

# Beredskap ved fare for solslyng

**Espen Kalvø**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Elias Kassa, BAT

Medveileder: Alf Helge Løhren, Jernbaneløst

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel:	Dato: 9.6.2015		
Beredskap ved fare for solsllyng	Antall sider (inkl. bilag): 131		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Espen Kalvø			
Faglærer/veileder: Elias Kassa, Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Alf Helge Løhren, Teknologi, Jernbaneverket			

Ekstrakt:

I perioden 2006-2014 var det syv avsporinger i Norge som følge av solsllyng. Avsporing er en svært alvorlig hendelse på jernbanen som kan forårsake personskader, samt store materielle skader i sporet og på det rullende materiellet. I tillegg kan solsllyng eller solsllyngtendenser forårsake driftsforstyrrelser på jernbanen.

Jernbaneverket har definert tre beredskapsnivå i dagens værberedskap for ras. Disse beredskapsnivåene består av en mobiliseringsfase, aksjonsfase og innføring av begrensninger. Et sentralt spørsmål i denne masteroppgaven har vært å vurdere om det kan innføres et lignende beredskapssystem for solsllyng. Hensikten er å hindre at faresituasjoner utvikler seg til ulykkessituasjoner og ivareta sikker togframføring.

En litteraturstudie og analyse har dannet grunnlag for å foreslå beredskap ved fare for solsllyng. Litteraturstudien fokuserer på metoder for å måle krefter og temperatur i sporet, og automatisk varsling av solsllyngfare. I analysen er det gjennomført en regresjonsanalyse for å finne temperaturmodeller som kan brukes til praktisk å forutsi skinnnettemperatur som kan utløse solsllyng. Skinnnettemperaturen ved tidligere solsllyng langs Trønderbanen har blitt kartlagt ved bruk av disse modellene, samt at solsllyng som førte til avsporinger har blitt nærmere undersøkt. I tillegg har en spørsmålsrunde til banesjefene i Jernbaneverket blitt gjennomført for å få konkrete innspill til beredskapsarbeidet.

Det har blitt foreslått et trinnvis beredskapssystem bestående av to beredskapsnivå; en aksjonsfase og innføring av begrensninger. Hensikten med aksjonsfasen er å redusere faren for solsllyng, mens innføring av begrensninger skal redusere risikoen for ulykker som følge av solsllyng. Terskelverdiene som er foreslått for de ulike beredskapsnivåene gjelder for Trønderbanen. Det har også blitt foreslått langsiktige tiltak som forebygger solsllyng, og det anbefales at disse inngår i banenes forebyggende vedlikeholdsarbeid.

Stikkord:

1. Jernbane
2. Solsllyng
3. Beredskap

(sign.)



## Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Institutt for bygg, anlegg og transport våren 2015 og er den avsluttende delen av sivilingeniørstudiet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Jernbaneverket og teller 30 studiepoeng, noe som tilsvarer en arbeidsmengde på omlag 800 timer.

Målet med oppgaven har vært å vurdere beredskapen ved fare for solslyng, og hvordan en mulig beredskapsplan kan utformes. Det har blitt foreslått et trinnvis beredskapssystem med tilhørende terskelverdier, samt langsiktige tiltak som forebygger solslyng.

Arbeidet er utført ved NTNU Gløshaugen og Jernbaneverket sitt kontor på Marienborg i Trondheim. En arbeidsplass på Marienborg gjorde det enklere for meg å ta kontakt med veileder og andre ressurspersoner i Jernbaneverket, og har uten tvil gjort oppgaven min bedre.

Jeg vil gjerne benytte muligheten til å takke veilederne mine ved NTNU og Jernbaneverket, professor Elias Kassa og sjefingeniør Alf Helge Løhren, for god oppfølging og gode råd i arbeidet med denne masteroppgaven. Jeg vil også takke alle i Jernbaneverket som har bidratt med nyttige innspill og innhenting av data.

Til slutt vil jeg takke Sophie Bowe for støtte i skriveprosessen.



---

(sign.)

Espen Kalvø

Trondheim, 9. juni 2015



## Sammendrag

Hensikten med denne masteroppgaven er å bidra til å øke beredskapen ved fare for solsllyng. Økt beredskap vil sørge for at faresituasjoner ikke utvikler seg til ulykkessituasjoner og at sikker togframføring blir ivaretatt. Beredskap er et viktig element i sikkerhetsstyringen på jernbanen og skal gjøre en driftsorganisasjon i stand til å håndtere uønskede hendelser som kan oppstå, samtidig som trafikken i størst mulig grad skal gå som normalt.

I perioden 2006-2014 var det syv avsporinger i Norge som følge av solsllyng. Fire av disse avsporingene skjedde på Dovrebanen. Avsporing er en alvorlig hendelse på jernbanen som kan forårsake personskader, samt materielle skader på spor og rullende materiell. Solsllyng fører også til driftsforstyrrelser. I 2014 førte 43 % av alle registrerte solsllyng eller solsllyngtendenser til driftsforstyrrelser.

I dagens værberedskap for ras har Jernbaneverket definert tre beredskapsnivå. Disse består av en mobiliseringsfase, en aksjonsfase og innføring av begrensninger. I mobiliseringsfasen skal informasjon innhentes og beredskapen mobiliseres. I aksjonsfasen gjennomføres hastighetsnedsettelse og ekstravisitasjoner som kan forårsake forsinkelser. Ved innføring av begrensninger stenges banen til faren er blitt redusert. Et sentralt spørsmål i denne masteroppgaven har vært å vurdere om et lignende beredskapssystem kan innføres ved fare for solsllyng.

Beredskapen for ras bygger på terskelverdier for nedbør og gir en god indikasjon på faren for ras, flom, erosjonsskader og kollaps i vannmettede fyllinger. I denne masteroppgaven tar terskelverdiene utgangspunkt i lufttemperaturer. Fare for solsllyng er vanskeligere å differensiere på samme måte som fare for ras. Det er i større grad «enten eller» ved solsllyngfare. Det er derfor valgt å bruke to beredskapsnivå: en aksjonsfase (oransje beredskap) og innføring av begrensninger (rød beredskap). Hensikten med oransje beredskap er å redusere faren for solsllyng, mens rød beredskap skal redusere risikoen for ulykker som følge av solsllyng. Oransje beredskap vil bestå av hastighetsnedsettelse, ekstravisitasjoner og kapping av sporet ved behov. Rød beredskap karakteriseres som stengning av banen til faren er redusert. Langsiktige tiltak som forebygger solsllyng er også foreslått, og det anbefales at disse inngår i banenes forebyggende vedlikehold.

En analyse og en litteraturstudie har dannet grunnlaget for å vurdere et forslag til trinnvis beredskap ved solsløyngfare. I analysen har tidligere solsløyng blitt kartlagt for å finne hvilke baner som sliter mest med solsløyngproblematikken, avsporinger som følge av solsløyng har blitt undersøkt nærmere og en regresjonsanalyse for å finne en temperaturmodell for skinnnetemperaturen har blitt gjennomført. Det er funnet to temperaturmodeller for strekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer på Trønderbanen. Ved bruk av disse har skinnnetemperaturen ved tidligere solsløyng og solsløyngtendenser langs Trønderbanen blitt estimert. I tillegg har en spørsmålsrunde til banesjefene blitt gjennomført for å få innspill til beredskap ved solsløyngfare. I litteraturstudien har ulike metoder for å måle krefter i sporet blitt undersøkt, samt om det finnes noen sikkerhetskriterier mot solsløyng som kan brukes i bestemmelsen av beredskap.

Dovrebanen (spesielt Eidsvoll–Fåberg) og Ofotbanen har over en tiårsperiode slitt mest med solsløyngproblematikken. Dovrebanen har solsløyngfrekvenser på 14,9 solsløyng/år og 3,07 solsløyng/10 km. Strekningene Eidsvoll-Hamar og Hamar-Fåberg skiller seg spesielt ut med frekvenser på henholdsvis 4,1 solsløyng/år og 7,07 solsløyng/10 km, og 6,1 solsløyng/år og 9,79 solsløyng/10 km. Ofotbanen har solsløyngfrekvenser på 2,2 solsløyng/år og 5,12 solsløyng/10 km.

I følge Statens havarikommisjon for transport (SHT) sine ulykkesrapporter er feil nøytraltemperatur i kombinasjon med høy skinnnetemperatur og nedsatt sidestabilitet i sporet en gjentagende årsak til avsporinger som følge av solsløyng. Temperaturmodellene med et 90 % prediksjonsintervall estimerer i snitt en skinnnetemperatur ved tidligere solsløyng og solsløyngtendens langs Støren-Trondheim på  $31 \pm 8,6$  °C, mens for Hell-Steinkjer er skinnnetemperaturen i snitt estimert til  $31 \pm 6,2$  °C.

Det anbefales spesielt at Dovrebanen og Ofotbanen tar i bruk et beredskapssystem for å redusere faren for solsløyng. For at beredskap ved solsløyngfare skal inkluderes i dagens værberedskap bør det brukes et større datagrunnlag som er representativt for hele landet. Terskelverdiene i beredskapsplanen som er foreslått i denne oppgaven gjelder i første omgang for Trønderbanen, og de må testes ut før det eventuelt kan inkluderes i dagens værberedskap. En multippel regresjonsanalyse anbefales og gjennomføres for å finne ut hvordan andre værforhold påvirker temperaturmodellene. Dette kan eksempelvis være solinnstråling og nedbør. I tillegg må registreringene i BaneData bli bedre med større fokus på feilårsak. På den måten kan BaneData bli en bedre datakilde i sikkerhetsarbeidet.



## Summary

This master thesis is entitled “Preparedness at risk of sun kink”. Increased preparedness will ensure that hazards do not develop into accidents and that safe train operation is ensured. Preparedness is an important element in safety management on the railway, and makes a line organization able to deal with unwanted incidents that may occur. At the same time, normal train operations should go on as usual.

In the period 2006-2014, there were seven derailments in Norway caused by sun kinks. Four of these derailments occurred on Dovrebanen. Derailment is a very serious incident on the railway that may cause personal injury, damage to the tracks and rolling stock. Sun kinks also cause service disruptions. In 2014, 43% of all registered sun kinks in Norway led to service disruptions.

Jernbaneverket – The Norwegian National Rail Administration – has defined three levels of preparedness at risk of landslides. These consist of a mobilization phase, reaction phase and the introduction of restrictions. In the mobilization phase, information is gathered and preparedness mobilized. In the reaction phase, speed reductions and additional visitations are implemented. By introducing restrictions, the railway line closes until the risk of landslides is reduced. A central question in this thesis has been to assess whether a similar preparedness system can be introduced at risk of sun kinks.

Preparedness for landslides is based on threshold values for rainfall. This gives a good measure of the risk of landslides, floods, erosion and collapse of water-saturated embankments. The proposed preparedness plan in this thesis takes threshold values based on air temperature. Risk of sun kinks is more difficult to differentiate in the same way as the risk of landslides, and is more “either or” than the risk of landslides. Two levels of preparedness has therefore been chosen: a reaction phase (orange preparedness) and introduction of restrictions (red preparedness). The purpose of orange preparedness is to reduce the risk of sun kinks, while red emergency reduces the risk of accidents due to sun kinks. Orange preparedness will consist of speed restrictions, additional visitation and cutting the rails when needed. Red preparedness closes the line until the risk is reduced. Long-term measures to prevent sun kinks has also be proposed, and it is recommended that these measures are included in the railway's preventive maintenance.

An analysis and a literature study have formed the basis for assessing the stepwise preparedness plan. In the analysis previously sun kinks have been mapped out to identify which lines are struggling most with sun kinks, derailments due to sun kinks have been evaluated and a regression analysis to find a temperature model for the rail temperature has been completed. Two temperature models for the railway stretches Støren-Trondheim and Hell-Steinkjer have been found. Rail temperatures in prior sun kinks along Trønderbanen have been estimated using these temperature models. Furthermore, a round of questions to the line managers in Norway was conducted to obtain input for a possible preparedness plan. In the literature study different methods to measure forces in the rails was investigated, and if any safety criteria against sun kinks that can be used in the provision of preparedness exist.

Dovrebanen (especially Eidsvoll-Fåberg) and Ofotbanen have experienced most sun kinks over the last decade. Dovrebanen has sun kinks frequencies of 14,9 sun kinks/year and 3,07 sun kinks/10 km. The railway stretches Eidsvoll-Hamar and Hamar-Fåberg on Dovrebanen have particularly high frequencies of 4,1 sun kinks/year and 7,07 sun kinks/10 km, and 6,1 sun kinks/year and 9,79 sun kinks/10 km. Ofotbanen has sun kink frequencies of 2,2 sun kinks/year and 5,12 sun kinks/10 km.

According to Statens havarikommisjon for transport's (SHT) accident reports, incorrect neutral temperature in combination with high rail temperature and decreased lateral track stability is the main reason why sun kinks that caused derailments happened. The temperature models with a 90% prediction interval estimate an average rail temperature on  $31 \pm 8.6$  °C in prior sun kinks along Støren-Trondheim. In Hell-Steinkjer the average rail temperature is estimated to  $31 \pm 6.2$  °C.

Especially Dovrebanen and Ofotbanen should use a preparedness system to reduce the risk of sun kinks. Before preparedness at risk of sun kinks can be included in today's weather preparedness plan, a larger data selection that is representative for the whole country should be used. The preparedness plan that is proposed in this thesis is only representative for Trønderbanen, the line between Støren-Steinkjer, and it needs testing before final implementation. To investigate how different weather conditions affect the temperature models from the regression analysis, a multiple regression analysis should be performed. The registrations in BaneData need to have better quality with more focus on failure cause. This will make BaneData a better source of data for safety management.

