br>1.4 | 606 og<br>506 er<br>oppe på<br>1.7 pga<br>en<br>spredning<br>på E på<br>1.4 | 606 og<br>506 er<br>oppe på<br>1.77                    | 606 og<br>506 er<br>oppe på<br>1.84                    | 606 og<br>506 er<br>oppe på<br>1.77 |
|              | Gens.<br>kotemiddelfejl<br>Kotemiddelfejl > 2<br>mm                           | Alle mellem 0.8-1.0                                             | Alle<br>mellem<br>0.9-1.0                                                   | Alle på<br>0.9                                                              | Alle<br>ligger på<br>1.3-1.4                           | Alle<br>ligger på<br>2.1                               | Alle<br>ligger på<br>1-1.1          |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit<br>$\rho_{hor}$ gennemsnit<br>$\rho_{ver}$ gennemsnit |                                                                 |                                                                             |                                                                             |                                                        |                                                        |                                     |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$<br>$\rho_{hor} < 0.5$<br>$\rho_{ver} < 0.5$                |                                                                 |                                                                             |                                                                             |                                                        |                                                        |                                     |
|              | IP gens. afs<br>IP gens. hor                                                  | Relativt ensartede<br>3.4-4 mm                                  | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                                           | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                                           | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                      | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                      |                                     |
|              | IP gens. ver                                                                  | Relativt ensartede<br>3.4-4 mm                                  | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                                           | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                                           | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                      | Relativt<br>ensartede<br>3.4-4 mm                      |                                     |
|              | IP afs. max [mm]<br>IP hor. max [mm]<br><br>IP ver. max [mm]                  | Alle er 4<br>P4 ->305 og 318<br><br>P4 ->305 og 318             | Alle har 4<br>P4 ->305<br>og 318<br>P4 ->305<br>og 318                      | Alle har 4<br>P4 ->305<br>og 318<br>P4 ->305<br>og 318                      | Alle har 4<br>P4 ->305<br>og 318<br>P4 ->305<br>og 318 | Alle har 4<br>P4 ->305<br>og 318<br>P4 ->305<br>og 318 |                                     |

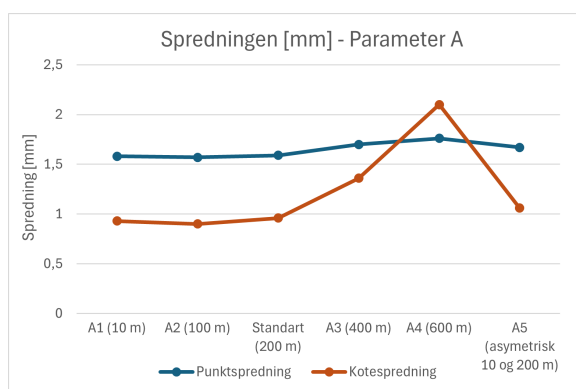
|  |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                       |                                                                                                                                  |                                                         |                                                         |                                                                                          |
|--|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | EP E max [mm] | Generelt -2.1- -3.1. -2.1: 218,318, 305. -2.6: 402, 418, 102, 118. -3.1: 506 og 606. Dvs. lavest på punkter der ligger nær centrum, af det af fixpunkterne, udspændte polygon. Årsag: "observationen" til fixpunktskoordinater er årsag til alle EP E max, hvilket betyder at den største fejl der kan gemmen sig på detailpunkterne er hvis koordinaterne til fixpunkttern er ukorrekte. | 506 og 606, Samme årsag som "Standard"                                                                                                | 506 og 606, Samme årsag som "Standard"                                                                                           | 506 og 606, Samme årsag som "Standard"                  | 506 og 606, Samme årsag som "Standard"                  | 402, 418, 102,118 . Samme årsag som "Standard". På A1.2 og 1.3 dvs fixpunkter nær broen. |
|  | EP N max [mm] | Alle detailpunkter har 1.7. Fra "obs" der er fixpunktskoordinater.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Alle detailpunkter har -1.3. Samma årsag som "Standard"                                                                               | Alle detailpunkter har -1.3. Samma årsag som "Standard"                                                                          | Alle detailpunkter har -1.9. Samma årsag som "Standard" | Alle detailpunkter har -2.3. Samma årsag som "Standard" | Alle detailpunkter har -1.9. Samma årsag som "Standard"                                  |
|  | EP H max [mm] | Alle detailpunkter har 2.0. Årsag: Fra "obs" til fixpunktskoordinater.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Alle detailpunkter har 1.8. pga f Alle detailpunkter har 1.8. pga f Alle detailpunkter har 2.9 pga fAlle detailpunkter har 4.1. pga ‘ | Pga obs fixpunkterkoordinater. -2.2: 218. 102, 118 og 606. -2.6: 318, 402, 418, 305, 506. Dvs koten er mindre usikker på pille 1 |                                                         |                                                         |                                                                                          |

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                      |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EP E 95% fraktil<br>[mm] | Generelt: -3-0.6:<br>Højeste: Afstandsmåling<br>til 118 (også ved<br>418). Generelt er<br>årsagen hz-måling<br>til fixpunkter                                                                                                                                                                                                   |                                                                                      | Afstandsmåling<br>til 118                                                          | 506 og<br>606., Ob-<br>servation<br>til<br>fixpunkt<br>(hhc 4.3<br>og 4.2)         | 506 og<br>606. Ob-<br>servation<br>til<br>fixpunkt<br>(hhc 4.1<br>og 4.4)          | Generelt<br>-0.4-0.1.<br>402:<br>hz-måling<br>fra P4 til<br>fix A1.2,<br>418:<br>N-koor til<br>fix A1.2,<br>118:<br>N-koor til<br>fix A1.2.<br>506:<br>hz-måling<br>fra P4 til<br>fix A1.2 |
| EP N 95% fraktil<br>[mm] | 0.2-0.5. Alle<br>punkter, på nær 118<br>og 418 har 0.2.<br>Generelt er det<br>enten hz-målinger<br>til punktet eller<br>afstandsmålinger til<br>fixpunkter der<br>forplanter sig til<br>detailpunkterne.<br>Ved 118 og 418 er<br>årsagen<br>hz-målingerne, der<br>er meget korte<br>sigter til disse to<br>punkter (2.5-3.5 m). | Hz-målig<br>til 118.<br>Også høj<br>for 418                                          | Hz-målig<br>til 118.<br>Også høj<br>for 418                                        | Observation<br>til<br>fixpunkt<br>(hhc 4.1<br>og 4.4)                              | Hz-målig<br>til 118.                                                               | Hz-målig<br>til 118.<br>også høj<br>for<br>hz-måling<br>til 418                                                                                                                            |
| EP H 95% fraktil<br>[mm] | Alle detail har -0.5.<br>Årsag:<br>vertikal-måling til<br>fixpunkter..                                                                                                                                                                                                                                                          | Alle<br>detail har<br>-0.5.<br>Årsag:<br>vertikal-<br>måling til<br>fixpunk-<br>ter. | Alle de-<br>tailpunk-<br>ter har<br>-0.4.<br>Samme<br>årsag som<br>"Stan-<br>dart" | Alle de-<br>tailpunk-<br>ter har<br>-0.9.<br>Samme<br>årsag som<br>"Stan-<br>dart" | Alle de-<br>tailpunk-<br>ter har<br>-1.5.<br>Samme<br>årsag som<br>"Stan-<br>dart" | -0.5: 506,<br>305, 418,<br>402, 318.<br>Alle på<br>vertikal<br>vinkel fra<br>P4 til fix<br>A1.2                                                                                            |

**Table G.2.** Parameter A: Fixpunkter - placering

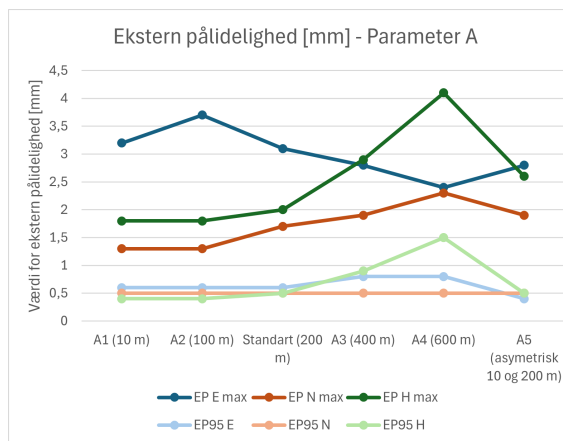
- Den laveste punktspredning opnåes med fixpunktern placeret 100 m fra broen. Forskellen mellem Standart, A1 og A2 er kun 0.02 mm, hvilket vurderes til at være en ubetydelig forskel. Alle de 5 testnet overholder kravet vedrørende punktsspredning, A4 er dog i den orange kategori.
- Spredningen på koten er lavest når fix er tættest på broen. A4 kan ikke overhold kravspec.
- Placeringen af fixpunkterne påvirker ikke netværket interne pålidelighed, hvilket kan ses ved af de 5 test og Standart alle har samme værdier for interne pålidelighed.

- Den eksterne pålidelighed påvirkes tilgængæld af fixpunkternes placering. Generelt stiger EP des længere væk fixpunkterne placeres, særligt EP for koten øges fra 400 m og op efter.
- Ved A1, A2 er spredningen på E højere end spredningen på N. Ved A4 er spredningen på N højere end spredningen på E. Det er primært spredningen på N der stiger når fixpunkterne placeret længere fra broen - hvorfor??
- EP max: skyldes i alle testnette fixpunktskoordinaterne (ligesom ved standart).
- EP95: Fra 10-200 m fra broen (A1, A2 og standart) er EP95 på Hz målingerne, derefter (A4 og A5) er det fixpunktskoordinaterne der giver den største indflydelse på 506.
- A5: OBS på målingen fra P4 til fixpunkt A1.2

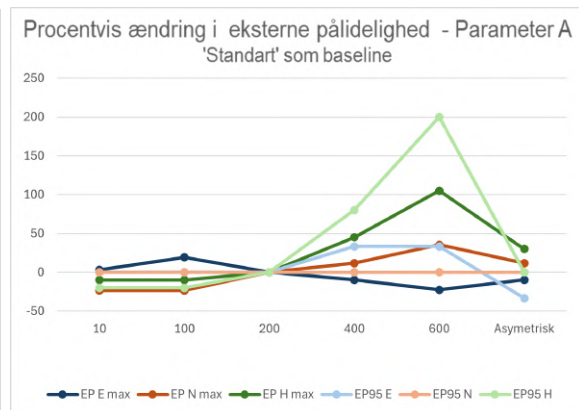


**Figure G.1.** Spredning for testnet vedr. parameter A - placering af fixpunkter

**Figure G.2.** Procentvis ændring i spredninger for testnet vedr. parameter A - placering af fixpunkter



**Figure G.3.** Ekstern pålidelighed for testnet vedr. parameter A - placering af fixpunkter



**Figure G.4.** Procentvis ændring i ekstern pålidelighed for testnet vedr. parameter A - placering af fixpunkter

|              | Vurderingsparametre         | A1 [%]<br>10 m | A2[%]<br>100 m | A3[%]<br>200 m | A4[%]<br>400 m | A5 [%]<br>Asymme-<br>trisk 200 m<br>og 10 m |
|--------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|
| Præcision    | Gens. punktmiddelfejl [mm]  | -1             | -1             | 7              | 11             | 5                                           |
|              | Gens. kotemiddelfejl [mm]   | -3             | -6             | 42             | 119            | 10                                          |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit [.] | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit [.] | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit [.] | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | IP gens. afs [mm]           | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | IP gens. hor [mm]           | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | IP gens. ver [mm]           | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | IP afs. max [mm]            | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | IP hor.. max [mm]           | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | IP ver. max [mm]            | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | EP E max [mm]               | 3              | 19             | -10            | -23            | -10                                         |
|              | EP N max [mm]               | -24            | -24            | 12             | 35             | 12                                          |
|              | EP H max [mm]               | -10            | -10            | 45             | 105            | 30                                          |
|              | EP E 95% fraktil [mm]       | 0              | 0              | 33             | 33             | -33                                         |
|              | EP N 95% fraktil [mm]       | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                                           |
|              | EP H 95% fraktil [mm]       | -20            | -20            | 80             | 200            | 0                                           |

**Table G.3.** Procentvisændring af vurderingsparametre pr. ekstra fixpunkt ('Standart' som baseline). Beregningen findes i Zipfilen (\Testnet \Procentberegninger).