# Innhold

Definisjoner .....	xv
Nomenklatur .....	xvii
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	2
1.2 Mål og hensikt med oppgaven .....	5
1.3 Avgrensning .....	6
1.3.1 Hva ligger i begrepet «beredskap ved fare for solsllyng»? .....	6
1.3.2 Avgrensning av oppgaven .....	6
1.3.3 Figurer og grafer .....	6
1.3.4 Forskningsspørsmål .....	7
1.4 Masteroppgavens oppbygning .....	7
2 Teoretisk grunnlag .....	9
2.1 Krefter i helsveist spor .....	9
2.1.1 Aksielle krefter i et helsveist spor som følge av temperaturendringer .....	10
2.2 Faktorer som påvirker solsllyng .....	12
2.2.1 Kritisk knekktemperatur .....	12
2.2.2 Nøytraltemperatur .....	19
2.2.3 Sporets stabilitet .....	20
2.3 Regresjonsanalyse .....	23
2.4 Beredskap .....	26
3 Metode .....	29
3.1 Litteraturstudie .....	29
3.2 Datainnhenting .....	29
3.2.1 BaneData Innsyn .....	29
3.2.2 Meteorologiske data .....	29
3.2.3 Spørsmålsrunde .....	30
3.3 Analyse .....	31
3.3.1 Kartlegging av tidligere solsllyng på landsbasis .....	31
3.3.2 Regresjonsanalyse .....	31
3.3.3 Kartlegging av tidligere solsllyng langs Trønderbanen .....	32
3.3.4 Spørsmålsrunde .....	32
3.3.5 Forslag til beredskap .....	32
4 Litteraturstudie .....	33
4.1 Metoder for å måle skinne- og nøytraltemperatur .....	34
4.1.1 Skinetemperatur .....	34
4.1.2 Nøytraltemperatur .....	35
4.1.3 Aktuelt for Jernbaneverket? .....	37
4.2 Sikkerhetskriterier mot utknekking .....	39
5 Resultater .....	43
5.1 Kartlegging av tidligere solsllyng på landsbasis .....	43
5.1.1 Solsllyngfrekvenser .....	44
5.1.2 Månedsvis fordeling av solsllyng/-tendens .....	50

5.1.3 Avsporinger som følge av solsløyg.....	51
5.2 Regresjonsanalyse .....	54
5.2.1 Analyseområde .....	54
5.2.2 Data fra Skatval detektorstasjon .....	57
5.2.3 Data fra Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon.....	59
5.3 Kartlegging av tidligere solsløyg langs Trønderbanen.....	61
5.4 Resultater fra spørsmålsrunden .....	66
5.4.1 Spørsmål .....	66
5.4.2 Svar .....	66
6 Diskusjon.....	69
6.1 Drøfting av resultater.....	70
6.1.1 Resultater fra litteraturstudiet.....	70
6.1.2 Resultater fra analysen .....	71
6.2 Drøfting av beredskap ved fare for solsløyg .....	75
6.2.1 Bruksområde .....	80
6.3 Vurdering av kildebruk.....	81
7 Forslag til beredskap ved fare for solsløyg .....	83
7.1 Tiltaksplan .....	83
7.1.1 Roller og ansvar .....	83
7.1.2 Trinnvis beredskap ved fare for solsløyg.....	84
7.1.3 Langsiktige tiltak for å redusere faren for solsløyg .....	87
8 Konklusjon .....	91
9 Videre anbefalinger .....	93
10 Kilder.....	95
11 Vedlegg .....	99
11.1 Oppgavetekst .....	99
11.2 Spørsmålsrunde .....	102
11.2.1 Epost sendt til banesjefene i Jernbaneverket .....	102
11.2.2. Mottakerliste .....	103
11.3 Målevognsbilder av Skatval og Høyset detektorstasjon.....	104
11.4 Andre relevante målevognsbilder .....	105
11.5 Diagrammer fra regresjonsanalysen .....	107
11.5.1 Skatval detektorstasjon .....	107
11.5.2 Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon.....	110
11.6 RTMU produktspesifikasjoner .....	112

## Figurer

Figur 1: Lasket skjøt (a); Helsveist spor (b). Foto: Espen Kalvø.....	1
Figur 2: Andel solslyngfeil med driftsforstyrrelser i 2013 (a); Banevis driftsforstyrrelser (b)..	3
Figur 3: Andel solslyngfeil med driftsforstyrrelser i 2014 (a); Banevis driftsforstyrrelser (b)..	3
Figur 4: Antall solslyng eller solslyngtendens registrert i BaneData i 2013 og 2014.....	4
Figur 5: Skisse av beredskapssystemet for nedbør og snøsmelting (Karlsen 2012) .....	5
Figur 6: Skisse av pustepartiet .....	11
Figur 7: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike w og radier .....	15
Figur 8: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike f og radier .....	15
Figur 9: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike skinneprofiler og radier .....	16
Figur 10: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike ballastkonsolideringer .....	16
Figur 11: Luft- og skinnnettemperatur ved Winterbourne (a) og Leominster (b).....	18
Figur 12: Sidemotstand i konsolidert (a) og pakket spor (b) (Kish and Samavedam 2013) ....	21
Figur 13: Forklart og tilfeldig avvik (Blakstad 1995) .....	23
Figur 14: Beredskapsprosessen .....	26
Figur 15: Ut plassering av temperaturmålere på Nordlandsbanen .....	38
Figur 16: Temperaturøkning over NT og utknekking(Kish and Samavedam 2013) .....	39
Figur 17: Antall solslyngfeil registrert i BaneData mellom 2004-2014 fordelt på baner .....	43
Figur 18: Solslyngfrekvens fordelt på baner .....	44
Figur 19: Månedsvise fordeling av solslyng/-tendens fordel på baner .....	50
Figur 20: Avsporing på Dovrebanen 26.7.2006 (bilde fra nrk.no) .....	51
Figur 21: Avsporing på Dovrebanen 20.5.2010 (bilder fra GD.no).....	51
Figur 22: Skatval detektorstasjon .....	54
Figur 23: Horisontalgeometri Hell-Steinkjer .....	55
Figur 24: Horisontalgeometri Støren-Trondheim .....	56
Figur 25: Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon .....	56
Figur 26: Skinnnettemperaturer Skatval 2012-2014 .....	58
Figur 27: Regresjon fra Skatval, 2012-2014 .....	58
Figur 28: Skinnnettemperaturer Høyset, 2012-2013 .....	60
Figur 29: Regresjon Høyset/Horg, 2012-2013 .....	60
Figur 30: Tidligere solslyng/-tendens langs Trønderbanen.....	61
Figur 31: Tiltak som gjøres i dag for å forebygge solslyng .....	67
Figur 32: Langsiktige tiltak for å redusere faren for solslyng.....	67
Figur 33: Innspill til beredskap ved fare for solslyng .....	68
Figur 34: Reliabilitet og validitet (Samset 2014) .....	69
Figur 35: Utklipp fra BaneData Innsyn .....	71
Figur 36: Sammenligning av temperaturmodellene .....	77
Figur 37: Differanse i predikert skinnnettemperatur mellom modellene .....	77
Figur 38: Trinnvis beredskap ved fare for solslyng .....	84
Figur 39: Skatval detektorstasjon ved km 43.340 på Nordlandsbanen .....	104
Figur 40: Høyset detektorstasjon ved km 518.46 på Dovrebanen .....	104
Figur 41: Km 95, Hell-Steinkjer .....	105
Figur 42: Km 119.416, Hell-Steinkjer .....	105
Figur 43: Km 522.8 .....	106
Figur 44: Km 539.125 .....	106



## Tabeller

Tabell 1: Ulike skinneprofiler for ulike overbygningsskinner.....	13
Tabell 2: Parametere som varierer .....	13
Tabell 3: Ulike sideforskyvningsmotstander (Ahmad, Mandal et al. 2013) .....	14
Tabell 4: Ønsket plassering av termometer på Nordlandsbanen .....	38
Tabell 5: Sikkerhetsmargin mot utknekkning (BSM). Fra (Kish and Samavedam 2013) .....	40
Tabell 6: Tiltak ved høye temperaturer i Storbritannia (Chapman, Thornes et al. 2008) .....	41
Tabell 7: Solslyngfrekvenser Ofofbanen 2004-2014 .....	45
Tabell 8: Solslyngfrekvenser Nordlandsbanen 2004-2014 .....	45
Tabell 9: Solslyngfrekvenser Dovrebanen 2004-2014.....	45
Tabell 10: Solslyngfrekvenser Rørosbanen 2004-2014 .....	46
Tabell 11: Solslyngfrekvenser Bergensbanen 2004-2014.....	46
Tabell 12: Solslyngfrekvenser Sørlandsbanen 2004-2014.....	46
Tabell 13: Solslyngfrekvenser Vestfoldbanen 2004-2014 .....	47
Tabell 14: Solslyngfrekvenser Østfoldbanen vestre linje 2004-2014 .....	47
Tabell 15: Solslyngfrekvenser Gardermobanen 2004-2014.....	47
Tabell 16: Solslyngfrekvenser Hovedbanen 2004-2014 .....	47
Tabell 17: Månedsvis fordeling av solsleng og solslengens i perioden 2004-2014.....	50
Tabell 18: Solsleng som førte til avsporinger i perioden 2006-2014.....	53
Tabell 19: Resultater fra regresjonsanalyse, Skatval detektorstasjon .....	57
Tabell 20: Resultater fra regresjonsanalyse, Høyset/Horg.....	59
Tabell 21: Tidligere solsleng med estimert skinnetemperatur, Hell-Steinkjer .....	62
Tabell 22: Tidligere solsleng med fokus på sporet, Hell-Steinkjer.....	62
Tabell 23: Tidligere solsleng med estimert skinnetemperatur, Støren-Trondheim.....	64
Tabell 24: Tidligere solsleng med fokus på sporet, Støren-Trondheim.....	64
Tabell 25: Terskelverdier for beredskap ved solslengfare .....	78
Tabell 26: Roller og ansvar .....	83
Tabell 27: Langsiktige tiltak for å redusere faren for solsleng .....	87
Tabell 28: Mottakerliste for spørsmålsrunden.....	103





## Definisjoner

Baksing	Lateral bevegelse av sporet
BaneData	Jernbaneverkets vedlikeholdssystem og infrastrukturdatabase
Banesjef	Eier av infrastruktur. Leder for en banestrekning og dens organisasjon
Nordlandsbanen	Jernbanestrekningen mellom Trondheim og Bodø
Nøytraltemperatur	Den skinnnettemperatur der skinnene er spenningsfrie
Nøytralisering	Prosedyre for å gi skinnene den lengde som tilsvarer spenningsfrihet ved nøytraltemperatur
Område Midt	Området fra Fåberg på Dovrebanen til Steinkjer på Nordlandsbanen. Inkluderer banestrekningene Røros- og Solørbanen, Dovre- og Raumabanen og Trønderbanen.
Pilhøyde	Den horisontale, vinkelrette avstanden mellom skinnens kjørekant og midtpunktet til en 10 m korde hvis ender følger skinnens kjørekant. Måles 14 mm under skinnetopp
Pilhøydefeil/baksefeil	Sideforskyvningsfeil av sporet
Pusteparti	Endene av et helsveist spor mot skjøtene, parti der skinnene kan bevege seg som følge av temperaturinduserte last i skinnene
Solslyng	Pilhøydefeil i horisontalplanet større enn 25 mm, målt over en 10 m basis
Solslyngtendens/tilløp	Pilhøydefeil i horisontalplanet under 25 mm, målt over en 10 m basis
Teknisk regelverk	Jernbaneverkets regelverk for prosjektering, bygging og vedlikehold
Terskelverdi	Den minimumsstyrke en påvirkning må ha for å gi en bestemt virkning
Trønderbanen	Jernbanestrekningen mellom Støren og Steinkjer
VUL/GVUL	Varig utfesting av linjen/Geodetisk varig utfesting av linjen



## Nomenklatur

$A$	Tverrsnitt av skinneprofilet
$b$	Lengde av pusteparti
$E$	Elastisitetsmodul til stål
$f$	Baksefeil
$I_y$	Skinneprofilens treghetsmoment
$J$	Sporets ekvivalente treghetsmoment
$k_1, k_2$	Korreksjonsfaktorer for konsolideringsgrad og løftebølge
$L$	Lengde av et skinneavsnitt
$N$	Aksialkraft som følge av temperaturendring
$NT$	Nøytraltemperatur
$R$	Kurveradius
$r_0$	Ballastmotstand
SHT	Statens havarikommisjon for transport
$w$	Sideforskyvningsmotstand
$\alpha$	Utvidelseskoeffisient til stål
$\Delta L$	Endring av skinnelengde som følge av temperaturendring
$\Delta R$	Endring i kurveradius som følge av baksing av sporet
$\Delta T$	Endring i temperatur over nøytraltemperaturen
$\Delta T_{all}$	Tillatt temperaturøkning over nøytraltemperaturen
$\Delta T_{baks}$	Endring i nøytraltemperatur som følge av ensidig baks av sporet
$\Delta T_{Bmax}$	Maksimal temperaturøkning over nøytraltemperaturen
$\Delta T_{Bmin}$	Minimal temperaturøkning over nøytraltemperatur. Energibarriere tilstede før utknekking kan skje.
$\Delta T_{cr}$	Kritisk temperaturøkning over nøytraltemperaturen
$\sigma$	Skinnespenning som følge av temperaturendring
$\hat{T}_{skinne}$	Predikert skinnetemperatur



# 1 Innledning

Temaet for masteroppgaven er beredskap ved fare for solslyng. Ulike faktorer som påvirker faren for solslyng skal belyses og muligheter for overvåkning av problemområder skal undersøkes. Målet er å foreslå en beredskapsplan der det avklares hvordan man skal agere ved fare for solslyng, og som kan bidra til at faren for solslyng reduseres slik at en faresituasjon ikke utvikler seg til en ulykkessituasjon.

Et tradisjonelt lasket spor består sporet av korte partier som er sammensatt av skjøter. Med godt vedlikeholdte skjøter elimineres faren for solslyng. Lasket spor har imidlertid store ulemper som stort vedlikeholdsbehov og dynamiske laster som skaper deformasjoner i overbygningen, slitasje av skinnehodet, skinnerprekker, skader på overbygningenskomponenter og nedsatt kjørekomfort. Lasket spor har generelt betydelige negative effekter på levetiden til sporet (Esveld 2001). Helsveist spor ble mer utbredt etter andre verdenskrig da man begynte å få en bedre forståelse for krefter i sporet, bedre sveisemetoder ble utviklet og sidestabilitet i sporet ble bedre (Kerr 2003). Helsveist spor gir mindre vedlikehold, kan stort sett vedlikeholdes av maskiner, er en stivere og mer stabil konstruksjon og gir mindre slitasje på både spor og materiell sammen med bedre komfort for passasjerene (Sørli 2008).