### G.3 B - Antal af fixpunkter

|           | Vurderingsparametre                           | Standart<br>4                                          | B1<br>2                                                                                                  | B2<br>4 | B3<br>6                              | B4<br>10                              |
|-----------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Præcision | Gens. punktmiddelfejl [mm]                    |                                                        | Puktsspredning på 2.2-2.4 på alle detalpunkter. Ensartede N (1.4-1.5), E (1.4-1.7) højest på landfæster. |         | Alle ensartede, E:1.0-1.1, N:0.9-1.0 | Alle ensartede, E: 0.7-0.8, N:0.5-0.6 |
|           | Punktmiddelfejl > 2 mm                        | 606 og 506 er oppe på 1.7 pga en spredning på E på 1.3 |                                                                                                          |         |                                      |                                       |
|           | Gens. kotemiddelfejl<br>Kotemiddelfejl > 2 mm |                                                        | ensartede 1.8-1.9                                                                                        |         | alle 1.0                             | 0.5-0.6                               |

|              |                                                                               |                                |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit<br>$\rho_{hor}$ gennemsnit<br>$\rho_{ver}$ gennemsnit | Alle mellem 0.8-1.0            |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$<br>$\rho_{hor} < 0.5$<br>$\rho_{ver} < 0.5$                |                                |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              | IP gens. afs<br>IP gens. hor<br>IP gens. ver                                  |                                |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              | IP afs. max [mm]                                                              | Relativt ensartede<br>3.4-4 mm |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              | IP hor.. max [mm]                                                             | Relativt ensartede<br>3.4-4 mm |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              | IP ver. max [mm]                                                              | Alle er 4                      |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              | EP E max [mm]                                                                 |                                | Højest for<br>506 og<br>606.<br>Lavest på<br>2.18 og<br>318 (-6.7) |  | Alle ligger<br>på -1.3-<br>-1.8. Højest<br>på 505 og<br>606 (Årsag:<br>"obs"<br>fixpunktko-<br>ordinater).<br>Lavest på<br>218 og 318<br>(årsag: :<br>"obs"<br>fixpunktko-<br>ordinater) | $\pm 1.0$ . Ved<br>detailpunk-<br>ter der har<br>negative<br>værdier, er<br>årsagen<br>"obs" til<br>fixpunkt-<br>skoordina-<br>t (pånæv<br>218, hvor<br>det er ver-<br>tikalkvinklen<br>til<br>punktet).<br>Åsager ved<br>Positive<br>værdier:<br>hz-måling<br>til punkt-<br>et. 1.0- -1.0.<br>Lavest på<br>118 (0.8 på<br>afs til 118)).<br>Generelt er<br>årsagen<br>afs-måling<br>til<br>punkterne |
|              | EP N max [mm]                                                                 | P4 ->305 og 318                | -5.7-5.9<br>for alle                                               |  | Alle er -1.1.<br>Årsag:<br>"obs"<br>fixpunktko-<br>ordinater                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              |                                                                               |                                |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|              |                                                                               |                                |                                                                    |  |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|  |                          |                 |                                                                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                          |
|--|--------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | EP H max [mm]            |                 | -8.2- -8.3<br>på alle                                                                                                                                                                                |  | Alle<br>punkter har<br>-1.9, årsag:<br>"obs"<br>fixpunkt-<br>koordinater                                                                                         | -0.9-1.<br>Punkter<br>med -0.9 er<br>årsagen<br>"obs" til<br>fixpunkt-<br>skordinat.<br>Ved resten<br>er årsagen<br>vertikalvin-<br>klen til<br>punktet. |
|  | EP E 95% fraktil<br>[mm] | P4 ->305 og 318 | Alle de-<br>tailpunk-<br>ter har $\pm$<br>0.6- 0.8.<br>Højest på<br>218,<br>318,305.<br>Posi-<br>tiveværdier<br>ved alle<br>målt fra<br>P1. nega-<br>tiveværdier<br>for<br>punkter<br>målt fra<br>P4 |  | Højest på<br>418, årsag:<br>afstands<br>måling til<br>418. Resten<br>har $\pm$<br>0.2-0.3.<br>Generelt er<br>årsagen afs-<br>tandsmålinger<br>til<br>fixpunkter. | $\pm 0.1$                                                                                                                                                |

|                          |                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                       |                                                                   |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| EP N 95% fraktil<br>[mm] |                                                                                                                                                                                  | Alle detailpunkter har enten -0.6 eller 0.6. Alle detailpunkter målt fra opstillingen på P4 er positive - (hz-måling til Fix 3.1 er årsag i alle tilfælde). Alle detailpunkter målt fra opstilling på P1 har negativ værdi - (hz-måling til Fix 3.3 er årsag i alle tilfælde). | Samme årsag om mønster som B1.                                        | $\pm 0.3$ for 118 og 418, årsag: "obs" til fixpunkts koordinater. |
| EP H 95% fraktil<br>[mm] | 506 og 606. Fra "obs" der er fixpunktskoordinater, hvilket betyder at den største fejl der kan gemmen sig på detailpunkterne er hvis koordinaterne til fixpunktern er ukorrekte. | Ligger fra -1.0-1.1. Årsag: vertikalvinkel til det nærmeste fixpunkt. Kun 218 har positiv værdi (1.0) - vertikalvinkel til 218 som årsage (er et stejlt sigte).                                                                                                                | Alle ligger på -0.5. Årsag: vertikalvinkel til det nærmeste fixpunkt. | Alle ligger på -0.2                                               |

**Table G.4.** Parameter B: Antal fixpunkter

- Præcision: B1 overholder ikke kravsspecifikationen vedr. punksspredning, og er ved spredning på koten i den orange kategori.
- Antallet af fixpunkter påvirker ikke redundansen eller IP
- EP max: falder ved flere fixpunkter.
- EP max skyldes ved B1-B3 fixpunktskoordinater (lige som ved standart). Ved B4 er EPmax værdierne ikke længere udelukke på fixpunktskoordinater: EP emax er hz-observationen til detailpunkterne, EP n max er afstandsmåling til detail og EP Hmax er enten fixpunktskoordinat er vertikal vinklen
- EP 95: falder med antallet af fixpunkter.
- EP 95: Årsagerne er observationer til fixpunkterne.

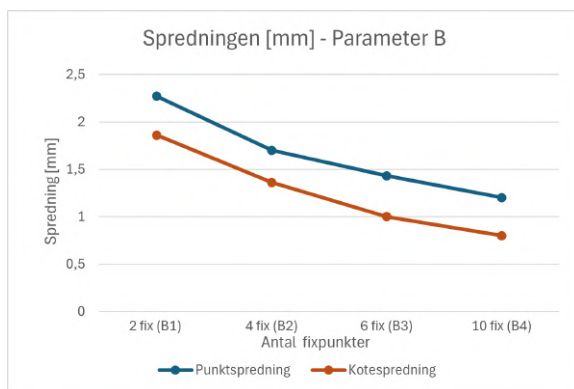
Epstern pålidelighed: max er på fixpunkterne, men 95% fraktil er på detailpunkter, hvilket betyder at den største fejl der kan skjule sig er på fixpunkterne, men at den største grove fejl der sandsynligt kan gemme sig, er på detailpunkterne

B2: Præcision: ensartede N (1.4-1.5), E (1.4-1.7) højest på landfæster

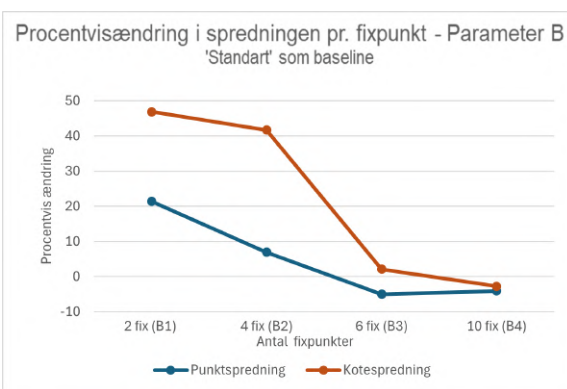
**B3:** Præcision: ensartede på alle detailpunkter

EP Max: - fixopunkter ved broens center: -1.8, -1.1, -2.4 - Fix 400 fra broen: -1.8, -1.8, -3.5- -3.7 => der kan gemme sig større grove fejl på fixpunkter længere væk

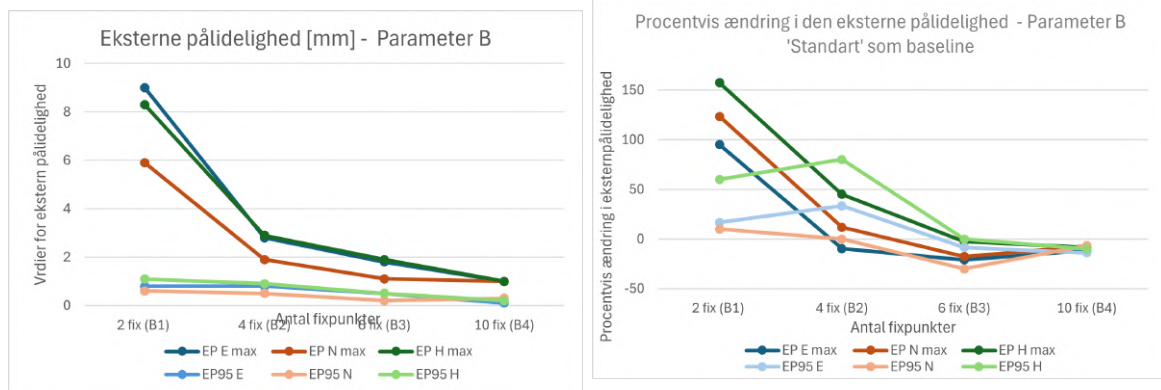
EP 95% fraktil: - på koten er EP95 højere på center fix end på fix 400 m fra broen, på E og n er det modsat.



**Figure G.5.** Spredning for testnet vedr. parameter B - antal fixpunkter



**Figure G.6.** Procentvis ændring i spredninger for testnet vedr. parameter B - antal fixpunkter



**Figure G.7.** Ekstern pålidelighed for testnet vedr. parameter B - antal fixpunkter

**Figure G.8.** Procentvis ændring i ekstern pålidelighed for testnet vedr. parameter B - antal fixpunkter

| Vurderingsparametre |                             | B2<br>4 | B3<br>6 | B4<br>10 |
|---------------------|-----------------------------|---------|---------|----------|
| Præcision           | Gens. punktmiddelfejl [mm]  | -13     | -9      | -6       |
|                     | Gens. kotemiddelfejl [mm]   | -13     | -12     | -7       |
| Pålidelighed        | $\rho_{afs}$ gennemsnit [.] | 0       | 0       | 0        |
|                     | $\rho_{hor}$ gennemsnit [.] | 0       | 0       | 0        |
|                     | $\rho_{ver}$ gennemsnit [.] | 0       | 0       | 0        |
|                     | IP gens. afs [mm]           | 0       | 0       | 0        |
|                     | IP gens. hor [mm]           | 0       | 0       | 0        |
|                     | IP gens. ver [mm]           | 0       | 0       | 0        |
|                     | IP afs. max [mm]            | 0       | 0       | 0        |
|                     | IP hor.. max [mm]           | 0       | 0       | 0        |
|                     | IP ver. max [mm]            | 0       | 0       | 0        |
|                     | EP E max [mm]               | -34     | -20     | -11      |
|                     | EP N max [mm]               | -34     | -20     | -10      |
|                     | EP H max [mm]               | -33     | -19     | -11      |
|                     | EP E 95% fraktil [mm]       | 0       | -9      | -11      |
|                     | EP N 95% fraktil [mm]       | -8      | -17     | -6       |
|                     | EP H 95% fraktil [mm]       | -9      | -14     | -10      |

**Table G.5.** Procentvisændring af vurderingsparametre pr. ekstra fixpunkt (B1 som baseline). Beregningen findes i Zipfilen (\Testnet \Procentberegninger).

## G.4 C

| Vurderingsparametre |                            | Standart | C1                                                                                                                                           | C2 | C3 |
|---------------------|----------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| Præcision           | Gens. punktmiddelfejl [mm] | 1.59     | Generelt: 1.35-1.72<br>højste værdi er 1.72<br>(506 og 606).<br>laveste værdier på<br>fx 218 og 318 som<br>er målt fra flere<br>opstillinger |    |    |
|                     | Punktmiddelfejl > 2 mm [.] | 0        |                                                                                                                                              |    |    |
|                     | Gens. kotemiddelfejl [mm]  | 0.96     | Generelt: 0.7-0.9                                                                                                                            |    |    |

|             |                             |      |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|-------------|-----------------------------|------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Påidelighed | Kotemiddelfejl > 2 mm [.]   | 0    |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | $\rho_{afs}$ gennemsnit [.] | 0.75 |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | $\rho_{hor}$ gennemsnit [.] | 0.75 |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | $\rho_{ver}$ gennemsnit [.] | 0.75 |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | $\rho_{afs} < 0.5$ [.]      | 0    |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | $\rho_{hor} < 0.5$ [.]      | 0    |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | $\rho_{ver} < 0.5$ [.]      | 0    |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|             | IP gens. afs [mm]           | 4    | 3.8-4.0 Er 3.8 mm for punkter der bliver målt fra to opstillinger   | 3.8-Er 3.8 mm for punkter der bliver målt fra to opstillinger                     | 3.7-4.0                                                                       |
|             | IP gens. hor [mm]           | 3.72 | 3.29-3.96                                                           | 3.28-4.18. Højest på 218 fra P3, hvilket også er det længste sigt til detailpunkt | 3.22-3.96                                                                     |
|             | IP gens. ver [mm]           | 3.77 | 3.31-4.64                                                           | 3.26-4.53. Højest på 218 fra P3, hvilket også er det længste sigt til detailpunkt | 3.21-4.53                                                                     |
|             | IP afs. max [mm]            | 4    | Afstande til detailpunkter de kun er målet fra en opstilling        | Samme som C1.                                                                     | Samme som C1.                                                                 |
|             | IP hor.. max [mm]           | 4.04 | 105 fra P2, 305 og 318 fra P2                                       |                                                                                   | 105 fra P2, 305 og 318 fra P2                                                 |
|             | IP ver. max [mm]            | 4.21 | 305 og 318                                                          |                                                                                   | 218 fra P3                                                                    |
|             | EP E max [mm]               |      | -2.2-3.3. -3.3: 506 og 606. Samme årsag som standart.               | -2.2-3.3. -3.3: 506 og 606. Samme årsag som standart.                             | -2.2-3.2. -3.2: 506 og 606. Samme årsag som standart.                         |
|             | EP N max [mm]               |      | -1.5 på alle detail. Samme årsag som standart.                      | -1.5 på alle detail. Samme årsag som standart.                                    | -1.4 på alle detail. Samme årsag som standart.                                |
|             | EP H max [mm]               |      | -1.1- -1.3. Højt på 418, 402, 506 og 606. Samme årsag som standart. | -1.1- -1.4. Samme mønster som C1.                                                 | -1.1- -1.2. Samme mønster som C1.                                             |
|             | EP E 95% fraktil [mm]       |      | -0.3-0.3                                                            | -0.3-0.3                                                                          | -0.2-0.2.                                                                     |
|             | EP N 95% fraktil [mm]       |      | -0.2-0.2.                                                           | -0.2-0.2.                                                                         | -0.2-0.2. 506 og 606 har hhv. -0.2 og 0.2. Rest5en af detailpunkterne har 0.1 |

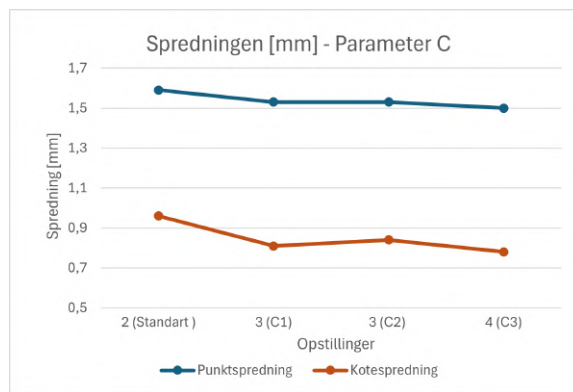
|  |                       |  |          |                                                                                                     |           |
|--|-----------------------|--|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|  | EP H 95% fraktil [mm] |  | -0.3-0.2 | -0.3-0.3.<br>Vertikalvinklen<br>fra P3 til 218<br>forplantes til<br>102, 118, 318,<br>402, 506, 606 | -0.2-0.2. |
|--|-----------------------|--|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

**Table G.6.** Opstillinger

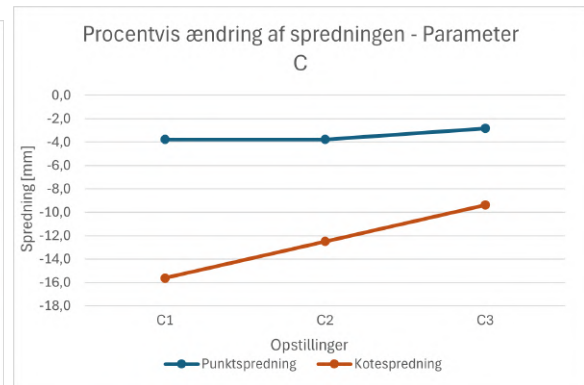
- Alle testnettene overholder kravsspecifikationes præisionskrav
- Punktpræcisionen er bedre når den 3. opstilling er placeret på pille 2 (sammenligning mellem C1 og C2).
- Redundansen forbedres fordi nogle detailpunkter måles fra flere opstillinger.
- Generelt forbedres den gennemsnitlige IP, fordi nogle detailpunkter måles fra flere opstillinger. Et eksempel her på er detailpunkter der målet fra 2 opstillinger har en IP på afstandsobservationen på 3.8 mm, mens detailpunkter målt fra 1 opstilling har en en IP på 4.0 mm.
- Den maximale IP stiger i nogle tilfælde, fx for horisontalretning. og vertikalvinklen for C2. Dette skyldes at der ved målinger mellem pille 2 og 3 er længere sigter, idet det miderste brofag er længere.
- EP max: falder en smule, mest på H og N. Årsagen er forsat fixpunktskoordinater
- EP95: falder
- 

|              | Vurderingsparametre        | C1 [%] | C2 [%] | C3[%] |
|--------------|----------------------------|--------|--------|-------|
| Præcision    | Gens. punktmiddelfejl [mm] | -3,8   | -3,8   | -2,8  |
|              | Gens. kotemiddelfejl       | -15,6  | -12,5  | -9,4  |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit    | 6,7    | 6,7    |       |
|              | $\rho_{hor}$ gennemsnit    | 6,7    | 6,7    | 10,7  |
|              | $\rho_{ver}$ gennemsnit    | 6,7    | 6,7    | 10,7  |
|              | IP gens. afs               | -2,8   | -2,8   | -4,3  |
|              | IP gens. hor               | -1,9   | -2,7   | -3,0  |
|              | IP gens. ver               | 1,3    | -1,6   | -1,1  |
|              | IP afs. max                | 0,0    | 0,0    | 0,0   |
|              | IP hor. max                | -2,0   | 3,5    | -2,0  |
|              | IP ver. max                | 9,3    | 7,6    | 5,2   |
|              | EP E max]                  | 6,5    | 6,5    | 3,2   |
|              | EP N max                   | -11,8  | -11,8  | -17,6 |
|              | EP H max                   | -35,0  | -30,0  | -40,0 |
|              | EP E 95% fraktil           | -50,0  | -50,0  | -66,7 |
|              | EP N 95% fraktil           | -60,0  | -60,0  | -60,0 |
|              | EP H 95% fraktil           | -40,0  | -40,0  | -60,0 |

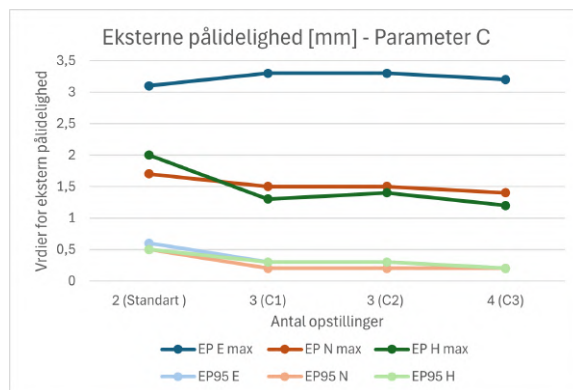
**Table G.7.** Den procentvise ændring i vurderingsparametrene sammenlignet med Standard (Ts30, 2 satser som baseline). Beregningen findes i Zipfilen (\Testnet \Procentberegninger).



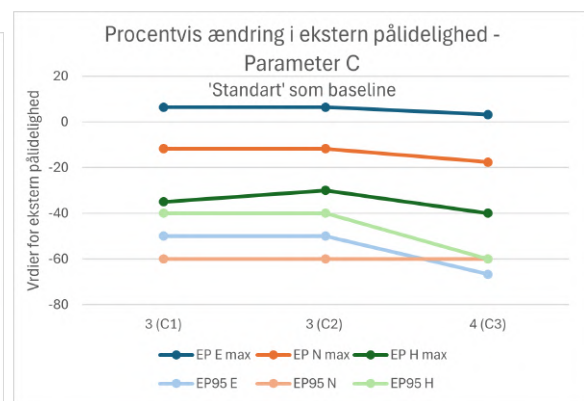
**Figure G.9.** Spredning for testnet vedr. parameter C - opstillinger.



**Figure G.10.** Procentvis ændring i spredninger pr. ekstra opstilling sammenlignet med 'Standart', for testnet vedr. parameter C - opstillinger.



**Figure G.11.** Ekstern pålidelighed for testnet vedr. parameter C - opstillinger.



**Figure G.12.** Procentvis ændring i ekstern pålidelighed for testnet vedr. parameter C - opstillinger.

## G.5 D - vægtning

| Vurderingsparametre | Standart | TS30_3 | TS30_5 | TS30_8 |
|---------------------|----------|--------|--------|--------|
|---------------------|----------|--------|--------|--------|

|              |                                       |                                                                                                                                                                                                                                                            |  |  |  |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| Præcision    | Gens. punktmiddelfejl [mm]            | Generelt: 1.56-1.79. Detailpunkterne har spredning på 1.1 i både E og N-retning, hvilket indikerer at detailpunkterne er lige godt bestemt i begge retninger. 606 og 506 som undtagelse men en spredning på E på 1.3, hvilket giver punktspredning på 1.7. |  |  |  |
|              | Gens. kotemiddelfejl                  | Alle mellem 0.9-1.0                                                                                                                                                                                                                                        |  |  |  |
| Pålidelighed | IP gens. afs                          | Alle afstandsobservationer til datailpunkter er på 4 mm                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |
|              | IP gens. hor                          | Alle ligger fra 3.4 - 4.04.                                                                                                                                                                                                                                |  |  |  |
|              | IP gens. ver                          | Alle ligger på 3.46-4.21.                                                                                                                                                                                                                                  |  |  |  |
|              | IP afs. max [mm]<br>IP hor.. max [mm] | Alle er 4<br>Alle ligger fra 3.4 - 4.04.<br>Højest på 218, 606, 305 og 318 og 506                                                                                                                                                                          |  |  |  |
|              | IP ver. max [mm]                      | Højest på 218, 606, 305 og 318 og 506.                                                                                                                                                                                                                     |  |  |  |