(a)



(b)

*Figur 1: Lasket skjøt (a); Helsveist spor (b). Foto: Espen Kalvø*

Solslyng utgjør en stor avsporingfare som kan forårsake både personskader og store materielle skader. Sikkerhetsstyring er svært viktig på jernbanen og avsporing utgjør en av Jernbaneverkets topphendelser som brukes i fareidentifisering og risikovurderinger. Jernbaneverket jobber aktivt med sikkerhetsstyring der hovedmålet er å ivareta sikker togframføring og forebygge uønskede hendelser. I følge Sikkerheshåndboken skal forebyggende og systematisk sikkerhetsarbeid bidra til å redusere risiko for både storulykker og individuelle ulykker med skade på egne ansatte, reisende eller andre som oppholder seg i nærheten av jernbanen (Tveraaen 2013).

## 1.1 Bakgrunn

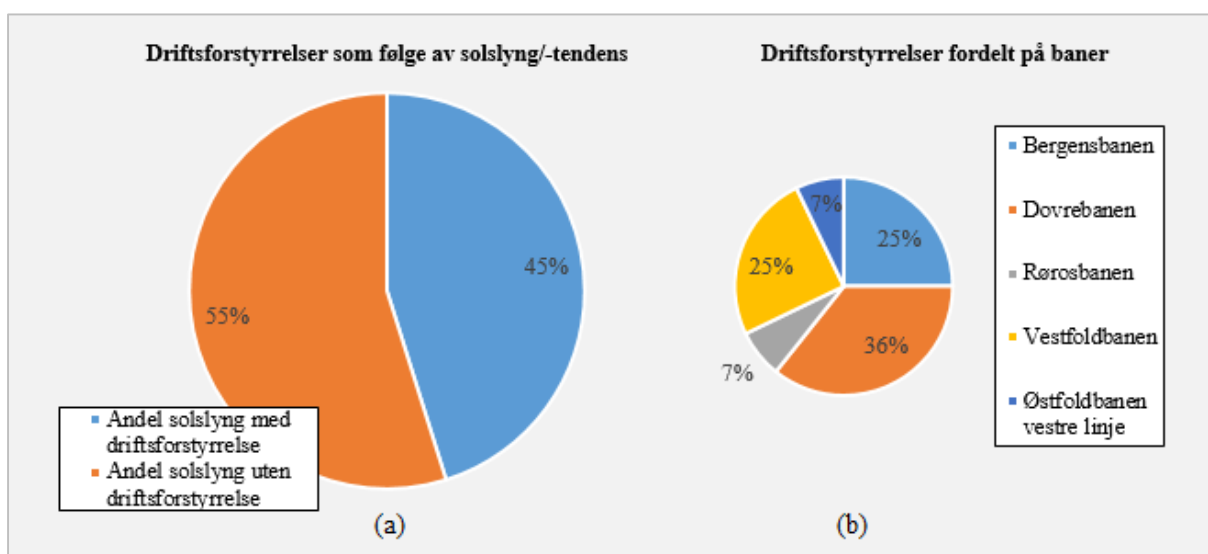
Solslyng er et problem som kan forekomme på helsveiste spor i sommerhalvåret på det norske jernbanenettet. Dette er et sikkerhetsproblem som kan skyldes både slitasje og nedsatt funksjon i enkelte overbygningskomponenter og vedlikeholdsoperasjoner som har negativ innvirkning på sidestabiliteten i sporet. Ved høye skinnnetemperaturer dannes det store trykkrefter i skinnene som kan føre til utknekking dersom den laterale sidestabiliteten ikke er god nok i sporet. Sikkerhet mot solslyng er avhengig av flere faktorer, men hovedsakelig vil det være sporets motstand mot sideveis forskyvning og korrekt nøytraltemperatur.

Solslyng innebærer høy avsporingrisiko. Det er imidlertid vanskelig å forutse hvor solslyng kan oppstå, og solslyng oppstår ofte når toget passerer. Mellom 2006-2014 skjedde det syv avsporinger i Norge som følge av solslyng (Løhren 2015). Avsporing er en svært alvorlig hendelse på jernbanen som kan forårsake store materielle skader i sporet og på det rullende materiell, forsinkelser i trafikken og alvorlige personskader eller dødsfall. Eksempelvis førte en avsporing som følge av solslyng i ca. 70 km/t ved Trofors stasjon på Nordlandsbanen 30. mai 2014 til skader på sporet til en kostnad på ca. 10 millioner kroner og skader til ca. 360 000 kroner på det rullende materiellet (SHT 2015).

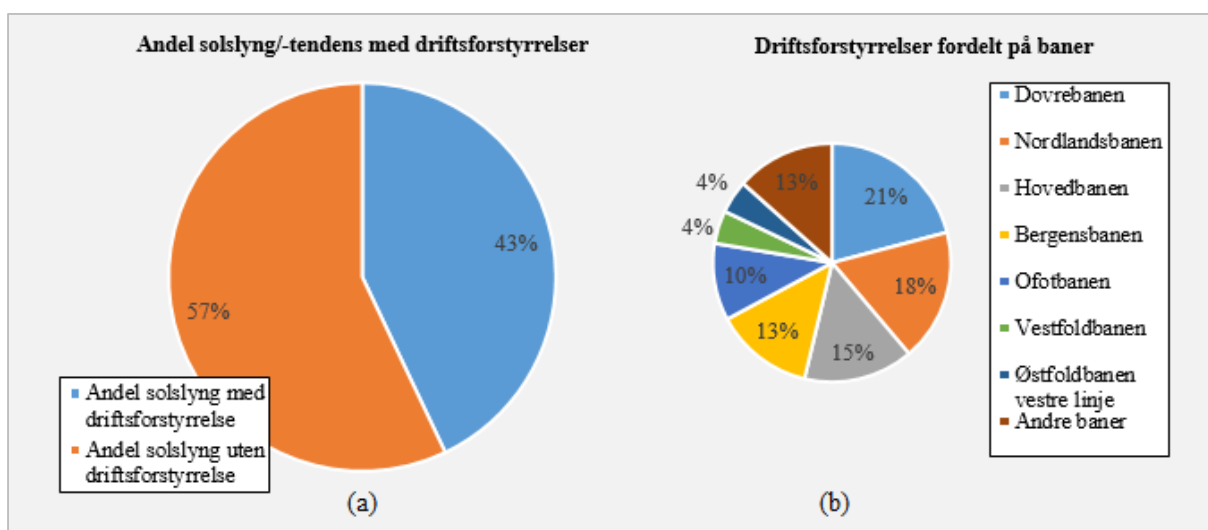
Sommeren 2014 ble Dovrebanen og Nordlandsbanen stengt flere ganger og kjørehastigheten måtte settes ned på grunn av solslyng og solslyngtendenser. Andre baner måtte også stenge for trafikk og/eller redusere kjørehastigheten som følge av solslyng eller tendenser til solslyng. I 2014 ble det registrert hele 156 tilfeller i BaneData av solslyng eller solslyngtendenser over hele jernbanenettet, i motsetning til 62 tilfeller i 2013. Andel solslyng

som forårsaket driftsforstyrrelse i 2013 var 45 %, mens i 2014 førte 43 % av registrerte solslyngfeil til driftsforstyrrelser.

Figur 2 og Figur 3 nedenfor viser at i 2013 var det spesielt Bergensbanen, Vestfoldbanen og Dovrebanen som hadde driftsforstyrrelser som følge av solslyng eller solslyngtendens, mens i 2014 var det spesielt Dovrebanen, Nordlandsbanen, Hovedbanen og Bergensbanen som hadde driftsforstyrrelser.

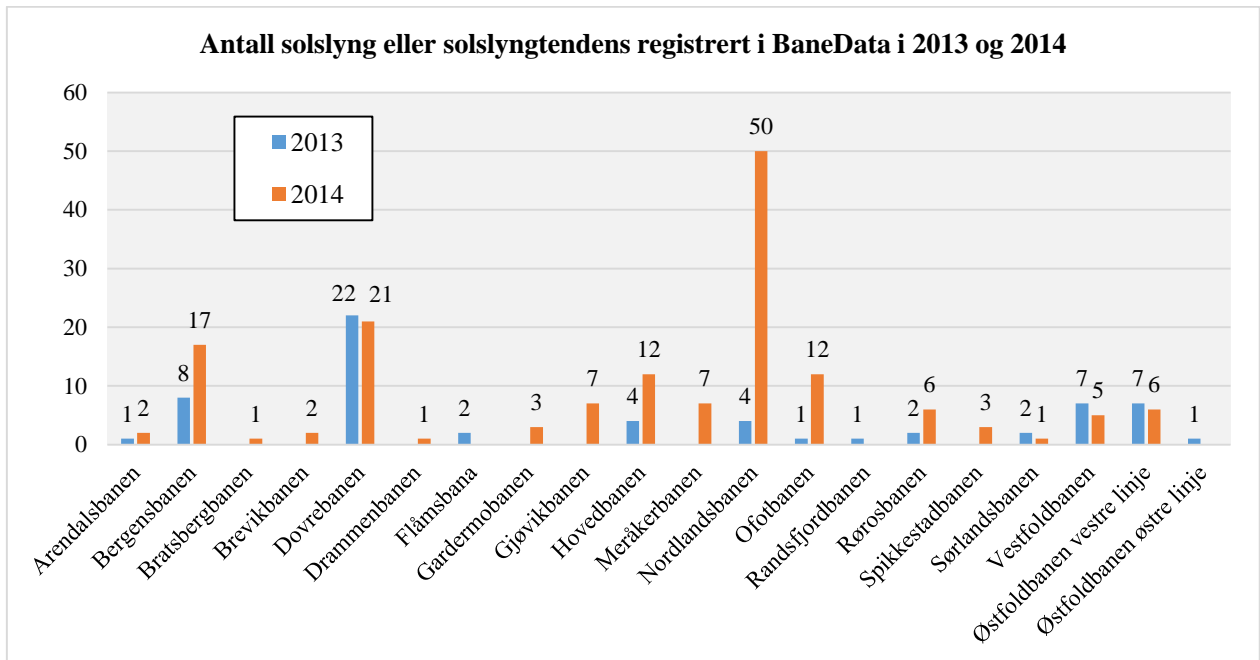


Figur 2: Andel solslyngfeil med driftsforstyrrelser i 2013 (a); Banevis driftsforstyrrelser (b)



Figur 3: Andel solslyngfeil med driftsforstyrrelser i 2014 (a); Banevis driftsforstyrrelser (b)

Dagens praksis for å avdekke solslyng er å øke antall visitasjoner og beredskapen bygger i stor grad på lokalkunnskap. Når solslyng eller tendens til solslyng inntreffer, så betyr det at man ikke har kontroll med kreftene i sporet. Akutte tiltak som gjøres ved solslyng i dag er redusert hastighet eller stengning av banen.



*Figur 4: Antall solslyng eller solslyngtendens registrert i BaneData i 2013 og 2014*

Figur 4 viser solslyng eller tilløp til solslyng fra 2013 og 2014. Spesielt Nordlandsbanen, Dovrebanen og Bergensbanen skiller seg ut med flere feilregistreringer enn de andre banene.



## 1.2 Mål og hensikt med oppgaven

Jernbanelverket har i dag en beredskapsplan for ras som følge av nedbør. Instruks for ugunstige vær-situasjoner har tre beredskapsnivå som skal forhindre sikkerhetskritiske konsekvenser som følge av nedbør med eventuelle bidrag fra snøsmelting (Karlsen 2012). Beredskapen øker ved økende sannsynlighet for ras, erosjonsskader, flom, flom- og jordskred og kollaps av fyllinger. Figur 5 viser en skisse over det trinnvise beredskapssystemet i «Instruks for ugunstige vær-situasjoner». For å bestemme beredskapsnivå er det utarbeidet ulike 12-timers terskelverdier av akkumulert regn og/eller snøsmelting for henholdsvis gul, oransje og rød beredskap ved ulike stasjoner på de ulike banene. Beredskapssystemet er beskrevet nærmere i kapittel 2.4 *Beredskap*.



Figur 5: Skisse av beredskapssystemet for nedbør og snøsmelting (Karlsen 2012)

Målet med masteroppgaven er å utarbeide en beredskapsplan ved fare for solsløng på lignende måte som dagens værberedskap. Ulike faktorer som påvirker solsløng må vurderes i forhold til beredskap, og det må avgjøres om det kan innføres trinnvis beredskap ved fare for solsløng. Hensikten med en slik beredskapsplan er at faresituasjoner ikke utvikler seg til ulykkessituasjoner. Dersom det kan utarbeides en måte å varsle når det er fare for solsløng kan risikoen for alvorlige hendelser reduseres og bidra til at sikker togframføring blir ivaretatt.

## **1.3 Avgrensning**

### **1.3.1 Hva ligger i begrepet «beredskap ved fare for solsllyng»?**

Beredskap ved fare for solsllyng vil si hvilke handlinger som skal utføres ved fare for solsllyng. Dette gjelder kun beredskap mot hendelser og ikke håndtering av hendelser etter de har skjedd. Varslet fare for solsllyng må ta utgangspunkt i faktorer som påvirker kreftene i sporet og dermed innvirker på faren for solsllyng. Beredskapen er ment å øke med økende sannsynlighet for potensielle sikkerhetskritiske hendelser.

### **1.3.2 Avgrensning av oppgaven**

Det skal vurderes om det kan innføres et lignende beredskapssystem ved fare for solsllyng som beredskapssystemet for nedbør og issmelting, gitt i figur 5. Det skal foreslås trinnvis beredskap ved solsllyngfare med tilhørende terskelverdier, samt langsiktige tiltak for å forebygge fare for solsllyng.

En temperaturmodell som kan brukes til å praktisk forutsi skinnetemperaturen skal utarbeides gjennom en regresjonsanalyse. På den måten kan faren for solsllyng anslås. I tillegg skal tidligere solsllyng kartlegges med fokus på årsak og konsekvens, og det skal gjennomføres en spørsmålsrunde for å få innspill til beredskapen. For å undersøke metoder for å måle krefter i sporet og om det finnes sikkerhetskriterier mot solsllyng skal det gjennomføres en litteraturstudie.

Studieområdet som er brukt i analysen er jernbanestrekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer. Dette er valgt på bakgrunn av at de meteorologiske dataene som er brukt i regresjonsanalysen er fra to målepunkter langs disse strekningene.

### **1.3.3 Figurer og grafer**

Alle kartutklippene som er brukt er hentet fra Jernbaneverkets kartvisning på internett som brukes til å visualisere og analysere jernbanenettet i et GIS. Dersom noen av figurene har blitt redigert, så har det blitt brukt Inkscape 0.91. Alle grafer har blitt plottet i Excel. Alle figurer som har blitt hentet fra andre kilder har en kildereferanse i bildeteksten.

### 1.3.4 Forskningsspørsmål

Forskningsspørsmålene som ønskes å belyses i denne masteroppgaven er

- Hvordan kan baner som er utsatte for solslyng overvåkes? Kan solslyng varsles automatisk?
- Hvilke sportekniske og meteorologiske forhold innvirker på faren for solslyng?
- Hvilke strekninger har historiske sett vært mest utsatt for solslyng i Norge? Hva kan årsakene til dette være?
- Hvilke faktorer skal inngå i en beredskapsplan ved fare for solslyng? Hvilke beredskapsnivå er hensiktsmessig å inkludere?
- Hvordan kan terskelverdier for disse beredskapsnivåene bestemmes?

### 1.4 Masteroppgavens oppbygning

Denne masteroppgaven er delt inn i ni kapitler og har følgende oppbygning:

- **Kapittel 2: Teoretiske grunnlag**  
Teorien bak krefter i sporet og hvilke faktorer som påvirker faren for solslyng, samt annen relevant teori for analysen.
- **Kapittel 3: Metode**  
Beskrivelse av hvilke metoder som brukes i masteroppgaven for å hente data og analysere dataene.
- **Kapittel 4: Litteraturstudium**  
Undersøke muligheter for å overvåke og måle krefter i sporet og om det finnes noen sikkerhetskriterier mot solslyng.
- **Kapittel 5: Resultater**
- Kartlegging av solslyngfrekvenser for ulike baner og avsporinger som følge av solslyng, regresjonsanalyse for å finne en empirisk sammenheng mellom luft- og skinnnetemperatur, vurdering av tidligere tilfeller av solslyng langs Trønderbanen og resultater fra en spørsmålsrunde.
- **Kapittel 6: Diskusjon**  
Drøfting av resultatene med fokus på reliabilitet og validitet, mulige feilkilder, måloppnåelse og bruksområde. Kildebruk vurderes også.
- **Kapittel 7: Forslag til beredskap ved fare for solslyng**  
Forslag til trinnvis beredskap ved fare for solslyng.
- **Kapittel 8: Konklusjon**  
Konklusjon av arbeidet
- **Kapittel 9: Videre anbefalinger**  
Videre anbefalinger fra arbeidet med denne masteroppgaven



## 2 Teoretisk grunnlag

I dette kapitlet gjennomgås teorien bak solslyng, hvilke faktorer som påvirker faren for solslyng og relevant teori for analysen.

### 2.1 Krefter i helsveist spor

Sporet kan bygges på to måter, enten ved å bruke laskeskjøter eller ved helsveist spor. Ved bruk av laskeskjøter, skjøtes korte skinnelengder sammen ved bruk av lasker og bolter. Ved hver lask trenger skinnene et pusterom slik de kan bevege seg ved temperaturendringer. Skjøter i sporet medfører store påkjenninger på overbygningens komponenter i området ved skjøten noe som igjen gir et vanskelig og omfattende vedlikehold og nedsatt kjørekomfort (Sørлие 2008). Dette vedlikeholdet består av regulering av varmerom og smøring av lasker for at de skal fungere etter hensikten.

Det helsveiste sporet gir mindre vedlikehold, er en stivere og mer stabil konstruksjon og gir mindre slitasje både på spor og materiell. I tillegg gir det en bedre kjørekomfort for passasjerene. Ulempen er at det blir låst inne store aksialkrefter i sporet (Sørлие 2008). Dersom den laterale stabiliteten til sporet ikke håndterer aksialkreftene i sporet kan det gi en utknekking av sporet på grunn store trykkrefter utviklet av høy skinnetemperatur (Esveld 2001).

Krefter i sporet dannes hovedsakelig fra (Kerr 2003):

- Akselerering og bremsing av det rullende materiellet
- Krypekrefter i skinnene når skinnerammen blir hindret i å bevege seg aksialt, for eksempel ved faste konstruksjoner som broer eller planoverganger
- Temperaturendringer i skinnene

Bremsekrefter vil generere trykkrefter i skinnene foran toget. I tillegg oppstår det krypkrefter i forbindelse med togframføringen ved at det oppstår en relativ bevegelse mellom hjul og skinne. Krefter som oppstår som følge av temperaturendringer er imidlertid den viktigste faktoren for solslyng og skinnebrudd.

### 2.1.1 Aksielle krefter i et helsveist spor som følge av temperaturendringer

Temperaturindusert lengdeforandring i en fritt opplagt skinne er gitt ved (Profillidis 2006)

$$\Delta L_{\Delta T} = \alpha L \Delta T \quad (1)$$

Der  $\alpha$  er utvidelseskoeffisient til stål,  $L$  er den opprinnelige lengden og  $\Delta T$  er temperaturforandringen i skinnen. Hookes lov sier at lengdeforandringen som følge av strekk eller trykk er

$$\Delta L_s = \frac{\sigma L}{E} \quad (2)$$

Et helsveist spor kan betraktes som en fast innspent stålbejelke der «naboskinnene» låser skinnen slik at den ikke kan utvide seg eller trekke seg sammen (Sørli 2008). Ved å sammenstille ligning (1) og (2) kan man få et uttrykk for spenningene i skinnen som følge av en temperaturforandring.

$$\Delta L_s = \Delta L_{\Delta T} \quad (3)$$

$$\alpha L \Delta T = \frac{\sigma L}{E}$$

Dette gir følgelig en temperaturindusert spenning i skinnene på

$$\sigma = \alpha E \Delta T \quad (4)$$

Aksialkraften i skinnen som følge av temperaturforandring blir dermed

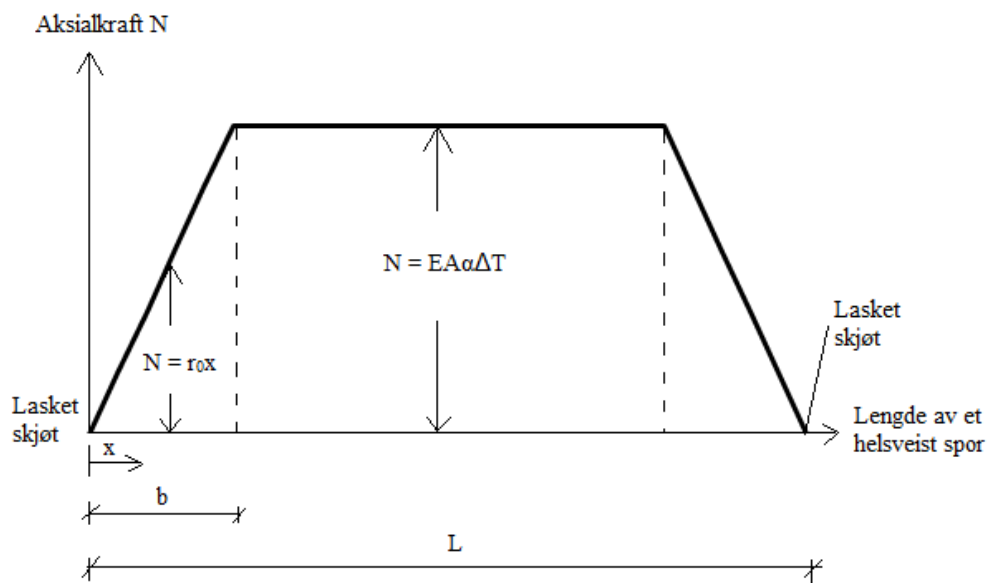
$$N = \sigma A = \alpha E A \Delta T \quad (5)$$

Der  $\alpha$  er utvidelseskoeffisienten til stål,  $E$  er elastisitetsmodulen til stål,  $A$  er tverrsnittet til skinnen og  $\Delta T$  er temperaturforandring over nøytraltemperaturen.

I et helsveist spor vil det oppstå store longitudinale krefter i hver skinne, der den temperaturinduserte kraften er gitt i ligning (5). Ved hver ende av et helsveist spor vil det dannes et pusteparti der spenningene i sporet bygges opp. Motstanden mot langsgående forskyvning i endene av det helsveiste sporet utgjøres av laskemotstanden og ballastmotstanden (Sørli 2008). Det kan antas at ut mot endene av det helsveiste sporet er ballastmotstanden konstant,  $r = r_0$ . Likevekt av krefter i pustepartiet gir dermed at  $r_0x + N(x) = 0 \rightarrow N(x) = -r_0x$  for  $0 < x < b$ , der  $b$  er lengden av pustepartiet (Kerr 2003). Lengden av pustepartiet blir dermed

$$b = -\frac{N}{r_0} = \frac{EA\alpha\Delta T}{r_0} \quad (6)$$

Figur 6 viser en skisse over pustepartiet.



Figur 6: Skisse av pustepartiet

## 2.2 Faktorer som påvirker solslyng

### 2.2.1 Kritisk knekktemperatur

Kritisk knekktemperatur er den temperaturen som vil skape så store trykkrefter i sporet at det vil skje en utknekkning. Kritisk knekktemperaturøkning over nøytraltemperaturen i kurver er gitt ved (Sørli 2008)

$$\Delta T_{cr} = \left( -\frac{8 \cdot J}{\alpha \cdot A \cdot R \cdot f} + \sqrt{\left( \frac{8 \cdot J}{\alpha \cdot A \cdot R \cdot f} \right)^2 + \frac{16 \cdot J \cdot w}{\alpha^2 \cdot A^2 \cdot E \cdot f}} \right) k_1 \cdot k_2 \quad (7)$$

Kritisk knekktemperatur over nøytraltemperaturen på rett linje er gitt ved (Løhren 2015)

$$\Delta T_{cr} = \sqrt{\frac{8,7 \cdot J \cdot w}{\alpha \cdot A^2 \cdot E \cdot f}} \quad (8)$$

Kritisk temperatur blir dermed

$$T_{cr} = T_{nøytral} + \Delta T_{cr} \quad (9)$$

$\Delta T_{cr}$ : Kritisk temperaturøkning over nøytraltemperaturen [°C]

$E$ : Elastisitetsmodul til stål,  $E = 2,1 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup>

$\alpha$ : Utvidelseskoeffisient til stål,  $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5}$  1/K

$A$ : Skinnenens samlede tverrsnittsoverflate [mm<sup>2</sup>]

$J$ : Sporets ekvivalente treghetsmoment [mm<sup>4</sup>]

$R$ : Kurveradius [mm]

$w$ : Sidedforskyvningsmotstand [N/mm]

$f$ : Antatt baksefeil (5-20 mm) [mm]

$k_1$ : Korreksjon for ballastens konsolideringsgrad (0,5-1,0)

$k_2$ : Korreksjon for virkning av løftebølge (0,5-1,0)



Ligning (7), (8) og (9) beskriver kritisk knekktemperatur i ubelastet, løst spor og stammer fra 1930-tallet. Ligningene kalles Meiers metode og er tilnæringer som ble gjort gjennom energibetraktninger. Med løst spor menes at man ikke tar hensyn til dreiemotstanden skinnebefestigelsen gir mellom skinne og sville. Med sporets ekvivalente treghetsmoment menes skinnestigens stivhet sideveis. Disse ligningene er svært forenklet, men tidligere erfaringer har vist at de er tilstrekkelig nøyaktige for praktisk bruk.

Ved å plote ligning (7) og variere en parameter mens de andre holdes faste, kan det gi en indikasjon på hvordan ulike parametere påvirker den kritiske temperaturøkningen over nøytraltemperaturen.

Tabell 1 viser ulike skinneprofiler som inngår i plottene av ligning (7).

*Tabell 1: Ulike skinneprofiler for ulike overbygningsklasser*

Skinneprofil	Overbygningsklasse	Tverrsnitt, $A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	Treghetsmoment $I_y$ [mm <sup>4</sup> ]
35,7 kg	a, b	4550	1740000
S41	a, b	5216	2689000
49E1 (S49)	a, c, c+	6297	3200000
54E3 (S54)	c, c+	6948	3590000
54E2 (UIC54E)	c, c+	6855	3413000
54E1 (UIC54)	c, c+, Ofotbanen	6934	4175000
60E2	Oforbanen	7648	5105000
60E1	d	7670	5123000
S64	c	8270	6040000

Tabell 2 viser parameterne som varieres og hvilke verdier som holdes faste. Disse verdiene er valgt for ulike overbygningsklasser, sideforskyvningsmotstander og ulike initiale sporfeil.

*Tabell 2: Parametere som varieres*

Parameter	Benevning	Initial verdi	Testområde
Kurveradius	$R$ [m]	400	100-2500
Skinneprofil	$A_s$ [mm]	35,7 kg	Tabell 1
Sideforskyvningsmotstand	$w$ [N/mm]	8	3-12
Baksefeil	$f$ [mm]	5	0,5-20
Korreksjon for ballastens konsolidering	$k_1$	0,7	0,5-1
Korreksjon for løftebølge	$k_2$	0,7	0,5-1

Tilstanden på sporet vil avgjøre den laterale sideforskyvningsmotstanden, og er avhengig av flere parametere, for eksempel ballastenes kvalitet, bredde på ballastskulder og svilletepe. Tabell 3 viser eksempelverdier for sideforskyvningsmotstanden (Ahmad, Mandal et al. 2013). Disse verdiene har blitt brukt for sideforskyvningsmotstanden i plottene av den kritiske temperaturøkningen.