|  |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                |                                                                  |                                                                                                                                                                                 |
|--|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | EP E max [mm]            | <p>Generelt -2.1-<br/>-3.1. -2.1:<br/>218,318, 305.<br/>-2.6: 402, 418,<br/>102, 118. -3.1:<br/>506 og 606.<br/>Dvs. lavest på<br/>punkter der<br/>ligger nær<br/>centrum, af<br/>det af<br/>fixpunkterne,<br/>udspændte<br/>polygon.<br/>Årsag: "obser-<br/>vationen" til<br/>fixpunktskoor-<br/>dinator er<br/>årsag til alle<br/>EP E max,<br/>hvilket betyder<br/>at den største<br/>fejl der kan<br/>gemmen sig på<br/>detailpunk-<br/>terne er hvis<br/>koordinaterne<br/>til fixpunktern<br/>er ukorrekte.</p> | -2.2- -3.3.<br>Samme årsag<br>og mønster.      | -2.2- -3.3.<br>Samme årsag<br>og mønster.                        | -2.2- -3.2. -2.2:<br>305, 218, 318.<br>-2.8:102,118,<br>402,428. -3.2:<br>506, 606. Dvs<br>lavest i<br>centrum af<br>fixpunkterne.<br>Årsag:"obs"<br>fixpunktskoor-<br>dinator. |
|  | EP N max [mm]            | <p>Alle<br/>detailpunkter<br/>har 1.7. Årsag:<br/>Fra "obs" til<br/>fixpunktskoor-<br/>dinator.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -1.5 på alle.<br>Samme årsag<br>som standart.  | -1.4 på alle.<br>Samme årsag<br>som standart.                    | Alle er 1.4.<br>Årsag:"obs"<br>fixpunktskoor-<br>dinator.                                                                                                                       |
|  | EP H max [mm]            | <p>Alle<br/>detailpunkter<br/>har 2.0. Årsag:<br/>Fra "obs" til<br/>fixpunktskoor-<br/>dinator.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -1.8 på alle.<br>Samme årsag<br>som standart.. | -1.5 på alle<br>detailpunkter.<br>Samme årsager<br>som Standart. | Alle er på 1.3.<br>Årsag:"obs"<br>fixpunktskoor-<br>dinator.                                                                                                                    |
|  | EP E 95% fraktil<br>[mm] | <p>Generelt:<br/>-3-0.6: Hø-<br/>jeste:Afstandsmålingnøster og<br/>til 118 (også<br/>ved 418).<br/>Generelt er<br/>årsagen<br/>hz-måling til<br/>fixpunkter</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | -0.2-0.4.<br>Samme<br>årsager som<br>standart. | ±0.1. Samme<br>årsag som<br>Standart                             | ±1: Årsag: Af-<br>standsmålinger<br>til fixpunkters<br>indflydelse på<br>detailpunk-<br>terne                                                                                   |

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                              |                                                 |                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EP N 95% fraktil<br>[mm] | 0.2-0.5. Alle punkter, på nær 118 og 418 har 0.2. Generalt er det enten hz-målinger til punktet eller afs-tandsmålinger til fixpunkter der forplanter sig til detailpunkterne. Ved 118 og 418 er årsagen hz-målingerne, der er meget korte sigter til disse to punkter (2.5-3.5 m). 506 og 606. Fra "obs" der er fixpunktskoordinater, hvilket betyder at den største fejl der kan gemmen sig på detailpunkterne er hvis koordinaterne til fixpunktern er ukorrekte. | $\pm 0.2$ på alle punkter.                                   | $\pm 0.1$ . Samme årsag som Standart.           | $\pm 1$ : Årsag: Afstandsmåling til S1: 606. Afstandsmåling til fix (S2):102 og 118. Afs til S3: 402, 418. Afs S4:305, 506,318 218, 606:afstandsmåling til S1. Dvs lange afstande. |
| EP H 95% fraktil<br>[mm] |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Alle detail har -0.3. Årsag: vertikal-måling til fixpunkter. | Alle detail har -0.2. Samme årsag som Standart. | Årsag: $\pm 1$ : Vertikalvinkelen til fixpunkternes indflydelse på detailpunkterne                                                                                                 |

**Table G.8.** Parameter D: vægtning - instrumenter og satser

| Vurderingsparametre | Standart | TS16_2 | TS16_3 | TS16_5 | TS16_8 |
|---------------------|----------|--------|--------|--------|--------|
|---------------------|----------|--------|--------|--------|--------|

|              |                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                            |                            |                |                |                |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Præcision    | Gens. punktmiddelfejl [mm]                                                    | Generelt: 1.56-1.79. Detailpunkterne har spredning på 1.1 i både E og N-retning, hvilket indikerer at detailpunkterne er lige godt bestemt i begge retninger. 606 og 506 som undtagelse men en spredning på E på 1.3, hvilket giver punktspredning på 1.7. |                            |                |                |                |
|              | Punktmiddelfejl > 2 mm                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                            |                            |                |                |                |
|              | Gens. kotemiddelfejl<br>Kotemiddelfejl > 2 mm                                 | Alle mellem 0.9-1.0                                                                                                                                                                                                                                        |                            |                |                |                |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gennemsnit<br>$\rho_{hor}$ gennemsnit<br>$\rho_{ver}$ gennemsnit | Alle mellem 0.8-1.0                                                                                                                                                                                                                                        |                            |                |                |                |
|              | $\rho_{afs} < 0.5$<br>$\rho_{hor} < 0.5$<br>$\rho_{ver} < 0.5$                |                                                                                                                                                                                                                                                            |                            |                |                |                |
|              | IP gens. afs                                                                  | Alle afstandsobse-<br>rvationer til<br>datailpunkter er på<br>4 mm                                                                                                                                                                                         | Alle er<br>4.9             | Alle er<br>4.6 | Alle er<br>4.4 | Alle er<br>4.4 |
|              | IP gens. hor                                                                  | Alle ligger fra 3.4 -<br>4.04.                                                                                                                                                                                                                             | 3.46-5.39                  | 3.29-5.15      | 3.16-4.85      | 3.10-4.73      |
|              | IP gens. ver                                                                  | Alle ligger på<br>3.46-4.21.                                                                                                                                                                                                                               | 3.46-5.39                  | 3.29-5.12      | 3.16-4.85      | 3.10-4.85      |
|              | IP afs. max [mm]                                                              | Alle er 4                                                                                                                                                                                                                                                  | Alle er<br>4.9             | Alle er<br>4.6 | Alle er<br>4.4 |                |
|              | IP hor.. max [mm]                                                             | Alle ligger fra 3.4 -<br>4.04. Højest på 218,<br>606, 305 og 318 og<br>506                                                                                                                                                                                 | Højest på<br>305 og<br>318 |                |                |                |
|              | IP ver. max [mm]                                                              | Højest på 218, 606,<br>305 og 318 og 506.                                                                                                                                                                                                                  | Højest på<br>305 og<br>318 |                |                |                |

|  |                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                    |                                                                                                       |                                                                    |                                                                               |
|--|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|  | EP E max [mm]         | <p>Generelt -2.1- -3.1.<br/>-2.1: 218,318, 305.<br/>-2.6: 402, 418, 102, 118. -3.1: 506 og 606. Dvs. lavest på punkter der ligger nær centrum, af det af fixpunkterne, udspændte polygon.</p> <p>Årsag:<br/>"observationen" til fixpunktskoordinater er årsag til alle EP E max, hvilket betyder at den største fejl der kan gemmen sig på detailpunkterne er hvis koordinaterne til fixpunkt er ukorrekte.</p> | <p>-2.4- -3.5.<br/>Samme mønster og årsager som Standart.</p>      | <p>-2.3 -<br/>-3.4.<br/>Samme mønster og årsager som Standart</p>                                     | <p>-2.2 -<br/>-3.3.<br/>Samme mønster og årsager som Standart.</p> | <p>-2.2 -<br/>-3.2.<br/>Samme mønster og årsager som Standart.</p>            |
|  | EP N max [mm]         | <p>Alle detailpunkter har 1.7. Årsag: Fra "obs" til fixpunktskoordinater.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <p>-1.5 på alle detailpunkter.<br/>Samme årsager som Standart.</p> | <p>-1.5 på alle detailpunkter.<br/>Samme årsager som Standart.</p>                                    | <p>-1.5 på alle detailpunkter.<br/>Samme årsager som Standart.</p> | <p>-1.4 - -1.5 på alle detailpunkter.<br/>Samme årsager som Standart.</p>     |
|  | EP H max [mm]         | <p>Alle detailpunkter har 2.0. Årsag: Fra "obs" til fixpunktskoordinater.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <p>-2.4 på alle.Samme mønster og årsager som Standart.</p>         | <p>-2.0 på alle detailpunkter.<br/>Samme årsager som Standart.</p>                                    | <p>-1.5 på alle detailpunkter.<br/>Samme årsager som Standart.</p> | <p>-1.5 på alle detailpunkter.<br/>Samme mønster og årsager som Standart.</p> |
|  | EP E 95% fraktil [mm] | <p>Generelt: -0.3-0.6: Højeste:Afstandsmåling til 118 (også ved 418). Generelt er årsagen hz-måling til fixpunkter</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p>-0.5-0.7.<br/>Samme mønster og årsager som Standart.</p>        | <p>-0.3 - 0.4.<br/>Alle på nær 118 og 418 har <math>\pm 0.3</math>.<br/>Samme årsag som standart.</p> | <p>-0.2 - 0.3</p>                                                  | <p><math>\pm 0.1</math></p>                                                   |

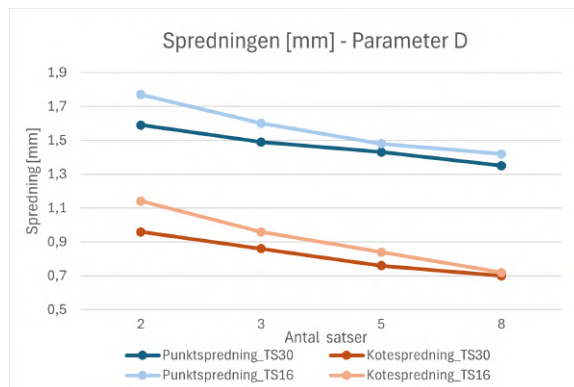
|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                   |                                                       |                                                 |                                                 |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| EP N 95% fraktil<br>[mm] | 0.2-0.5. Alle punkter, på nær 118 og 418 har 0.2 mm. Generalt er det enten hz-målinger til punktet eller afstandsmålinger til fixpunkter der forplanter sig til detailpunkterne. Ved 118 og 418 er årsagen hz-målingerne, der er meget korte sigter til disse to punkter (2.5-3.5 m). | 0.3- -0.5. Alle punkter, på nær 118 og 418 har $\pm 0.3$ . Samme mønster og årsager som Standart. | $\pm 0.2$ .                                           | $\pm 0.1$                                       | $\pm 0.1$                                       |
| EP H 95% fraktil<br>[mm] | Alle detail har -0.5. Årsag: vertikal-måling til fixpunkter.                                                                                                                                                                                                                          | Alle detail har -0.7. Samme årsag som Standart.                                                   | Alle detailpunkter har -0.5. Samme årsag som Standart | Alle detail har -0.3. Samme årsag som Standart. | Alle detail har -0.2. Samme årsag som standart. |