*Tabell 3: Ulike sideforskyvningsmotstander (Ahmad, Mandal et al. 2013)*

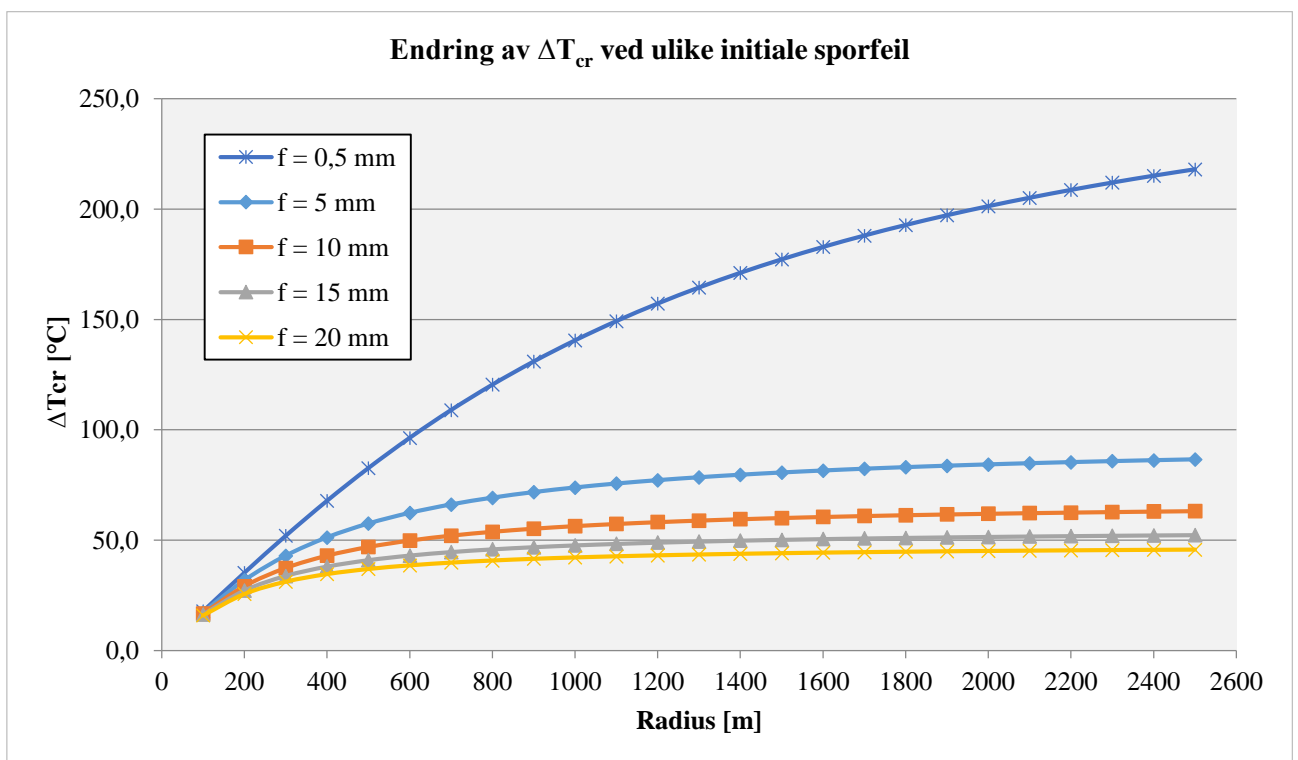
<b>Svilletepe</b>	<b>Sportilstand</b>	<b>Sideforskyvningsmotstand [kN/m]</b>
Tre	Middels	3
Betong	Dårlig	3
Betong	Middels	8
Betong	God	12

Videre brukes det verdier for den initiale sporfeilen på mellom 0,5-20 mm. En sporfeil på 20 mm er ekstremt, men det viser godt hvordan den kritiske temperaturøkningen reduseres ved store sporfeil.

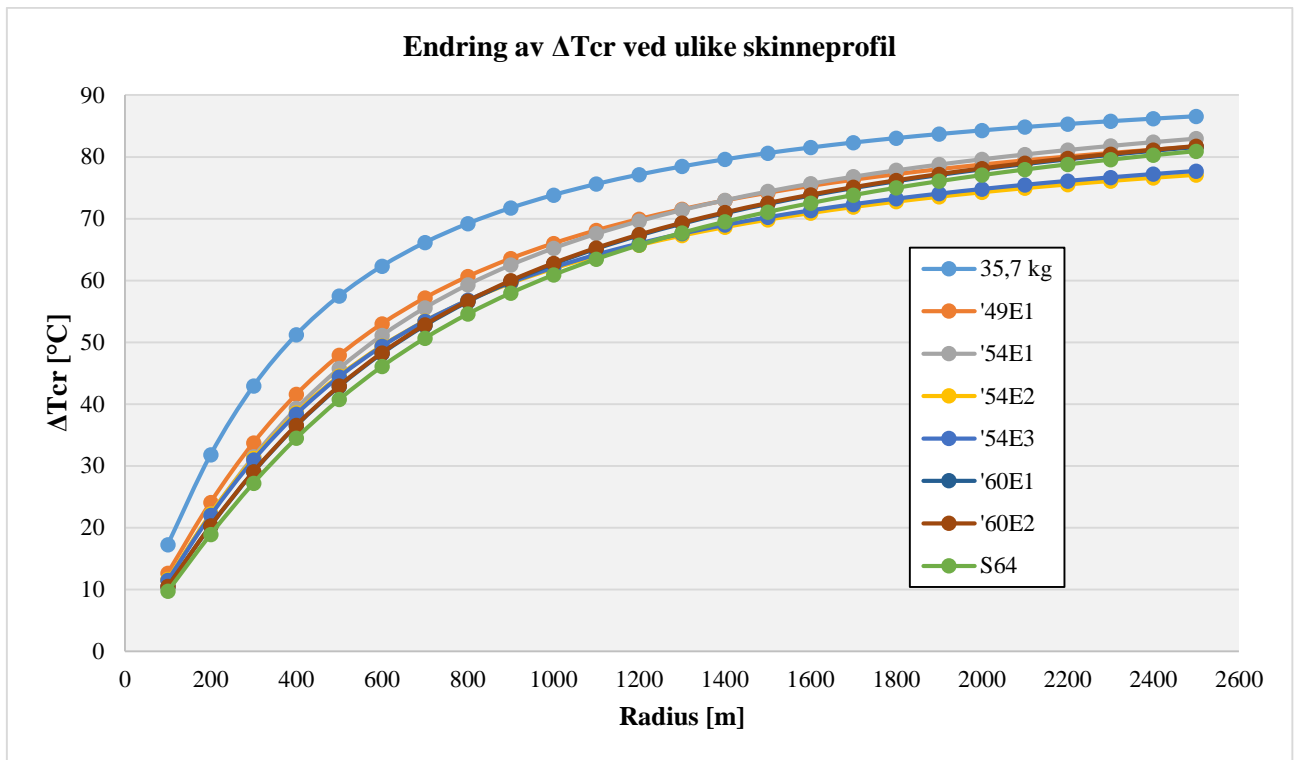
Korreksjonsfaktorene for ballastenes konsolidering og for løftebølgen fra det rullende materiell,  $k_1$  og  $k_2$ , varierer fra 0,5 til 1. Ifølge (Sørli 2008) kan sporets totale motstand reduseres med 30 % av løftebølgen fra det rullende materiell, og dersom sporet har blitt justert med pakkmaskin kan sidemotstanden være hele 50 % redusert. Etter ballastrensing kan sidemotstanden være redusert med hele 70 %. Det er brukt initiale verdier for  $k_1$  og  $k_2$  på 0,7.



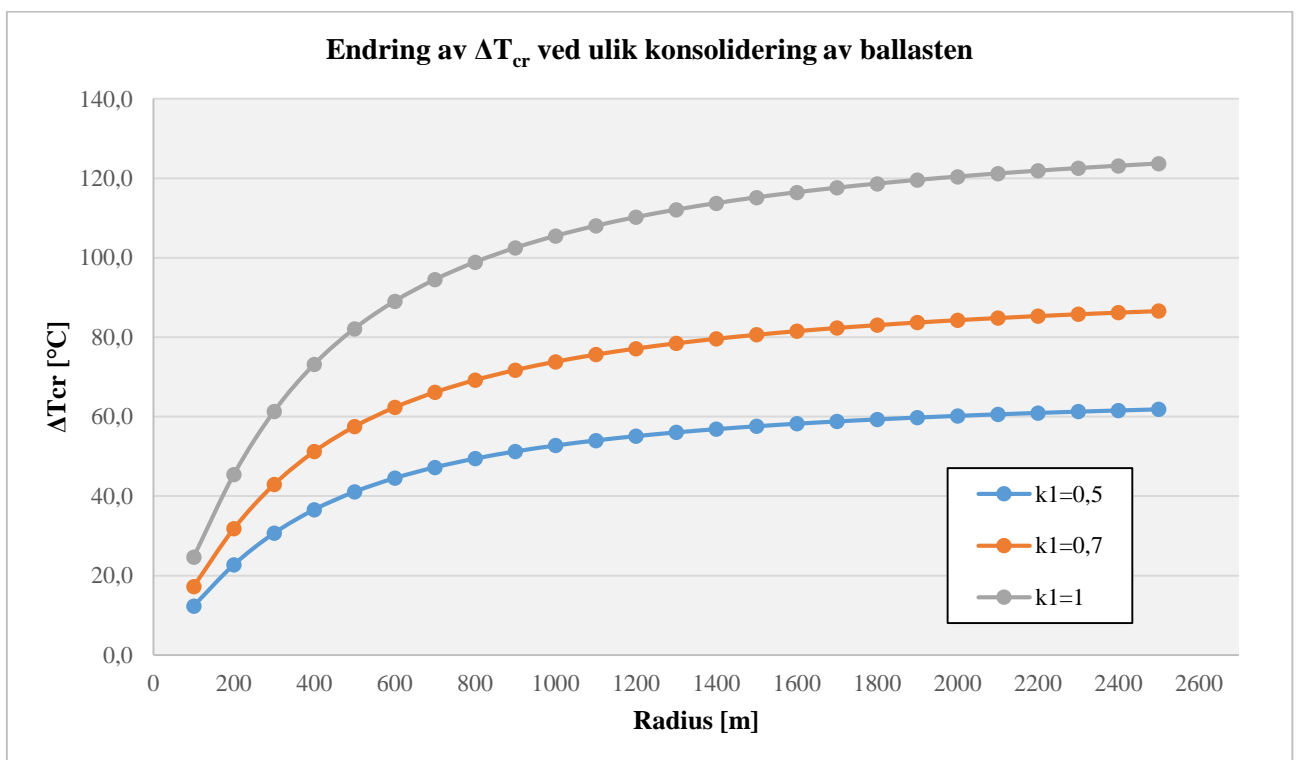
Figur 7: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike  $w$  og radier



Figur 8: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike  $f$  og radier



Figur 9: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike skinneprofiler og radier



Figur 10: Endring av kritisk temperaturøkning ved ulike ballastkonsolideringer

Figur 7 viser hvordan den kritiske temperaturøkningen i ligning (7) påvirkes av ulike sideforskyvningsmotstander. Sideforskyvningsmotstander må måles ved hver sporkonstruksjon og er dermed vanskelig å anslå. Men dersom ballastskulderen ikke er bred nok, ballasten er forurenset, flere befestigelser etter hverandre mangler, eller at det er skader i sporet så kan man anslå etter skjønn om det er dårlig, middels eller god sideforskyvningsmotstand i sporet. Figuren viser at i en kurveradius på for eksempel 1000 meter med en reduksjon på 4 N/mm og 9 N/mm i sideforskyvningsmotstanden, så reduseres den kritiske temperaturøkningen med henholdsvis 22 % og 60 %. Det betyr at i et spor med dårlig sidemotstand, så kan den kritiske temperaturøkningen over nøytraltemperaturen være så lav som en tredjedel av temperaturøkningen i et spor med god sidemotstand.

Figur 8 viser hvordan ulike sporfeil ved ulike radier påvirker den kritiske temperaturøkningen. Sideforskyvningsfeil i sporet skaper en utover rettet kraftkomponent i kurver og det kan dermed enklere skje en lateral utknekking dersom sideforskyvningsmotstanden på utsiden av kurven ikke er god nok. Fra tilnærmet ingen feil ( $f=0,5$  mm) til en feil på 5 mm reduseres den kritiske temperaturøkningen med hele 47 % ved en kurveradius på 1000 m.

Figur 9 viser hvordan ulike skinneprofiler påvirker den kritiske temperaturøkningen. Skinneprofilet 35,7 kg som har det minste tverrsnittet har den høyeste kritiske temperaturøkningen. Dersom man velger skinneprofilet 49E1 ved en radius på 1000 m, så reduseres den kritiske temperaturøkningen med ca. 11 %. Og dersom man velger skinneprofilet S64, så reduseres den kritiske temperaturøkningen med ca. 17 % fra skinneprofilet 35,7 kg. Ved  $R > \sim 1400$  meter viser figur 9 at den kritiske temperaturøkningen for S64 høyere enn for 54E2 og 54E3. Dette virker rart da S64 er et større skinneprofil enn 54E2 og 54E3, noe som gir større trykkrefter i S64 og dermed reduseres den kritiske temperaturøkningen. Dette kan skyldes at skinneprofilene egentlig har ulike utvidelseskoeffisienter etter hvordan skinnene har blitt laget. Etter hvert som radius øker mot rettlinje, så vil en økt utvidelseskoeffisient redusere den kritiske temperaturøkningen i større grad, jfr. ligning (8).

Figur 10 viser den kritiske temperaturøkningen ved ulike ballastkonsolideringer, der  $k_I=1$  er helt konsolidert spor, det vil si etter minst 100 000 bruttotonn har passert etter sporjusteringer. Etter 50 000 bruttotonn kan korreksjonsfaktoren,  $k_I$ , settes til eksempelvis 0,7. Både korreksjonsfaktoren for ballastkonsolidering og løftebølge fra det rullende materiell er

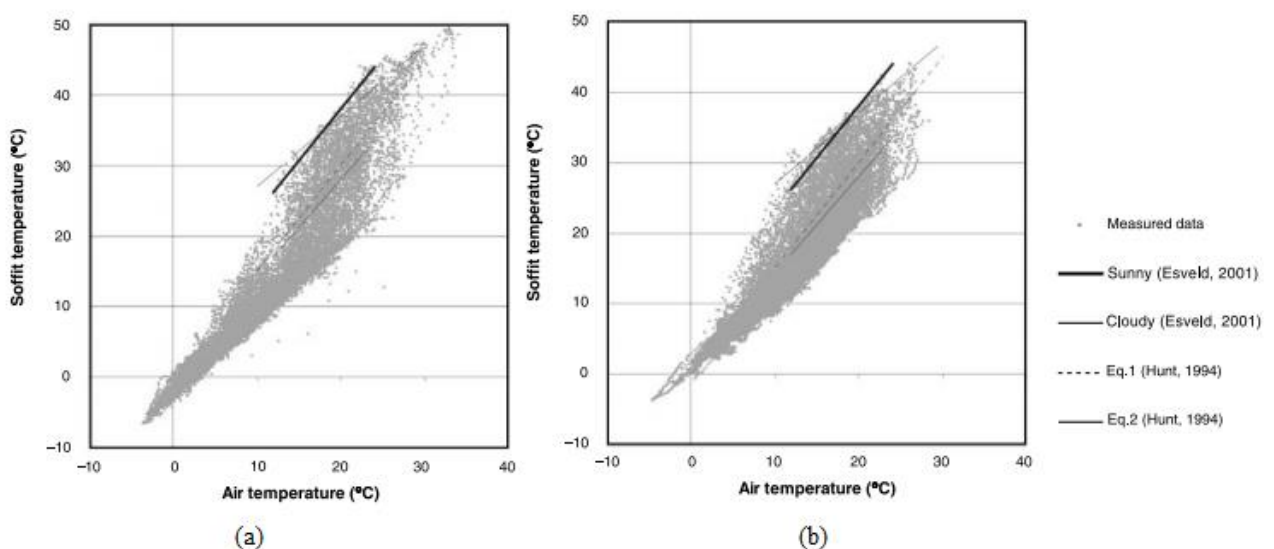
tilnærminger og figuren vil se lik ut for de samme verdiene for korreksjonsfaktoren for løftebølgen.

I figurene av ligning (7) er det klart at sideforskyvningsmotstanden og sporfeil har størst innvirkning på den kritiske temperaturøkningen over nøytraltemperaturen. Ballastens konsolidering og løftebølgen vil også ha innvirkning på den kritiske temperaturøkningen, men disse korreksjonsfaktorene er vanskelige å anslå.

I Europa og Nord-Amerika kan forskjellen på skinnnetemperatur og lufttemperatur komme opp i 20 °C om sommeren, mens på vinteren er forskjellen ca. 5 °C (Nucera 2012). Chapman, Thornes et. al. beskriver en empirisk sammenheng mellom lufttemperatur og skinnnetemperatur gjort av Hunt i 1994 på (Chapman, Thornes et al. 2008)

$$\begin{aligned} T_{rail} &= 1,5 \cdot T_{air} \\ T_{rail} &= T_{air} + 17 \end{aligned} \quad (10)$$

For henholdsvis dager med mye sol og dager med skydekke. Chapman, Thornes et al. beskriver videre en korrelasjon mellom skinnnetemperatur og lufttemperatur gjort av Coenraad Esveld. Figur 11 nedenfor viser målingene som er fra to steder utenfor Birmingham (Winterbourne og Leominster) i England. Figuren viser også forholdet mellom skinne- og lufttemperaturen gitt i ligning (10).



Figur 11: Luft- og skinnnetemperatur ved Winterbourne (a) og Leominster (b)

Chapman, Thornes et al. utførte videre en sensitivitetsanalyse på en temperaturmodell som de brukte til å modellere skinnnetemperaturer. Ulike parametere som ble diskutert var breddegrad, skydekke, skinneorientering, lufttemperatur, vindhastighet, fuktighet og nedbør. En økning i lufttemperaturen vil alltid føre til en økning i skinnnetemperaturen og dette er relativt konstant gjennom hele dagen. Økende skydekke gjennom dagen fører til en reduksjon i skinnnetemperaturen, og den største variasjonen i skinnnetemperatur skjer når skydekket går fra 3-5 okta<sup>1</sup> til 8 okta. Den maksimale skinnnetemperaturen reduseres da med ca. 6 °C.

En annen parameter som framheves er nedbør. Sammenlignet med scenarioer med tørre skinner, så reduseres den gjennomsnittlige og den maksimale skinnnetemperaturen med henholdsvis 4,19 °C og 8,16 °C. Det er også en tendens at skinnnetemperaturen når sitt maksimum tidligere på dagen når skinnene er våte.

### 2.2.2 Nøytraltemperatur

Nøytraltemperaturen er den skinnnetemperatur hvor skinnene skal være spenningsfrie. Nøytraltemperaturen vil bestemme den temperaturinduserte lasten som skinnene utsettes for ved at det er temperaturøkning over nøytraltemperaturen som avgjør den termiske lasten. Ligning (5) kan også skrives som (Bartoli, Phillips et al. 2010)

$$N = \alpha EA(T - NT) \quad (11)$$

Der NT er nøytraltemperaturen.

Jernbaneverket har satt nøytraltemperaturen i Norge til 21 °C. Nøytraltemperaturområdet er det temperaturområdet hvor sluttsveising av skinnene kan skje, og er satt til  $21 \pm 3$  °C. I Norge kan skinnnetemperaturen variere mellom -40 °C og +55 °C, og maksimale temperaturforskjeller fra nøytraltemperaturen kan derfor være så store som -64 °C og +37 °C.

---

<sup>1</sup> Okta: Skydekke vurderes etter hvor mange åttendedeler som er dekket av skyer. 0 okta er helt klar himmel, mens 8 okta er helt overskyet.

Fra ligning (5) og (11) har man altså at skinnene utsettes for større strekkrefter enn trykkrefter. Sporet tåler imidlertid større strekkrefter enn trykkrefter (Sørli 2008).

Nøytraltemperaturen i helsveist spor kan variere over tid, og kan skyldes (Esveld 1998, Nucera 2012):

- Baksing inn- eller utover i kurver
- Store akselerasjonskrefter fra det rullende materiellet kan føre til skinnevandring
- Vedlikeholdsoperasjoner som pakking av sporet, ballastrensing og sporjusteringer
- Kryp, kurvepusting og ballastkonsolidering

Nøytraltemperaturen påvirkes også av varme-fryse-prosesser og nøytraltemperaturen kan reduseres med så mye som 3 °C bare det første året etter nøytralisering (Chapman, Thornes et al. 2008).

Endringen i nøytraltemperaturen som følge baksing av sporet er gitt ved (Løhren 2015)

$$\Delta T_{baks} = \frac{\Delta R}{R \cdot \alpha} \quad (12)$$

Der  $\Delta R$  er endring av kurveradiusen som følge av en ensidig baks.

Om vinteren vil skinnnetemperaturen synke langt under nøytraltemperaturen og skinnene blir utsatt for strekkrefter. I en kurve kan strekkreftene kunne være store nok til å bakse sporet innover i kurven. Denne horisontale feilen kan også forsterkes av vibrasjoner i sporet fra det rullende materiellet. Denne forflytningen kan forårsake hulrom i ballasten ved enden av svillene. Dette skaper en ny nøytraltemperatur i kurven som er lavere enn den opprinnelige, og faren for solslyng i varmere perioder øker (Kerr 2003).

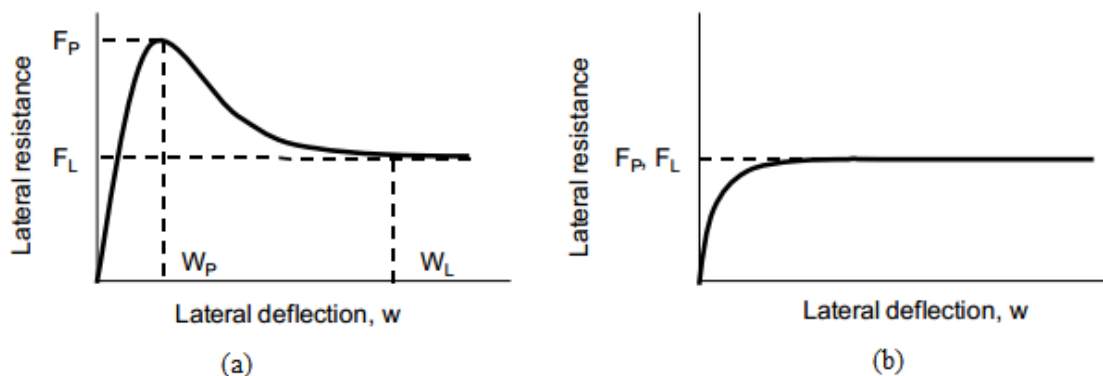
### 2.2.3 Sporets stabilitet

Sporets stabilitet vil ha stor betydning for hvordan sporets takler aksialkreftene i skinnene. Med sporets stabilitet menes ballastens kvalitet (renhet, tykkelse og skulderbredde), type sville, type befestigelse og type skinnprofil. Svilleavstand vil også ha innvirkning på stivheten til sporet. Ballasten og svillene vil i stor grad påvirke den laterale



sideforskyvningsmotstanden, mens befestigelse og mellomlegg påvirker rammestivheten til sporet.

Ballasten har som oppgave å overføre horisontale og vertikale krefter fra svillene til underbygningen. Ballasten og ballastskulderen skal sikre tilstrekkelig sidestabilitet i sporet og er meget viktig for sporets stabilitet. Spesielt i kurver er det viktig at ballastskulderen er tilstrekkelig stor for å håndtere kraftresultanten som dannes ved temperaturinduserte trykkrefter i skinnene. En økning av skulderbredden fra 40 til 55 cm betyr en økning av sporets sidestabilitet på ca. 10 %, og en økning av høyden på ballastskulderen fra 0 til 10 cm vil bety en økning av sporets sidestabilitet på 20 % (Sørli 2008). I konsoliderte spor er den laterale motstanden mot forskyvning langt større enn ved et nylig pakket spor. Figur 12 beskriver forskyvningsmotstanden i et konsolidert spor og et nylig pakket spor (Kish and Samavedam 2013). Sporjusteringer og ballastrensing påvirker konsolideringsgraden til ballasten i stor grad og reduserer dermed forskyvningsmotstanden til sporet.



Figur 12: Sidemotstand i konsolidert (a) og pakket spor (b) (Kish and Samavedam 2013)

Type sville vil påvirke sidestabiliteten til sporet, der svillens tyngde og form er avgjørende. På grunn av tyngden har betongsviller betydelig bedre sideforskyvningsmotstand enn tresviller og stålsviller. Vekten til betongsviller er ca. 250-300 kg, mens vekten for en tresviller er ca. 50-80 kg (Jernbanekompetanse.no 2015). Et spor med betongsviller har ca. 60 % bedre forskyvningsmotstand enn et spor med tresviller (Sørli 2008). Svillene bidrar med sideforskyvningsmotstand i både den longitudinelle og den laterale retningen av sporet. Den laterale sideforskyvningsmotstanden er avhengig av friksjonen mellom ballasten og svillens flater (underflate, sider og ender), samt at den vertikale lasten på sporet påvirker den laterale sideforskyvningsmotstanden. Vertikal last fra rullende materiell øker den laterale

forskyvningsmotstanden i sporet rett under akslene. Det rullende materiellet skaper imidlertid ofte en løftebølge av sporet foran og bak aksellasten som reduserer forskyvningsmotstanden. Det er derfor solsløng ofte skjer uventet under last fra rullende materiell.

Befestigelsen har som oppgave å feste skinnene fast til svillene, og på den måten bidra til skinnestignens dreiemotstand. Type befestigelse har stor innvirkning på dreiemotstanden, mens type sville har mindre påvirkning (Ahmad, Mandal et al. 2009). Den kritiske knekktemperaturen øker med økende rammestivhet fra befestigelsene, og befestigelsens klemkraft og friksjonen mellom skinne og mellomlegg har stor betydning (Van 1996).

Skinneprofilen vil påvirke både lasten i skinnene og den kritiske knekktemperaturen. Den laterale sideforskyvningsmotstanden reduseres med økende skinneprofil (Ahmad, Mandal et al. 2009). Et lavere skinneprofil er mer gunstig for sikkerhet mot solsløng, men skinneprofilen velges heller ut fra hensyn til aksellast, vertikal deformasjon og sikkerhet mot tretthetsbrudd (Kish and Samavedam 2013).

Initiale sporfeil har ofte en betydelig påvirkning av hvor det skjer solsløng. Det er langt lettere at det skjer en solsløng dersom skinnene har en initial lateral sporfeil som kan trigge en utknekkning. Den kritiske knekktemperaturen vil også påvirkes av initiale sporfeil. En lateral sidefeil i sporet på 1,5 cm reduserer den kritiske knekktemperaturen med ca. 25 % (Lim, Han et al. 2008)

Kurvatur har stor innvirkning på kreftene i sporet. I kurver vil det oppstå en kraftresultant utover i kurven som stiller strengere krav til forskyvningsmotstanden på utsiden av kurven enn ved rette strekninger. En sensitivitetsanalyse utført av Kish og Samavedam viste at kurver har langt lavere knekktemperatur enn rette strekninger (Kish and Samavedam 2013). Gjennom beregningsprogrammet CWERRI har det blitt vist at en endring i kurveradius fra 200 m til 1000 m påvirker den kritiske knekktemperaturen med ca. 50 % (Esveld 1998).

Kurvatur, forskyvningsmotstanden i ballasten og initiale sporfeil er betraktet som de viktigste parameterne for den kritiske temperaturen for utknekkning (Van 1996). Plottene av ligning (7) i figurene 7, 8, 9 og 10 samsvarer med dette.

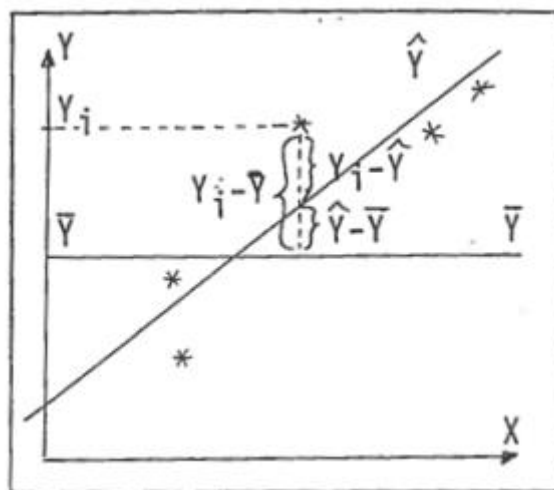
## 2.3 Regresjonsanalyse

Det skal gjennomføres en regresjonsanalyse for å finne et forhold mellom luft- og skinnnetemperaturen langs Trønderbanen på lignende måte som i ligning (10) i kapittel 2.2.1 *Kritisk knekktemperatur*. Formålet er at man kan finne en temperaturmodell som kan brukes til og praktisk forutsi skinnnetemperaturer som er representative for jernbanestrekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer på sommeren, og dermed bidra til å bestemme beredskapsnivået.

Ved å bruke dataanalyse-verktøyet i Excel kan regresjonsstatistikk utarbeides og det kan finnes en regresjonslinje for de målte temperaturene. I regresjonsanalysen blir da lufttemperaturen en forklaringsvariabel og skinnnetemperaturen en avhengig variabel.