**Table G.9.** Parameter D: vægtning - instrumenter og satser

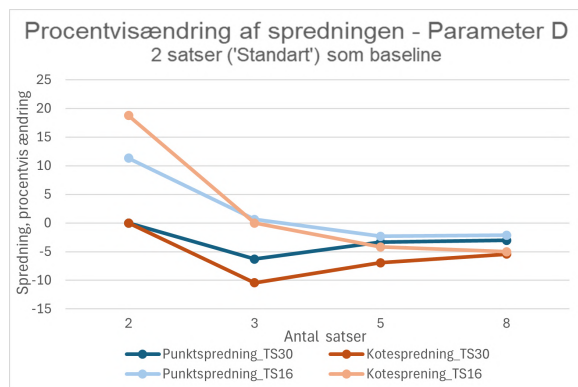
- både antal satser og instrumentet påvirker præcisionen.
- det ser ud til at det af anvende et ringere instrument i høj grad kan kompenseres ved at måle flere satser, ud fra figr 6.5 kan der opnåes samme præcision( både punktspredning og spredning på koten)
- redundanse forbedre ved flere satser men påvirkes ikke at instrumentet
- den gennemsnitlige IP-værdi ved 2 satser er 16-23% bedre for TS30 end TS16, og forskellen i IP-værdierne kan der ud fra tabel G.10 ikke kompenseres for ved at måle flere satser. dette udledes af at, den gennemsmnitlige IPværdi er hhv. 4.00, 3.72 og 3,77 for afs., hor.og ver. for TS30 med 2 satser (Standart), hvilke IP-værdierne ikke engang kan bringes ned til med 8 satser med TS16.
- Årsagerne til EP værdierne er forsat fixpunktskoordinaterne for EP max værdierne og målingerne til fixpunkterne for EP95 værdierne. Hvorfor stiger EP E max med flere satser???
- EP max værdierne falder kun meget lidt ved at øge satserne, mens EP95 falder noget mere ved at øge satserne. dette forventes at skyldes at EP max-værdierne er forsat af fixpunktskoordinaterne, hvilket ikke forbedres med flere målinger. Mens EP95-værdierne er forsat af observation til fixpunkter eller 118 og 418, hvilket forbedres ved gentagne målinger

|              | Vurderingsparametr           | TS30_3 | TS30_5 | TS30_8 | TS16_2 | T6_3  | TS16_5 | TS16_8 |
|--------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Præcision    | Gens. punktmiddelfejl [mm]   | -6,3   | -3,4   | -3,0   | 11,3   | 0,6   | -2,3   | -2,1   |
|              | Gens. kotemiddelfejl [mm]    | -10,4  | -6,9   | -5,4   | 18,8   | 0,0   | -4,2   | -5,0   |
| Pålidelighed | $\rho_{afs}$ gens. $[\cdot]$ | 10,7   | 6,7    | 5,1    | 0,0    | 10,7  | 6,7    | 5,1    |
|              | $\rho_{hor}$ gens. $[\cdot]$ | 10,7   | 6,7    | 5,1    | 0,0    | 10,7  | 6,7    | 5,1    |
|              | $\rho_{ver}$ gens. $[\cdot]$ | 10,7   | 6,7    | 5,1    | 0,0    | 10,7  | 6,7    | 5,1    |
|              | IP gens. afs [mm]            | -5,0   | -2,5   | -2,0   | 22,5   | 15,0  | 3,3    | 2,0    |
|              | IP gens. hor [mm]            | -5,9   | -2,7   | -2,4   | 16,9   | 11,3  | 2,1    | 0,8    |
|              | IP gens. ver [mm]            | -4,2   | -2,9   | -2,0   | 15,9   | 9,8   | 1,8    | 0,8    |
|              | IP afs. max [mm]             | -5,0   | -2,5   | -2,0   | 22,5   | 15,0  | 3,3    | 2,0    |
|              | IP hor. max [mm]             | -6,7   | -2,2   | -2,7   | 33,4   | 26,7  | 6,7    | 3,4    |
|              | IP ver. max [mm]             | -10,5  | -3,5   | -2,1   | 28,0   | 21,6  | 5,1    | 3,0    |
|              | EP E max [mm]                | 6,5    | 3,2    | 1,3    | 12,9   | 9,7   | 2,2    | 0,6    |
|              | EP N max [mm]                | -11,8  | -3,9   | -3,5   | -11,8  | -11,8 | -3,9   | -2,4   |
|              | EP H max [mm]                | -10,0  | -8,3   | -7,0   | 0,0    | 0,0   | -8,3   | -5,0   |
|              | EP E 95% fraktil [mm]        | -33,3  | -22,2  | -16,7  | 16,7   | -33,3 | -16,7  | -16,7  |
|              | EP N 95% fraktil [mm]        | -60,0  | -26,7  | -16,0  | 0,0    | -60,0 | -26,7  | -16,0  |
|              | EP H 95% fraktil [mm]        | -40,0  | -20,0  | -16,0  | 40,0   | 0,0   | -13,3  | -12,0  |

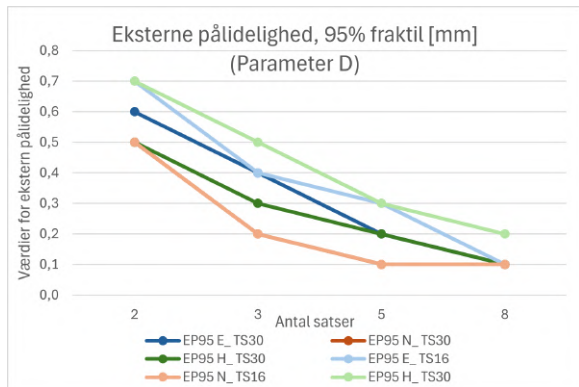
**Table G.10.** Den procentvise ændring i vurderingsparametrene pr. ekstra sat. Standart (Ts30, 2 satser som baseline). beregningen findes i Zipfilen (\6.Testnet \Procentberegninger).



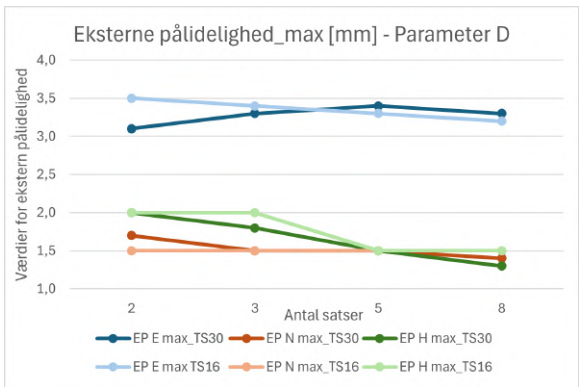
**Figure G.13.** Spredning for testnet vedr. parameter D - vægtning.



**Figure G.14.** Procentvis ændring i spredninger for testnet vedr. parameterD - vægtning.



**Figure G.15.** Ekstern pålidelighed (95% fraktil) for testnet vedr. parameter D - vægtning.



**Figure G.16.** Ekstern pålidelighed (max) for testnet vedr. parameter D - vægtning.



## H.1 Beregning af nye fixpunkter

Dataen fra de to opstillinger samles i en fil: Data\_sablede.OBS

### H.1.1 Korrektion for ppm\_a

ved målingerne er der glemt af indtaste værdier til atmosfæriske korrektioner, dette blev først opdaget ved målingens afslutningen. Registeret værdier: 15.0 grader, 1001 mbar, 78% = 6.6

Faktiske værdier: 7 grader, 1004 mbar, 71.0% luftfugtighed = -2,5

Difference:  $(-2.5)-6.6 = -9$

$$Sd * (1 + ppm\_a * 10^{-6}) \quad (H.1)$$

$$Sd * (1 + -9 * 10^{-6}) \quad (H.2)$$

Gemmes i Data\_samlede\_korrigeret.OBS

**Data fra 28 april** Faktiske værdier: 14.6 grader, 1009.6, 62.3=2.88

Difference:  $2.88-6.6=-3.72$

### H.1.2 Midling af satser

Laver horisontudjævn i SDL for at midle satserne. Laver er en med alle 4 satser, og en med de 3 sidste for at test om den først er ringere 4 satser: SatserMidel.RES 3Satser: SatserMiddel\_3satser.RES

4 satser:

- retningsmiddelfejl opstilling P4: 2.3 cc
- retningsmiddelfejl opstilling P1: 15.8 cc

3 satser: - retningsmiddelfejl opstilling P4: 2.0 cc - retningsmiddelfejl opstilling P1: 0.7 cc

Går med den med de sidste 3 satser

Output fil: SatserMidel\_3satser.OBS

### H.1.3 Udjævning af plane koordinater til nye fixpunkter

#### Fri udjævning

Førløbigekoor: fixpkt fil (koor er fra kravsspecifikation)

Observationskatalog: SatserMidel\_3satser.OBS

Outputfil: FriUdjPlan.RES + FriUdjPlan.OBS

Gennemgang af resultatfilen:

Spredning på vægtenheden: 1.448, hvilket viser at der er målt ringere end forventede.

Punktspredning på de nye fixpunkter på 0.7-1 mm.

Ingen P\*V over 3.

Men udjævningen accepteres uden ændringer, da der ikke er indikation på grove fejl (se figur H.1).

Middelfejl på vægtenheden = 1.448

Observationer

| Pktnr.                                            | Kode  | Hor. gon | V (hor. cc) | P*V | Zen. gon | Skr.afst. m | Kor.afst. m | V (afst. mm) | P*V | Bemrk. | Pktnr. |
|---------------------------------------------------|-------|----------|-------------|-----|----------|-------------|-------------|--------------|-----|--------|--------|
| Opstillingspunkt: P4.1 (rep.hor.: 3, rep.afs.: 3) |       |          |             |     |          |             |             |              |     |        |        |
| 51                                                | ----- | 0.0000   | 0.2         | 0.3 | 102.2484 | 829.5440    | 829.0267    | 0.2          | 0.2 |        | 51     |
| 52                                                | ----- | 64.8198  | 1.1         | 1.4 | 102.4162 | 778.7050    | 778.1442    | -0.7         | 0.7 |        | 52     |
| 57                                                | ----- | 288.1016 | 0.4         | 0.2 | 108.1422 | 227.1721    | 225.3166    | -0.4         | 0.5 |        | 57     |
| 1                                                 | ----- | 234.8513 | 2.9         | 0.8 | 110.1109 | 150.1385    | 148.2489    | -0.6         | 0.7 |        | 1      |
| 2                                                 | ----- | 29.8905  | -1.5        | 1.8 | 102.8218 | 695.7779    | 695.0945    | 0.1          | 0.1 |        | 2      |
| PT64-1                                            | ----- | 230.0309 | -1.0        | 0.3 | 98.1401  | 133.4743    | 133.4173    | 0.9          | 1.1 |        | PT64-1 |
| PT64-2                                            | ----- | 229.1176 | 0.4         | 0.1 | 111.8955 | 134.4828    | 132.1419    | 0.2          | 0.2 |        | PT64-2 |
| PT64-3                                            | ----- | 219.9476 | 0.0         | 0.0 | 111.7457 | 136.2814    | 133.9684    | 0.0          | 0.0 |        | PT64-3 |
| 402                                               | ----- | 130.0830 | -33.9       | 1.4 | 102.8523 | 22.1946     | 22.1723     | 0.5          | 0.6 |        | 402    |
| 3                                                 | ----- | 292.7832 | -1.7        | 0.7 | 109.2476 | 209.6695    | 207.4613    | 0.0          | 0.0 |        | 3      |
| Opstillingspunkt: P4.2 (rep.hor.: 3, rep.afs.: 3) |       |          |             |     |          |             |             |              |     |        |        |
| PT64-1                                            | ----- | 0.0000   | 1.0         | 0.3 | 98.1246  | 133.0804    | 133.0227    | -0.9         | 1.1 |        | PT64-1 |
| PT64-2                                            | ----- | 399.0848 | -0.4        | 0.1 | 111.9209 | 134.0880    | 131.7440    | -0.2         | 0.2 |        | PT64-2 |
| 402                                               | ----- | 298.8430 | 33.8        | 1.4 | 102.8056 | 22.0769     | 22.0555     | -0.5         | 0.6 |        | 402    |
| 1                                                 | ----- | 4.8280   | -1.6        | 0.4 | 110.1292 | 149.7535    | 147.8619    | 0.2          | 0.2 |        | 1      |
| 3                                                 | ----- | 62.8163  | 1.1         | 0.4 | 109.2467 | 209.5507    | 207.3442    | -0.5         | 0.6 |        | 3      |
| 2                                                 | ----- | 199.7906 | 0.6         | 0.6 | 102.8182 | 696.1735    | 695.4915    | 0.0          | 0.0 |        | 2      |
| 4                                                 | ----- | 169.7197 | -0.5        | 0.7 | 102.3670 | 808.9868    | 808.4277    | -0.1         | 0.0 |        | 4      |
| 318                                               | ----- | 200.5995 | 0.0         | 0.0 | 99.6477  | 168.9748    | 168.9722    | 0.0          | 0.0 |        | 318    |
| Opstillingspunkt: P1 (rep.hor.: 3, rep.afs.: 3)   |       |          |             |     |          |             |             |              |     |        |        |
| 51                                                | ----- | 0.0000   | -0.4        | 0.3 | 104.4091 | 424.7812    | 423.7628    | 0.0          | 0.0 |        | 51     |
| 52                                                | ----- | 154.0910 | -1.7        | 1.3 | 104.5464 | 415.7810    | 414.7212    | -0.4         | 0.5 |        | 52     |
| 57                                                | ----- | 287.7745 | 0.2         | 0.2 | 102.5932 | 716.2299    | 715.6358    | 0.7          | 0.6 |        | 57     |
| 1                                                 | ----- | 272.7660 | -0.3        | 0.4 | 102.1697 | 702.3720    | 701.9641    | 0.5          | 0.5 |        | 1      |
| 2                                                 | ----- | 68.4852  | 3.7         | 1.0 | 113.7305 | 144.6241    | 141.2734    | -0.2         | 0.2 |        | 2      |
| 3                                                 | ----- | 287.8574 | 0.6         | 0.6 | 102.8083 | 692.4223    | 691.7487    | 0.3          | 0.3 |        | 3      |
| 4                                                 | ----- | 397.7119 | 0.7         | 0.5 | 104.6971 | 409.9111    | 408.7959    | -0.3         | 0.4 |        | 4      |
| PT00.1                                            | ----- | 72.4385  | 0.0         | 0.0 | 98.1235  | 132.3591    | 132.3016    | 0.0          | 0.0 |        | PT00.1 |
| PT00.2                                            | ----- | 72.5526  | 0.0         | 0.0 | 112.2846 | 134.3562    | 131.8625    | 0.0          | 0.0 |        | PT00.2 |
| PT00.3                                            | ----- | 82.3879  | 0.0         | 0.0 | 112.1274 | 136.1440    | 133.6812    | 0.0          | 0.0 |        | PT00.3 |
| 102                                               | ----- | 173.0482 | 0.0         | 0.0 | 102.6088 | 22.0053     | 21.9868     | 0.0          | 0.0 |        | 102    |

Figure H.1. Uddrag af resultatfil for fri udjævning af de plane koordinater til de nye fixpunkter.