For å beskrive korrelasjonen mellom to datasett må avviket til regresjonslinjen beskrives. Figur 13 beskriver forklart og tilfeldig avvik. Ved å ta utgangspunkt i spredningen (kvadratavviket) til variabelen  $Y$  (skinnnetemperaturen) og regresjonslinjen  $\hat{Y}$  (predikert skinnnetemperatur), kan avviket beskrives. Det skilles mellom to typer avvik:

- Forklart avvik  $\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2$
- Tilfeldig avvik  $\sum(Y_i - \hat{Y})^2$



Figur 13: Forklart og tilfeldig avvik (Blakstad 1995)

Det totale avviket er summen av disse to. Dersom alle punktene falt på regresjonslinjen ville den tilfeldige variasjonen være lik null, og man kan si at korrelasjonen er perfekt. All variasjon ville dermed vært forklart av den lovmessige sammenhengen mellom X og Y. Regresjonslinjen velges slik at kvadratet av summen av avvik for den beste linjen blir minst mulig (Blakstad 1995).

R-kvadrat,  $R^2$ , er regresjonskoeffisienten og beskriver kurvetilpasningen til regresjonslinjen i forhold til målingene ifølge minste kvadraters metode og kan uttrykkes som

$$R^2 = \frac{\sum \text{forklart variasjon}}{\sum \text{total variasjon}} = \frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (13)$$

$\hat{Y}$  er regresjonslinjen

$\bar{Y}$  er middelet av Y-verdiene (skinnnetemperatur)

$Y_i$  er en måling av skinnnetemperaturen

Regresjonskoeffisienten angir dermed hvor stor del av den totale variasjonen langs regresjonslinjen som skyldes systematikk og hvor mye som skyldes tilfeldigheter. R er korrelasjonskoeffisienten og beskriver hvor sterkt forholdet mellom luft- og skinnnetemperaturen er. Korrelasjonskoeffisienten beskriver styrken av en lineær sammenheng.

For å kunne predikere skinnnetemperaturen fra regresjonslinjen, utarbeides det et prediksjonsintervall. Et prediksjonsintervall defineres som et konfidensintervall som må ta usikkerheten til det tilfeldige avviket (Blakstad 1995). Når man bruker regresjonslinjen til og predikere enkeltverdier blir usikkerheten større enn ved et vanlig konfidensintervall. Ved lineær regresjon er konfidensintervallet det intervallet man forventer å finne middelveien til en serie målinger ved en gitt forklaringsvariabel. Et prediksjonsintervall derimot angir det intervallet hvor man forventer å finne responsvariabelen ved en gitt forklaringsvariabel.

Prediksjonsintervallet for lineær regresjon er gitt som (Lindqvist 2012)

$$\hat{Y} \pm t(n-2, \alpha/2) S_e \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{SS(X)}} \quad (14)$$

$\hat{Y}$  : Predikert skinnnetemperatur

$t$ : t-verdi fra Student t-fordelingen med ønsket signifikansnivå

$S_e$ : Standardfeil til regresjonslinjen.  $S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2}$

$n$ : Antall observasjoner

$X$ : Lufttemperatur

$\bar{X}$ : Middellufttemperatur

$$SS(X) = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}$$

Standardfeilen til regresjonen angir hvor godt de observerte Y-verdiene passer til den beregnede regresjonslinjen  $\hat{Y}$ .

Signifikansnivå vil si hvor stor sjanse man kan akseptere for det man observerer er en tilfeldig egenskap ved det utvalget av enheter man studerer, heller enn en tendens som gjelder hele populasjonen. Ved et 10 % -signifikansnivå aksepterer man altså at det er 10 % sannsynlighet for at den predikerte skinnnetemperaturen med tilhørende prediksjonsintervall er feil.

## 2.4 Beredskap

Statens jernbanetilsyn (SJT) definerer beredskap som (SJT 2013):

*«Med beredskap menes alle på forhånd identifiserte og planlagte organisatoriske, operasjonelle og tekniske tiltak som skal iverksettes for å håndtere og begrense negative konsekvenser av inntrådte utilsiktede fare- og ulykkessituasjoner. Beredskapen må være tilpasset infrastruktur, rullende materiell og typen og omfanget av aktivitetene som drives.»*

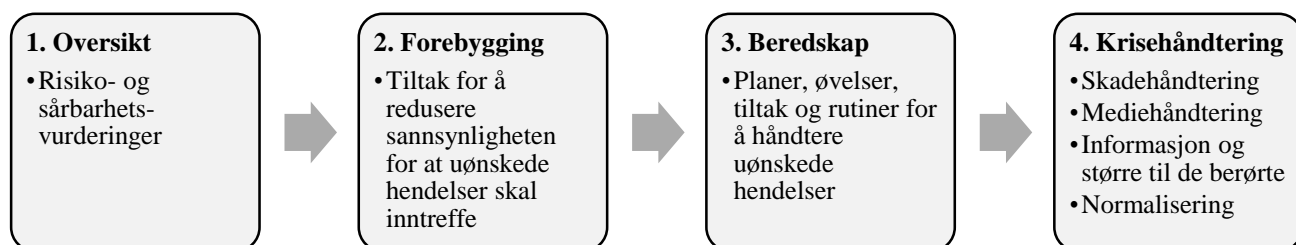
Sikkerheshåndboken beskriver Jernbaneverkets sikkerhetspolitikk som:

*«Jernbaneverket arbeider systematisk for kontinuerlig forbedring av sikkerheten for å unngå skade på mennesker, miljø og materielle skader.»*

Forebyggende og systematisk sikkerhetsarbeid skal bidra til å redusere risiko for både storulykker og individuelle ulykker med skade på egne ansatte, reisende eller andre som oppholder seg i nærheten av jernbanen (Tveraaen 2013).

Tradisjonelle beredskapsplaner dekker alle stadier av en beredskapshendelse, og består av å oppdage, varsle, bekjempe, lede, evakuere, redde og normalisere. Alle beredskapsplaner tar utgangspunkt i risikoanalyser og beredskapsanalyser der uønskede hendelser, risiko for uønskede hendelser og tilgjengelige ressurser for å håndtere hendelsen blir kartlagt (Mariathas 2013).

Figur 14 nedenfor oppsummerer en tradisjonell beredskapsprosess.



Figur 14: Beredskapsprosessen

Jernbaneløstets håndbok for vedlikehold beskriver operativ kontroll av sikkerhetskritiske forhold (Jernbaneløstet 2011). Operative tiltak i denne sammenheng vil si midlertidige tiltak som sikrer sikker togframføring. Dette kan være hyppigere inspeksjoner, nedsatt hastighet eller stengning.

Dagens trinnvise værberedskap har tre beredskapsnivå, og har som hensikt å øke beredskapen ved økende fare for sikkerhetskritiske konsekvenser som følge nedbør og issmelting. Dette er erosjonsskader, flom, flomskred, jordskred og kollaps i vannmettede fyllinger og skråninger. Beredskapsnivåene defineres som

1. **Mobiliseringsfase (gul beredskap)**: Informasjon om tilgjengelige ressurser blir innhentet og bestillinger blir gjort. Kontakt ekspertekspertise ved behov. Vurdere økt beredskap eller avslutte beredskap.
2. **Aksjonsfase (oransje beredskap)**: Økende antall visitasjoner. Kontakt med ekspertise intensiveres. Vurdere sikthastighet, økt beredskap eller senkning av beredskapen.
3. **Innføring av begrensninger (rød beredskap)**: Banen stenges. Vurdere sikthastighet eller senke beredskapsnivå.

Utover terskelverdier for nedbør må det gjøres skjønnsmessige vurderinger av sikkerhetskritiske forhold som kan påvirke faren utglidning og ras, og som dermed vil bidra til å bestemme beredskapsnivå.

Mobiliseringsfasen er en fase som bare påvirker Jernbaneløstet, der informasjon skal innhentes og tilgjengelige ressurser mobiliseres. Først i aksjonsfasen vil beredskapen kunne påvirke andre aktører gjennom hastighetsnedsettelse og ekstravisitasjoner som kan føre til forsinkelser og/eller innstillinger.





## **3 Metode**

### **3.1 Litteraturstudie**

For å undersøke metoder som kan måle krefter i sporet og overvåke problemområder gjennomføres en litteraturstudie. Det skal også undersøkes om det finnes noen sikkerhetskriterier mot solslang internasjonalt som kan brukes i arbeidet med beredskap ved solslangfare.

### **3.2 Datainnhenting**

#### **3.2.1 BaneData Innsyn**

BaneData er Jernbaneverkets IT-verktøy for styring og administrasjon av vedlikehold av infrastrukturen. BaneData inneholder data solslangtilfeller og objektspesifikasjoner på jernbanen, og kan brukes til å kartlegge problemområder på det norske jernbanenettet.

#### **3.2.2 Meteorologiske data**

Meteorologiske data kan brukes til å finne en empirisk sammenheng mellom luft- og skinnnetemperaturen. Skatval detektorstasjon på Trønderbanen er brukt til å hente ut data om skinnnetemperatur og lufttemperatur. Detektorstasjonen ligger ved kilometer 43,340 på Nordlandsbanen, ca. 1,3 km nord for Skatval stasjon og består av en varmegangsdetektor og en hjulskadedetektor. Varmegangsdetektoren måler lufttemperatur mens hjulskadedetektoren måler skinnnetemperatur. Datasettene er fra mai-august 2012, 2013 og 2014.

Høyset detektorstasjon ved kilometer 518,46 på Dovrebanen er brukt til å hente ut data om skinnnetemperatur. Stasjonen har en hjulslagdetektor som måler skinnnetemperatur, men ingen varmegangsdetektor som kan måle lufttemperatur. Data fra Statens vegvesen sin værstasjon ved Horg ca. 5 km sør for Høyset er brukt for lufttemperaturen. Tilgjengelig data fra Høyset er fra mai-august 2012 og 2013, og tilgjengelig data fra Horg er fra periodene 22.5.2012-3.7.2012 og 1.5.2013-17.6.2013.

Data om omkringliggende værforhold langs Trønderbanen kan hentes fra [eklima.no](http://eklima.no) og [senorge.no](http://senorge.no). [Eklima.no](http://eklima.no) er en gratis portal til Meteorologisk institutts klimadatabase, og

inneholder data fra alle værstasjoner som Meteorologisk institutt har i drift i dag. Senorge.no er en gratis portal som viser klimadata i Norge fra 1957, og er et samarbeid mellom NVE, met.no og Kartverket. Data fra værstasjonene til Jernbaneverket, Statens vegvesen, NVE og met.no kan hentes ut fra senorge.no.

### **3.2.3 Spørsmålsrunde**

Forespørsel sendt til de 17 banesjefene i Jernbaneverket 13.4.2015 for å få innspill til arbeidet med masteroppgaven. Se vedlegg *11.2.1 Epost sendt til banesjefene i Jernbaneverket* for forespørselen som ble sendt ut.

### 3.3 Analyse

Målet med analysen er å komme opp med et grunnlag for å kunne foreslå terskelverdier og tiltak som kan inngå i en beredskapsplan ved fare for solsllyng.

#### 3.3.1 Kartlegging av tidligere solsllyng på landsbasis

BaneData skal brukes til å finne de jernbanestrekningene som har slitt mest med solsllyngproblematikken de siste årene. Solsllyngfrekvenser (solslyng/år, solsllyng/10 km) skal utarbeides for å kunne sammenligne hvilke baner som sliter mest med solsllyngproblematikken. Andel solsllyng skal også klassifiseres etter hvilken måned de skjedde i. Det tas utgangspunkt i en 10 års periode mellom 2004-2014.

Solslyngfrekvenser (solslyng/10 km, solsllyng/år) kan finnes ved å ta utgangspunkt i strekningens lengde, antall år og antall registreringer. Denne informasjonen kan hentes fra BaneData.

Solslyng som var direkte årsak til at det skjedde avsporinger skal undersøkes, og årsaker og konsekvenser skal diskuteres. Data om avsporingene vil ta utgangspunkt i Statens havarikommisjon for transport (SHT) sine ulykkesrapporter, BaneData og Strekningsanalysen<sup>2</sup>.

#### 3.3.2 Regresjonsanalyse

Med utgangspunkt i jernbanestrekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer skal det gjennomføres en regresjonsanalyse for å kunne finne en temperaturmodell. Denne skal brukes til å praktisk forutsi skinnetemperaturen langs Trønderbanen ved en gitt lufttemperatur, og dermed bidra til å bestemme beredskapen. Ved å bruke ligning (14) skal det utarbeides et 90 % prediksjonsintervall som angir feilmarginen til prediksjonen.

---

<sup>2</sup> Strekningsanalysen: Jernbaneverkets interaktive sikkerhetsverktøy for uønskede hendelser og risikovurderinger. Kan også søke i Synergi fra Strekningsanalysen som er Jernbaneverkets database for uønskede hendelser.

### **3.3.3 Kartlegging av tidligere solslyng langs Trønderbanen**

Tidligere solslyng/-tendens langs Trønderbanen skal kartlegges og temperaturmodellene fra regresjonsanalysen skal brukes til å estimere hva skinnnetemperaturen var når solslyng oppstod. Alle solslyng eller solslyngtendenser registrert i BaneData har en kilometerangivelse. Ved å plote hvor solslyng har skjedd i Jernbaneverkets kartvisning og sammenligne med kart over værstasjoner fra senorge.no, så kan nærmeste værstasjon finnes. Temperaturdata kan hentes ut fra disse værstasjonene, og skinnnetemperaturen kan dermed estimeres fra forholdet mellom luft- og skinnnetemperaturen gitt av regresjonsanalysen.

I tillegg til estimert skinnnetemperatur, skal det undersøkes om tidligere solslyng/-tendens kan settes i sammenheng med sporvedlikehold, sporets tilstand og kurvatur. På den måten kan det undersøkes om det finnes noen trender for når solslyng skjer spesifikt for Trønderbanen. Data om maskinelt sporvedlikehold (pakking) og sporets tilstand (tilstand på ballast og type befestigelse) kan hentes fra objektspesifikasjoner i BaneData.