## Fast udjævning

Spredning på vægtenheden på 4.3 er høj.

Punktspredning på de nye fixpunkter på 2.9-3.7 mm.

Ingen P\*V over 3, men generelt høje værdier på observationer til fixpunkterne fra den manuelle måling (se figur H.2) .

### H.1.4 Udjævning af koter til nye fixpunkter

#### Fri udjævning

Spredning på vægtenheden er meget høj (83.9), men der er ikke de store rettelser (se figur H.3).

Det forsøges til iteration 2 at fjerne observationer til 51, 52 og 57, da koter til disse ikke skal bruges. Afstanden er meget lang og koterne kan derfor være behæftede med større fejl.

Output: FriUdjKote2

Middelfejl på vægtenheden = 4.272

Observationer

| Pktnr.                                            | Kode  | Hor.<br>gon | V (hor.)<br>cc | P*V | Zen.<br>gon | Skr.afst.<br>m | Kor.afst.<br>m | V (afst.)<br>mm | P*V | Bemrk. | Pktnr. |
|---------------------------------------------------|-------|-------------|----------------|-----|-------------|----------------|----------------|-----------------|-----|--------|--------|
| Opstillingspunkt: P4.1 (rep.hor.: 3, rep.afs.: 3) |       |             |                |     |             |                |                |                 |     |        |        |
| 51                                                | ----- | 0.0000      | -1.8           | 0.8 | 102.2484    | 829.5440       | 829.0267       | 5.8             | 1.8 |        | 51     |
| 52                                                | ----- | 64.8198     | 4.1            | 1.7 | 102.4162    | 778.7050       | 778.1442       | 3.4             | 1.1 |        | 52     |
| 57                                                | ----- | 288.1016    | -7.5           | 1.1 | 108.1422    | 227.1721       | 225.3166       | 2.3             | 0.9 |        | 57     |
| 1                                                 | ----- | 234.8513    | 3.0            | 0.3 | 110.1109    | 150.1385       | 148.2489       | -0.7            | 0.3 |        | 1      |
| 2                                                 | ----- | 29.8905     | -1.5           | 0.6 | 102.8218    | 695.7779       | 695.0945       | 0.4             | 0.1 |        | 2      |
| PT64-1                                            | ----- | 230.0309    | -1.0           | 0.1 | 98.1401     | 133.4743       | 133.4173       | 0.8             | 0.3 |        | PT64-1 |
| PT64-2                                            | ----- | 229.1176    | 0.5            | 0.0 | 111.8955    | 134.4828       | 132.1419       | 0.1             | 0.0 |        | PT64-2 |
| PT64-3                                            | ----- | 219.9476    | 0.0            | 0.0 | 111.7457    | 136.2814       | 133.9684       | 0.0             | 0.0 |        | PT64-3 |
| 402                                               | ----- | 130.0830    | -36.2          | 0.5 | 102.8523    | 22.1946        | 22.1723        | 0.5             | 0.2 |        | 402    |
| 3                                                 | ----- | 292.7832    | -1.2           | 0.2 | 109.2476    | 209.6695       | 207.4613       | -0.1            | 0.0 |        | 3      |
| Opstillingspunkt: P4.2 (rep.hor.: 3, rep.afs.: 3) |       |             |                |     |             |                |                |                 |     |        |        |
| PT64-1                                            | ----- | 0.0000      | 1.0            | 0.1 | 98.1246     | 133.0804       | 133.0227       | -0.8            | 0.3 |        | PT64-1 |
| PT64-2                                            | ----- | 399.0848    | -0.5           | 0.0 | 111.9209    | 134.0880       | 131.7440       | -0.1            | 0.0 |        | PT64-2 |
| 402                                               | ----- | 298.8430    | 36.1           | 0.5 | 102.8056    | 22.0769        | 22.0555        | -0.5            | 0.2 |        | 402    |
| 1                                                 | ----- | 4.8280      | -1.7           | 0.2 | 110.1292    | 149.7535       | 147.8619       | 0.2             | 0.1 |        | 1      |
| 3                                                 | ----- | 62.8163     | 1.1            | 0.1 | 109.2467    | 209.5507       | 207.3442       | -0.5            | 0.2 |        | 3      |
| 2                                                 | ----- | 199.7906    | 0.5            | 0.2 | 102.8182    | 696.1735       | 695.4915       | 0.2             | 0.0 |        | 2      |
| 4                                                 | ----- | 169.7197    | -0.5           | 0.2 | 102.3670    | 808.9868       | 808.4277       | 0.1             | 0.0 |        | 4      |
| 318                                               | ----- | 200.5995    | 0.0            | 0.0 | 99.6477     | 168.9748       | 168.9722       | 0.0             | 0.0 |        | 318    |
| Opstillingspunkt: P1 (rep.hor.: 3, rep.afs.: 3)   |       |             |                |     |             |                |                |                 |     |        |        |
| 51                                                | ----- | 0.0000      | 0.9            | 0.2 | 104.4091    | 424.7812       | 423.7628       | 5.9             | 2.2 |        | 51     |
| 52                                                | ----- | 154.0910    | -1.2           | 0.3 | 104.5464    | 415.7810       | 414.7212       | 4.8             | 1.8 |        | 52     |
| 57                                                | ----- | 287.7745    | -0.4           | 0.2 | 102.5932    | 716.2299       | 715.6358       | 5.1             | 1.7 |        | 57     |
| 1                                                 | ----- | 272.7660    | -0.3           | 0.1 | 102.1697    | 702.3720       | 701.9641       | 0.8             | 0.3 |        | 1      |
| 2                                                 | ----- | 68.4852     | 3.7            | 0.3 | 113.7305    | 144.6241       | 141.2734       | -0.4            | 0.2 |        | 2      |
| 3                                                 | ----- | 287.8574    | 0.5            | 0.2 | 102.8083    | 692.4223       | 691.7487       | 0.6             | 0.2 |        | 3      |
| 4                                                 | ----- | 397.7119    | 0.5            | 0.1 | 104.6971    | 409.9111       | 408.7959       | -0.4            | 0.1 |        | 4      |
| PT00.1                                            | ----- | 72.4385     | 0.0            | 0.0 | 98.1235     | 132.3591       | 132.3016       | 0.0             | 0.0 |        | PT00.1 |
| PT00.2                                            | ----- | 72.5526     | 0.0            | 0.0 | 112.2846    | 134.3562       | 131.8625       | 0.0             | 0.0 |        | PT00.2 |
| PT00.3                                            | ----- | 82.3879     | 0.0            | 0.0 | 112.1274    | 136.1440       | 133.6812       | 0.0             | 0.0 |        | PT00.3 |
| 102                                               | ----- | 173.0482    | 0.0            | 0.0 | 102.6088    | 22.0053        | 21.9868        | 0.0             | 0.0 |        | 102    |

Figure H.2. Uddrag af resultatfil for fast udjævning af de plane koordinater til de nye fixpunkter.

Middelfejl på vægtenheden = 83.975

Observationer

| Pktnr.                                                              | Kode  | Prhd.<br>m | Zen.<br>gon | V (zen.)<br>cc | P*V | H.diff.<br>m | V (Hdiff)<br>mm | P*V | Afst.<br>m | Bemrk. | Pktnr. |
|---------------------------------------------------------------------|-------|------------|-------------|----------------|-----|--------------|-----------------|-----|------------|--------|--------|
| Opstillingspunkt: P4.1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 51                                                                  | ----- | 0.000      | 102.2484    | -8.            | 0.1 |              |                 |     | 829.5440   |        | 51     |
| 52                                                                  | ----- | 0.000      | 102.4162    | -2.            | 0.0 |              |                 |     | 778.7050   |        | 52     |
| 57                                                                  | ----- | 0.000      | 108.1422    | 7.             | 0.1 |              |                 |     | 227.1721   |        | 57     |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1109    | 8.             | 0.0 |              |                 |     | 150.1385   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8218    | -1.            | 0.0 |              |                 |     | 695.7779   |        | 2      |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1401     | 1.             | 0.0 |              |                 |     | 133.4743   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.8955    | 1.             | 0.0 |              |                 |     | 134.4828   |        | PT64-2 |
| PT64-3                                                              | ----- | 0.000      | 111.7457    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 136.2814   |        | PT64-3 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8523    | -5.            | 0.0 |              |                 |     | 22.1946    |        | 402    |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2476    | 3.             | 0.0 |              |                 |     | 209.6695   |        | 3      |
| Opstillingspunkt: P4.2 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1246     | -1.            | 0.0 |              |                 |     | 133.0804   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.9209    | -1.            | 0.0 |              |                 |     | 134.0880   |        | PT64-2 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8056    | 5.             | 0.0 |              |                 |     | 22.0769    |        | 402    |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1292    | -3.            | 0.0 |              |                 |     | 149.7535   |        | 1      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2467    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 209.5507   |        | 3      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8182    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 696.1735   |        | 2      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 102.3670    | 2.             | 0.0 |              |                 |     | 808.9868   |        | 4      |
| 318                                                                 | ----- | 0.000      | 99.6477     | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 168.9748   |        | 318    |
| Opstillingspunkt: P1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1)   |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 51                                                                  | ----- | 0.000      | 104.4091    | 7.             | 0.1 |              |                 |     | 424.7812   |        | 51     |
| 52                                                                  | ----- | 0.000      | 104.5464    | 2.             | 0.0 |              |                 |     | 415.7810   |        | 52     |
| 57                                                                  | ----- | 0.000      | 102.5932    | -4.            | 0.1 |              |                 |     | 716.2299   |        | 57     |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 102.1697    | -2.            | 0.0 |              |                 |     | 702.3720   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 113.7305    | 2.             | 0.0 |              |                 |     | 144.6241   |        | 2      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8083    | -2.            | 0.0 |              |                 |     | 692.4223   |        | 3      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 104.6971    | -2.            | 0.0 |              |                 |     | 409.9111   |        | 4      |
| PT00.1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1235     | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 132.3591   |        | PT00.1 |
| PT00.2                                                              | ----- | 0.000      | 112.2846    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 134.3562   |        | PT00.2 |
| PT00.3                                                              | ----- | 0.000      | 112.1274    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 136.1440   |        | PT00.3 |
| 102                                                                 | ----- | 0.498      | 102.6088    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 22.0053    |        | 102    |

Figure H.3. Uddrag af resultatfil for 1. fri udjævning af koter til de nye fixpunkter.

Forbedret spredning på vægteenheden (8.4), men stadig høj.

Spredning på koten på 3.1-4.3 m.

Ingen P\*V over 3 (se figur H.4).

Accepteres da der ikke er større rettelser på nogle af punkterne.

| Middelfejl på vægtenheden = 8.362                                   |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
|---------------------------------------------------------------------|-------|------------|-------------|----------------|-----|--------------|-----------------|-----|------------|--------|--------|
| Observationer                                                       |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| Pktnr                                                               | Kode  | Prhd.<br>m | Zen.<br>gon | V (zen.)<br>cc | P*V | H.diff.<br>m | V (Hdiff)<br>mm | P*V | Afst.<br>m | Bemrk. | Pktnr. |
| Opstillingspunkt: P4.1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1109    | 5.             | 0.3 |              |                 |     | 150.1385   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8218    | -2.            | 0.3 |              |                 |     | 695.7779   |        | 2      |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1401     | -1.            | 0.0 |              |                 |     | 133.4743   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.8955    | -1.            | 0.0 |              |                 |     | 134.4828   |        | PT64-2 |
| PT64-3                                                              | ----- | 0.000      | 111.7457    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 136.2814   |        | PT64-3 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8523    | -13.           | 0.1 |              |                 |     | 22.1946    |        | 402    |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2476    | 1.             | 0.1 |              |                 |     | 209.6695   |        | 3      |
| Opstillingspunkt: P4.2 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1246     | 1.             | 0.0 |              |                 |     | 133.0804   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.9209    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 134.0880   |        | PT64-2 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8056    | 13.            | 0.1 |              |                 |     | 22.0769    |        | 402    |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1292    | -4.            | 0.2 |              |                 |     | 149.7535   |        | 1      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2467    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 209.5507   |        | 3      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8182    | 0.             | 0.1 |              |                 |     | 696.1735   |        | 2      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 102.3670    | 1.             | 0.2 |              |                 |     | 808.9868   |        | 4      |
| 318                                                                 | ----- | 0.000      | 99.6477     | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 168.9748   |        | 318    |
| Opstillingspunkt: P1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1)   |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 102.1697    | -1.            | 0.1 |              |                 |     | 702.3720   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 113.7305    | 5.             | 0.3 |              |                 |     | 144.6241   |        | 2      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8083    | -1.            | 0.1 |              |                 |     | 692.4223   |        | 3      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 104.6971    | -1.            | 0.1 |              |                 |     | 409.9111   |        | 4      |
| PT00.1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1235     | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 132.3591   |        | PT00.1 |
| PT00.2                                                              | ----- | 0.000      | 112.2846    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 134.3562   |        | PT00.2 |
| PT00.3                                                              | ----- | 0.000      | 112.1274    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 136.1440   |        | PT00.3 |
| 102                                                                 | ----- | 0.498      | 102.6088    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 22.0053    |        | 102    |

**Figure H.4.** Uddrag af resultatfil for 2. fri udjævning af koter til de nye fixpunkter.

## Fast udjævning

Spredning på vægtenheden på 2.17

Punkt PT00.3 har P\*V på 2.0 (se figur H.5). Derfor forsøges der til 2. iteration af fjerne dette punkt.

| Middelfejl på vægtenheden = 2.165                                   |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
|---------------------------------------------------------------------|-------|------------|-------------|----------------|-----|--------------|-----------------|-----|------------|--------|--------|
| Observationer                                                       |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| Pktnr                                                               | Kode  | Prhd.<br>m | Zen.<br>gon | V (zen.)<br>cc | P*V | H.diff.<br>m | V (Hdiff)<br>mm | P*V | Afst.<br>m | Bemrk. | Pktnr. |
| Opstillingspunkt: P4.1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1109    | 6.             | 1.2 |              |                 |     | 150.1385   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8218    | -1.            | 0.8 |              |                 |     | 695.7779   |        | 2      |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1401     | 4.             | 0.6 |              |                 |     | 133.4743   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.8955    | -4.            | 0.7 |              |                 |     | 134.4828   |        | PT64-2 |
| PT64-3                                                              | ----- | 0.000      | 111.7457    | -4.            | 0.6 |              |                 |     | 136.2814   |        | PT64-3 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8523    | -11.           | 0.3 |              |                 |     | 22.1946    |        | 402    |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2476    | 2.             | 0.5 |              |                 |     | 209.6695   |        | 3      |
| Opstillingspunkt: P4.2 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1246     | 4.             | 0.7 |              |                 |     | 133.0804   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.9209    | -4.            | 0.7 |              |                 |     | 134.0880   |        | PT64-2 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8056    | 9.             | 0.2 |              |                 |     | 22.0769    |        | 402    |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1292    | -4.            | 0.7 |              |                 |     | 149.7535   |        | 1      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2467    | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 209.5507   |        | 3      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8182    | 0.             | 0.2 |              |                 |     | 696.1735   |        | 2      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 102.3670    | 1.             | 0.8 |              |                 |     | 808.9868   |        | 4      |
| 318                                                                 | ----- | 0.000      | 99.6477     | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 168.9748   |        | 318    |
| Opstillingspunkt: P1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1)   |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 102.1697    | -1.            | 0.7 |              |                 |     | 702.3720   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 113.7305    | 4.             | 0.7 |              |                 |     | 144.6241   |        | 2      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8083    | -1.            | 0.6 |              |                 |     | 692.4223   |        | 3      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 104.6971    | -1.            | 0.5 |              |                 |     | 409.9111   |        | 4      |
| PT00.1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1235     | -6.            | 0.9 |              |                 |     | 132.3591   |        | PT00.1 |
| PT00.2                                                              | ----- | 0.000      | 112.2846    | 6.             | 1.0 |              |                 |     | 134.3562   |        | PT00.2 |
| PT00.3                                                              | ----- | 0.000      | 112.1274    | 12.            | 2.0 |              |                 |     | 136.1440   |        | PT00.3 |
| 102                                                                 | ----- | 0.498      | 102.6088    | -48.           | 1.3 |              |                 |     | 22.0053    |        | 102    |

**Figure H.5.** Uddrag af resultatfil for fast udjævning af koter til de nye fixpunkter

Resultat af 2. iteration (se figur H.6):

-Spredning på vægtenheden: 1.85.

-Ingen P\*V over 2.

-Spredning på de nye fixpunkter på 0.8-1 mm.

Dette giver en spredning på koten til de nye fixpunkter på xx mm

Middelfejl på vægtenheden = 1.851

| Observationer                                                       |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
|---------------------------------------------------------------------|-------|------------|-------------|----------------|-----|--------------|-----------------|-----|------------|--------|--------|
| Pktnr.                                                              | Kode  | Prhd.<br>m | Zen.<br>gon | V (zen.)<br>cc | P*V | H.diff.<br>m | V (Hdiff)<br>mm | P*V | Afst.<br>m | Bemrk. | Pktnr. |
| Opstillingspunkt: P4.1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1109    | 6.             | 1.3 |              |                 |     | 150.1385   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8218    | -1.            | 1.1 |              |                 |     | 695.7779   |        | 2      |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1401     | 4.             | 0.8 |              |                 |     | 133.4743   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.8955    | -4.            | 0.7 |              |                 |     | 134.4828   |        | PT64-2 |
| PT64-3                                                              | ----- | 0.000      | 111.7457    | -3.            | 0.7 |              |                 |     | 136.2814   |        | PT64-3 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8523    | -9.            | 0.3 |              |                 |     | 22.1946    |        | 402    |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2476    | 2.             | 0.5 |              |                 |     | 209.6695   |        | 3      |
| Opstillingspunkt: P4.2 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1) |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| PT64-1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1246     | 5.             | 1.0 |              |                 |     | 133.0804   |        | PT64-1 |
| PT64-2                                                              | ----- | 0.000      | 111.9209    | -4.            | 0.7 |              |                 |     | 134.0880   |        | PT64-2 |
| 402                                                                 | ----- | 0.498      | 102.8056    | 13.            | 0.4 |              |                 |     | 22.0769    |        | 402    |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 110.1292    | -4.            | 0.9 |              |                 |     | 149.7535   |        | 1      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 109.2467    | 0.             | 0.1 |              |                 |     | 209.5507   |        | 3      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8182    | 0.             | 0.3 |              |                 |     | 696.1735   |        | 2      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 102.3670    | 1.             | 0.7 |              |                 |     | 808.9868   |        | 4      |
| 318                                                                 | ----- | 0.000      | 99.6477     | 0.             | 0.0 |              |                 |     | 168.9748   |        | 318    |
| Opstillingspunkt: P1 (Instr.hd.: 0.000, rep.zen.: 3, rep.geo.: 1)   |       |            |             |                |     |              |                 |     |            |        |        |
| 1                                                                   | ----- | 0.000      | 102.1697    | -1.            | 0.5 |              |                 |     | 702.3720   |        | 1      |
| 2                                                                   | ----- | 0.000      | 113.7305    | 5.             | 1.1 |              |                 |     | 144.6241   |        | 2      |
| 3                                                                   | ----- | 0.000      | 102.8083    | -1.            | 0.5 |              |                 |     | 692.4223   |        | 3      |
| 4                                                                   | ----- | 0.000      | 104.6971    | -1.            | 0.5 |              |                 |     | 409.9111   |        | 4      |
| PT00.1                                                              | ----- | 0.000      | 98.1235     | -3.            | 0.5 |              |                 |     | 132.3591   |        | PT00.1 |
| PT00.2                                                              | ----- | 0.000      | 112.2846    | 9.             | 1.7 |              |                 |     | 134.3562   |        | PT00.2 |
| 102                                                                 | ----- | 0.498      | 102.6088    | -32.           | 1.0 |              |                 |     | 22.0053    |        | 102    |

Figure H.6. Uddrag af resultatfil for fast udjævning af koter til de nye fixpunkter

### H.1.5 Koordinatfil

Koordinaterne (x, y, H) til de nye fixpunkter samles i en fixpunktsfil (se Zipfil)

## H.2 Opsætning af Geomos

1. drej TS mod fixpunkter
  - P1 peger mod fix 2
  - TSP4 peges mod fix1
2. - koordinater indlæses i Geomos
  - TS skal orrienteres
3. Opsætning så data udlæses til GeomosNow
4. Lav fixpunktsgrupper
  - Sættes til at det laves en fri opstilling efter måling til fixpunkter
  - Placeringen at TS sættes til at midles over 6 timer
  - Sæter til at der skal være målinger til min 3 fixpunkter før den må medtage obserbationen.
5. Opsætning af målecyclus
  - 1. gang i timen



# Opsætning af Geomos



## I.0.1 30/4

Fixpunkter: - TS1 måler fix 1, 2, 3 og 4 (både plane koordinater og koter anvendes).  
- TS4 måler fix 1, 2, 3 og 4 (både plane koordinater og koter anvendes).

Detailpunkter:

- TS1 måler 118, 218 og PT00-1.
- TS4 måler 318, 418 og PT64-1.

Der sættes ingen grænser for residualernes størrelse med henblik på at fjerne outliers, da der end ikke kendes til størrelsesordene af residualerne.

## I.0.2 1/5

Efter 1 døgn's målinger undersøges data, og det bemærkes at afvigelserne (forskellen til den forrige måling) til fixpunkterne svinger ved hver anden måling, se figur I.1 der viser afvigelser for fixpunkterne. Dette skyldes at Geomos ikke udjævner eller midler.

Derfor vælges af splitte fixpunkterne op til hver TS, således Geomos ikke opfatter fixpunkterne til hver af opstillingerne som de samme. Dette gøres ved at navngive fixpunkterne 1001, 1002, 1003 og 1004 tilhørende TS1, mens fixpunktene observeret fra TS4 navngives 4001, 4002, 4003, 4004.

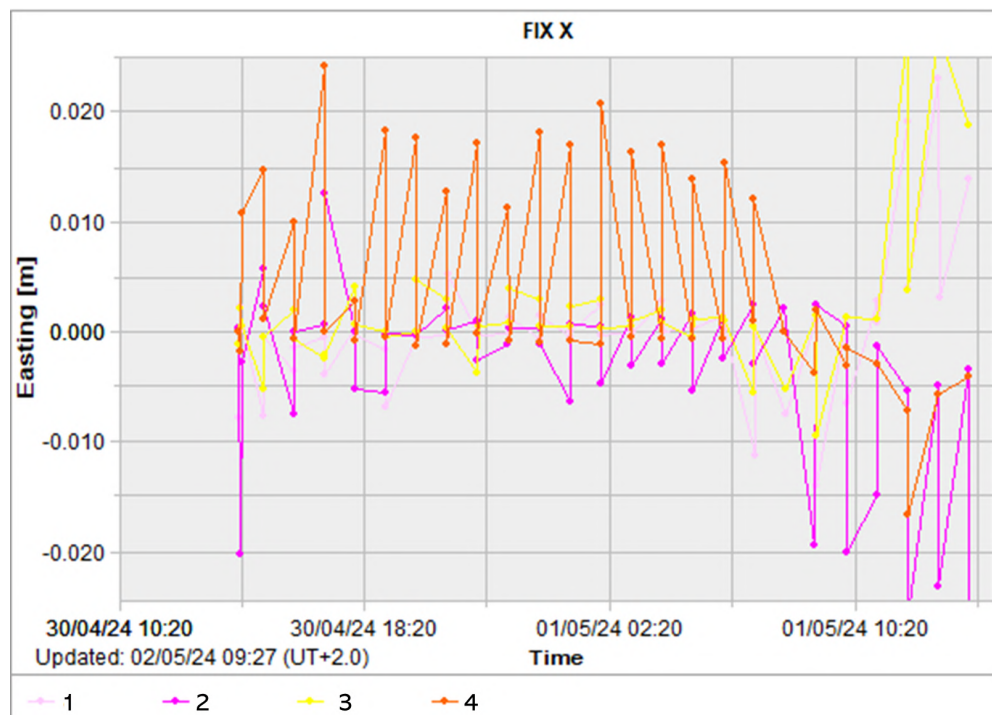
OBS. Denne ændring svækker monitoringsnetværket, fordi antallet af overbestemmelser i målingerne til fixpunkterne halvveres. Ud fra Testnet var en af de største udfordringer ved netværket netop at opdage grove fejl på fixpunktskoordinaterne, muligheden for dette svækkes væsentligt ved at opfatte fixpunkterne som separate for hver opstilling.

## I.0.3 2. maj

Det ser ud til at der er store afvigelser på fixpunkt 1 og 3 målt fra P1 og fixpunkt 2 og 4 målt fra P4, dvs når der måles på tværs af fjorden. For at teste denne hypotese beregnes spredningen på afvigelsen (displacement) efter formel I.1. Beregningerne fremgår af Eksternt bilag XX De beregnede spredninger på afvigelsen fremgår af tabel I.1.

$$\sigma_{i\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_{i\Delta}^2}{n}} \quad (\text{I.1})$$

[Jensen, 2020, s. 168]



**Figure I.1.** Graf over afvigelseerne for observationerne til fixpunkterne. Periode: 30/4-1/5 2024

|      | Longitudinal Displacement [m] | Transverse Displacement [m] | Height Displacement [m] |
|------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1001 | 0,0022                        | 0,0101                      | 0,0051                  |
| 1002 | 0,0010                        | 0,0024                      | 0,0024                  |
| 1003 | 0,0017                        | 0,0102                      | 0,0051                  |
| 1004 | 0,0014                        | 0,0061                      | 0,0030                  |
| 4001 | 0,0007                        | 0,0015                      | 0,0047                  |
| 4002 | 0,0015                        | 0,0095                      | 0,0064                  |
| 4003 | 0,0006                        | 0,0023                      | 0,0037                  |
| 4004 | 0,0032                        | 0,0167                      | 0,0101                  |

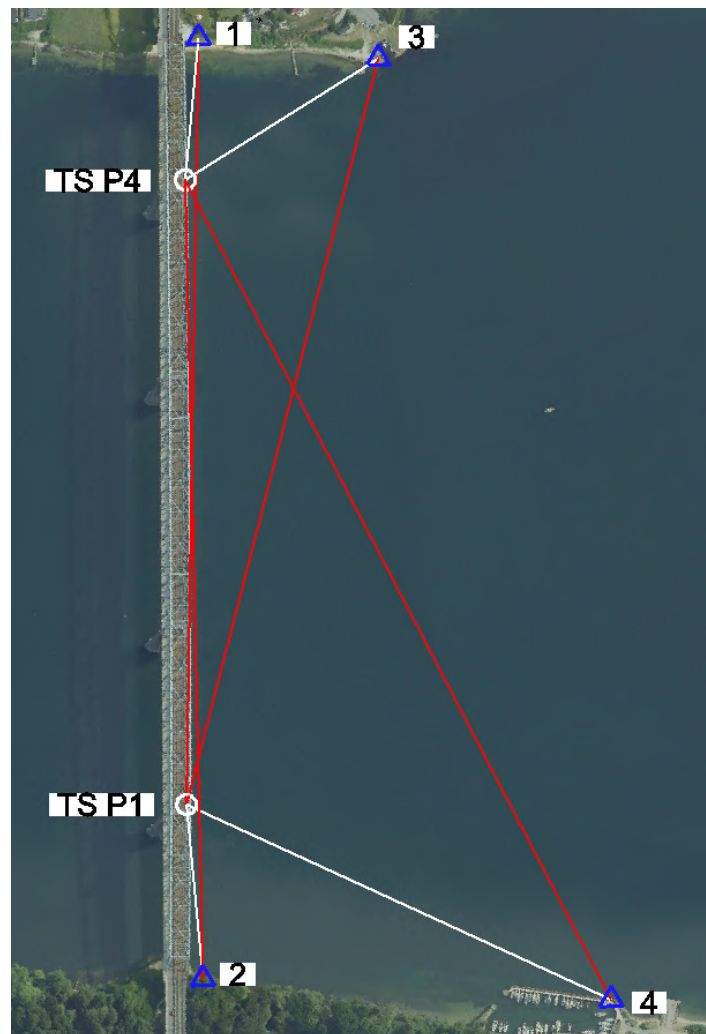
**Table I.1.** Spredningen på afvigelsen af fixpunkts observationer i perioden 1/5 kl.16 til 2/5 13 (22 målecykluser)

Særligt den transverse displacement er der store forskelle mellem de punkterne. Når fixpunkterne måles fra TS\_P1 er der en stredning på afvigelseerne på 10 mm på punkt 1001 og 1003, sammenlignet med 2 og 6 mm på hhv 1002 og 1004. Ligeledes er spredningen på afvigelsen 10 og 17 mm 4002 og 4004, mens spredningen på afvigelsen ligger på 2 mm for 4001 og 4003. Fælles for fixpunkterne med høje spredning på afvigelse, er at det er de lange sigter der gå på tværst af fjorden, disse er markeret med rød på figur I.2.

## I.1 7. maj

På baggrund af tabel I.1 vurderes det at koterne til 1002, 1004, 4001 og 4003 er for usikre.

Følgende ændringer foretages kl 16.50: I beregningerne i Geomos anvendes følgende som kotefixpunkter: 1002, 1004, 4001 og 4003



**Figure I.2.** Skitse over fixpunktsobservation med højest spredning på afvigelserne (markeret med rød)



# Analyse af sigma 0 J

---

I forbindelse med udjævninger til vurdering af om kravsspecifikationerne kan overholdes 8.3 opdages det at  $\sigma_0$  er lavere ved udjævning 4 måle serier end ved udjævning over 1 måleserie. Hvilket leder til en undren; Hvorfor bliver observationerne bedre sammenlignet med apprioriværdier af at der er flere serier?

Hypotese: kunne have noget at gøre med at appriorispredningerne for instrumentet er reduceret med  $\sqrt{3}$  da der anvendes middelmåling af 3 satser (beskrevet i afsnit 8.1.4)

**Test: hvad sker der hvis appriorispredningerne for instrumentet ændres tilbage til instrumentspecifikationerne?**

1 måle serie, instrument spec Appriori: 2.42

1 måle serie, reduceret appriori: 2.89

4 måle serie, instrument spec Appriori: 1.5 (når grove fejl er fjernet)

4 måle serie, reduceret appriori: 1.84 (når grove fejl er fjernet)

Konklusion: sigma\_0 bliver en smule lavere når der beregnes med Appriori værdier som instrumentspecifikationerne, men det er begrænset. Tilgængen blev det fundet en grov fejl. Der forsættes med at beregne med den reduceret appriorispredning.

**Test2: hvorfor falder Sigma0 når der udjævnes over flere måleserier?**

1 måle serie, reduceret appriori: 2.89

2 måleserier, reduceret appriori: 2.20

4 måle serie, reduceret appriori: 1.84

8 måleserier, reduceret appriori: 1.57

Ved Udjævning af 8 måleserier blev der fjernet en del grove fejl -> Hypoteses: Sigma0 bliver bedre fordi netværkets evne til at opdage grove fejl forbedres. Testes ved analysere hvor mange grove fejl der fjernes

At tabellen fremgår det at der ingen grove fejl er fundet, ved udjævning af 1 og 2 måleserier, mens der ved 4 måle serier er fundet 2 grovefejl, og ved udjævning over 8 måle serier 12. Dette bakker hypotesen op

|                          | $\sigma_0$ | Grovefejl, fjernet                                                                                                               | $\sigma_P$            | $\sigma_H$            |
|--------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Udjævning af 1 måleserie | 2.89       | 0                                                                                                                                | 4.85 mm<br>6/6 > 2 mm | 3.75 mm<br>6/6 > 2 mm |
| Udjævning af 2 måleserie | 2.20       | 0                                                                                                                                | 2.61 mm<br>6/6 > 2 mm | 2.02 mm<br>4/6 > 2 mm |
| Udjævning af 4 måleserie | 1.84       | 2, begge horisontalretningen fra P4 til fixpunkt 4.                                                                              | 1.57 mm<br>0/6 > 2mm  | 1.22 mm<br>0/0 > 2 mm |
| Udjævning af 8 måleserie | 1.57       | 12 grove fejl, der fordeler sig således:<br>P4->Fix 4 hz: 7<br>P4->Fix 4, afstand: 2<br>P4-> fix 2 hz:2<br>P1->fix 3, afstand: 1 | 0.9 mm<br>0/0 > 2 mm  | 0.75 mm<br>0/0 > 2mm  |

Table J.1. Caption

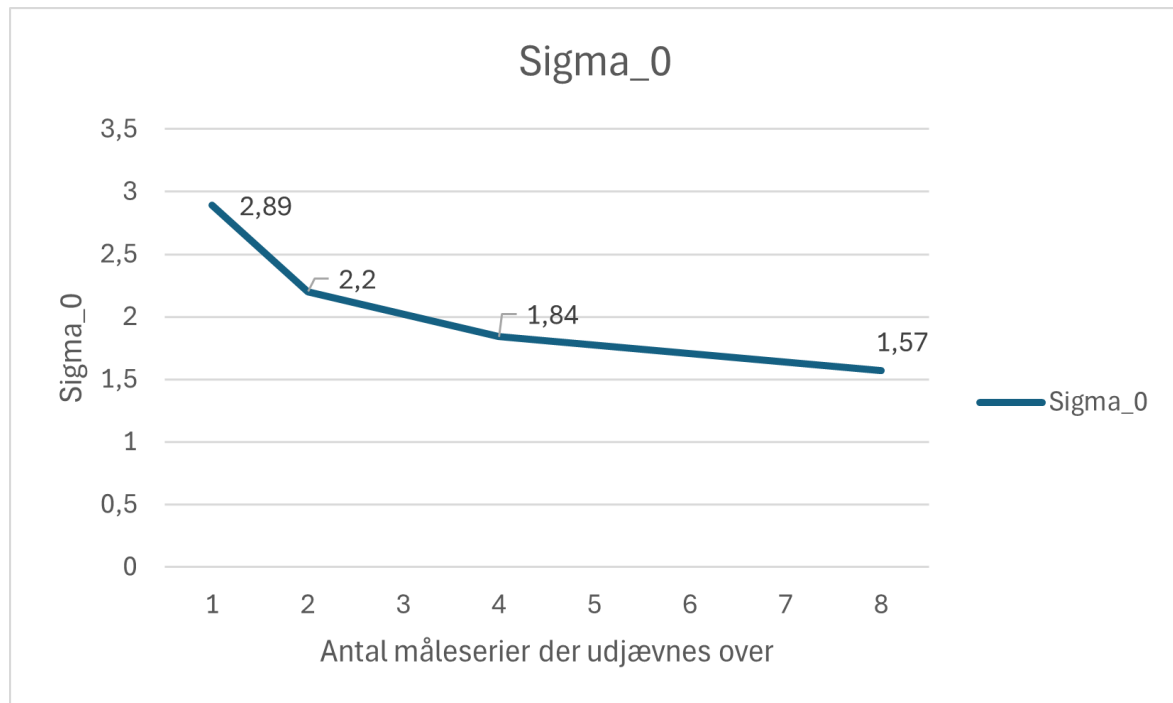


Figure J.1. Graf over ændringerne i sigma0