### **3.3.4 Spørsmålsrunde**

I følge Jernbaneverkets håndbok for vedlikehold, så skal eier av infrastrukturen til enhver tid ha oversikt over sikkerkrisiske forhold og gjeldende operative tiltak. Det gjøres derfor en spørsmålsrunde til banesjefene for å kartlegge langsiktige og umiddelbare tiltak for å redusere faren for solslyng, samt å få konkrete innspill til utformingen av en mulig beredskapsplan ved fare for solslyng.

### **3.3.5 Forslag til beredskap**

Figur 14 viser en tradisjonell beredskapsprosess. Denne masteroppgaven skal foreslå tiltak som gjør at solslyngfare ikke utvikler seg til en ulykkessituasjon, og vil dermed bestå av punkt 1 og 2 i figuren. Det må foreslås tiltak som reduserer den akutte faren for solslyng, men også langsiktige tiltak som vil forebygge solslyng og skape en mer robust jernbane. De akutte tiltakene vil inngå i den trinnvise beredskapen med tilhørende terskelverdier som avgjør beredskapsnivå, og med en klar ansvarsfordeling.

## 4 Litteraturstudie

I litteraturstudien fokuseres det på ulike metoder for å måle de aksiale kreftene i skinnene. I kapittel 2.1 *Krefter i helsveist spor* er det klart at krefter i sporet kan dannes på flere måter, men den største faren for utkneking av sporet er temperaturindusert krefter. For å kunne beregne den temperaturinduserte aksiallasten må nøytraltemperaturen og skinnnetemperaturen være kjent. I kapittel 2.2.2 *Nøytraltemperatur* ble det klart at nøytraltemperaturen kan endres over tid og dette betyr at man mister noe av kontrollen over kreftene i sporet. Man har i dag god kunnskap om hvordan nøytraltemperaturen er når skinnene sluttsveises, men kunnskap om hvordan nøytraltemperaturen forandrer seg over tid er derimot begrenset.

Litteraturstudien fokuserer derfor på metoder for å måle skinnnetemperatur og nøytraltemperatur. Det skal også undersøkes om det finnes sikkerhetskriterier mot solsløng siden det kan ha relevans for bestemmelse av beredskap ved solsløngfare.

Det finnes flere metoder for å måle krefter i skinnene i dag. Det er imidlertid flere ulemper ved disse metodene, for eksempel omfattende arbeidsprosedyrer eller at målingene lett påvirkes av andre faktorer. Det vil være store fordeler ved å kunne måle spenninger i skinnene under kjøring, samt med en sensitivitet stor nok til å håndtere effektene fra endrede elastisiteter i overbygningen, temperaturer og mikrostrukturer i skinneoverflaten (Fateh 2010). I tillegg til at metoden ikke bør være destruktiv, så bør målesystemet være portabelt, enkelt å montere og ikke kreve forandring eller avmontering av spor komponenter (Read 2010).

## 4.1 Metoder for å måle skinne- og nøytraltemperatur

### 4.1.1 Skinntemperatur

Skinntemperaturen vil ha en direkte påvirkning på de temperaturinduserte kreftene i et helsveist spor. Ved kjent nøytraltemperatur vil det være nok å vite skinntemperaturen for å kunne beregne kreftene i sporet, og dermed avgjøre hvor stor faren for solslyng er.

Det finnes flere produkter som kan måle skinntemperatur på en god og effektiv måte. Et eksempel er Rail Temperature Monitor Units (RTMU) som monteres under skinnefoten og har tilførsel av strøm fra batterier. Disse måler skinntemperaturen og kan varsle høye eller lave skinntemperaturer ved å sende e-post eller tekstmelding, og kan kommunisere over GSM-nettet til internettservere som kan logge temperaturdata. Systemet er enkelt å montere og krever lite vedlikehold, og har en brukstid på 6-24 måneder avhengig av batteribruk. Se vedlegg 11.6 *RTMU produktspesifikasjoner* for et eksempel på slike produkter.

Andre metoder for å måle skinntemperaturer kan oppsummeres som (Cai 2015):

- **Regulære skinnetermometre:** Disse termometrene er svært enkle i bruk og kan monteres rett på skinnesiden. De kan måle temperaturer fra ca.  $-40\text{ °C}$  til ca.  $+70\text{ °C}$  med en feil på  $\pm 1\text{ °C}$ . Ulempen er at avlesning må gjøres manuelt og ved montering så må overflaterusten på skinnesiden fjernes.
- **Termometre basert på infrarød teknologi:** Enkelt, håndholdt termometer som måler punktoverflatetemperatur ved infrarød teknologi. Måleområdet for de fleste målerne er  $-20\text{ °C}$  -  $+200\text{ °C}$  og har en målefeil på  $\pm 1,5\text{ °C}$ . Dette er målere som er rimelige og lett tilgjengelig, men ulempen er at det er arbeidskrevende og krever manuelt arbeid ved hver måling. De har også en relativt stor målefeil.
- **Resistansmåling av skinntemperatur, RTD (Resistance Temperature Detector):** Måler temperatur basert på motstand i skinnene. Platinium er det beste materialet for slike sensorer på grunn av at forholdet mellom temperatur og motstand er lineært og gjelder for et stort temperaturspenn. RTD kan måle temperaturer fra ca.  $-50\text{ °C}$  til ca.  $400\text{ °C}$ , og har høy presisjon og kan innhente data i sanntid. Ulempen med systemet er at det er dyrt, har lang installasjonstid og brukstiden er kort.

#### 4.1.2 Nøytraltemperatur

Nøytraltemperaturen kan endre seg over tid. Dette kan skje på grunn blant annet av sideforskyvning av sporet eller skinnvandring, og det kan være vanskelig å vite hvor mye nøytraltemperaturen har endret seg. Nøytraltemperaturen måles hovedsakelig på to måter:

1. Indirekte måling ved kontroll av sidebeliggenhet til sporet opp imot VUL/GVUL
2. Direkte måling av nøytraltemperaturen

Varig utfesting av linjen (VUL) og geodetisk varig utfesting av linjen (GVUL) har som formål å definere og etablere sporets beliggenhet i et ytre referansesystem. VUL baserer seg på at sporets teoretiske beliggenhet refereres som relativ beliggenhet til egne VUL-merker langs sporet. GVUL baseres på at sporets teoretiske beliggenhet defineres som en matematisk linjeberegning, koordinatfestet og et geodetisk fastmerkenetts referansesystem (Infrastruktur Vedlikehold 2014). Ved å kontrollere sporets beliggenhet opp imot en kjent posisjon, kan endring av horisontalgeometrien bestemmes. Ligning (12) gir da endringen i nøytraltemperatur som følge av en endring,  $\Delta R$ , i horisontalgeometrien.

Tradisjonelt har nøytraltemperaturen blitt kontrollert ved å kappe skinnene slik at trykkreftene reduseres. Sporet bakses deretter tilbake i riktig leie før det sluttveises på nytt når temperaturen er innenfor nøytraltemperaturområdet. På steder der man har hatt solslyng eller solslyngtendenser, bør det vurderes tiltak for å bedre sikkerheten. Sporet skal da nøytraliseres på nytt og nøytraltemperaturen bør ligge i den øvre delen av nøytraltemperaturområdet. Eksempelvis så har man ved km 432,849 til km 435,855 mellom Voss og Bergen fått dispensasjon til å legge nøytraltemperaturen så høy som 30 °C (Schive 2009). Dette er et sted der skinnnetemperaturen kan beregnes å komme opp til 50 °C, samt at det er et relativt mildt vinterklima som gjør at strekkspenningene om vinteren ikke blir for store.

VERSE (Vertical Rail Stiffness Equipment) er en ikke-destruktiv metode som kan brukes til å måle nøytraltemperaturen i kurver med radius ned til 600 meter (Jernbaneverket 2012). Metoden innebærer å løsne befestigelsen 15 meter til hver side av målepunktet, og så løfte skinnen opp med VERSE-apparatet med en kraft på 10 kN. VERSE måler skinnens bøyerespons og bruker det som et mål på den longitudinelle kraften i skinnen. VERSE kan anvendes når skinnnetemperaturen ligger innenfor temperaturintervallet -5°C - +13 °C, men ikke når det forventes raske endringer i skinnnetemperaturen.

MAPS (Magnetic Anisotropy and Permeability System) er en teknologi som måler effekten av spenninger på de magnetiske egenskapene til et ferromagnetisk materiale. MAPS-SFT (MAPS – Stress Free Temperature) er et portabelt, ikke-destruktivt, magnetisk system som måler totalspenningene i skinnen, noe som inkluderer både de termiske spenningene og residualspenningene fra da skinnene ble laget (Read 2010). Nøytraltemperaturen kan bestemmes dersom disse residualspenningene kan filtreres bort. Residualspenninger i skinner har vist seg å variere i stor grad og kan ikke predikeres på en god måte. Det har imidlertid vist seg at generelle karakteristika er mulig å finne, og arbeid i lab har vist at det finnes et forhold mellom de vertikale og longitudinelle komponentene av residualspenningene (Hayes 2008). De longitudinelle residualspenningene som kan dermed beregnes dersom vertikalspenningene måles, og de temperaturinduserte spenningene kan beregnes.

D'stresen (Read and Shust 2007) identifiserer at vibrasjonsamplituden til skinnen er proporsjonal med de longitudinelle kreftene i skinnen, men dette gjelder kun når skinnen er strekkbelastet. D'stresen-systemet er basert på måling av dynamisk resonans under 90 Hz for skinnen. Utstyret må plasseres på skinnen og gjør at all togtrafikk må stoppes, og utstyret er svært sensitivt for variasjoner i kraftoverføringen mellom befestigelse og sville, eksempelvis variasjoner i klemkraften fra befestigelsen. Skinnene må imidlertid ikke kappes og befestigelsen behøver ikke å løsnes.

Akustoelastisk måling av skinnespenninger har vært kjent i over 30 år (Nucera 2012). Metoden er basert på at hastigheten til ultralydbølger forandres med økte skinnespenninger. Overflatebølger (Rayleigh) i frekvensområdet  $\sim$ MHz brukes vanligvis. Det største problemet med denne teknikken er at variasjonen i bølgehastighet har svært lav sensitivitet ( $\sim$ 0,1 % hastighetsforandring pr. GPa spenningsendring i skinnestål). Dette gjør at påvirkning i bølgehastigheten fra andre parametere (temperaturvariasjoner og variasjoner i mikrostruktur) ofte maskeres som skinnespenninger.



### 4.1.3 Aktuelt for Jernbaneløst?

Løsningene beskrevet i kapittel 4.1.1 *Skinnetemperatur* og 4.1.2 *Nøytraltemperatur* kan være aktuelle for Jernbaneløst. For måling av skinnetemperaturen kan en god løsning være å plassere ut RTMUer som kan sende ut data om skinnetemperatur i sanntid til værberedskapen. Disse målerne kan plasseres ut på våren ved utsatte steder, for eksempel etter sporarbeider som påvirket sporets stabilitet eller der det var solsløng/tilløp til solsløng foregående år.

Ved måling av nøytraltemperaturen har Jernbaneløst i dag en prosedyre for gjennomføring av målinger med VERSE<sup>3</sup>. Dette tyder på at VERSE er en innarbeidet prosedyre i Jernbaneløst. Videre er det ikke alle strekninger som har fått opprettet VUL/GVUL, eller at det ikke er fullført. Eksempelvis så har Røros- og Solørbanen ikke VUL i dag. Et ferdig fastmerkenett for hele jernbaneløstet er planlagt å være ferdig innen 2020 (Infrastruktur Vedlikehold 2014). Et godt fastmerkenett vil gjøre det mulig å foreta kontrollmålinger av sporets horisontalgeometri og dermed kontrollere om nøytraltemperaturen har forandret seg som følge av sideveis forskyvning av sporet.

Jernbaneløst Område Nord<sup>4</sup> ønsker å plassere ut temperaturmålere på Nordlandsbanen før sommervarmen slår inn. Disse kan fortløpende sende temperaturdata til værberedskapen. I tillegg kan det plasseres ut manuelle målere som plasseres nærme bilveier slik at de enkelt kan leses av. Temperaturmålerne er tenkt å plasseres ut på problemområder der man har slitt med solsløngproblematikk. Figur 15 viser hvor Jernbaneløst<sup>5</sup> ønsker å plassere temperaturmålere på Nordlandsbanen. Tabell 4 viser kilometerangivelse og begrunnelse for valg av plassering av temperaturmålere på Nordlandsbanen.

---

<sup>3</sup>[https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsveist\\_spor/Vedlegg/Prosedyre\\_for\\_bruk\\_av\\_VERSE\\_m%C3%A5lemetode\\_for\\_fastsetting\\_av\\_n%C3%B8ytraltemperatur\\_i\\_helsveiste\\_skinner](https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsveist_spor/Vedlegg/Prosedyre_for_bruk_av_VERSE_m%C3%A5lemetode_for_fastsetting_av_n%C3%B8ytraltemperatur_i_helsveiste_skinner)

<sup>4</sup> Område Nord er banestrekningen fra Steinkjer til Bodø og Ofotbanen

<sup>5</sup> I følge Terje Bjørhusdal fra Jernbaneløst



Figur 15: Ut plassering av temperaturmålere på Nordlandsbanen

Tabell 4: Ønsket plassering av temperaturmålere på Nordlandsbanen

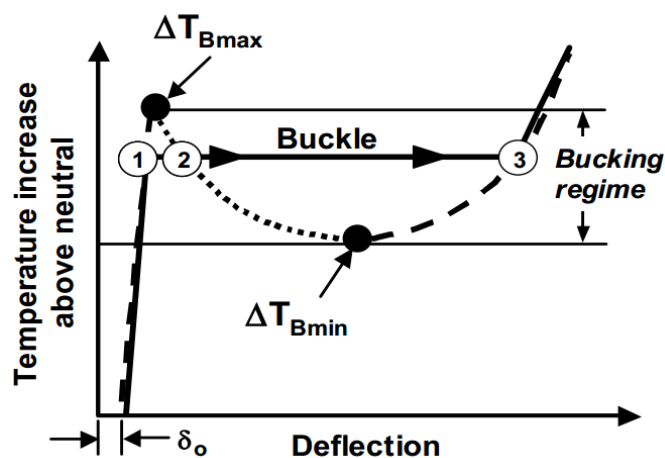
Ref. på Figur 15	Km	Begrunnelse
1	340.5	Utilgjengelig plass, tendenser til solslyng tidligere
2	414.3	Utsatt plass
3	448.2	Utilgjengelig plass, tendenser til solslyng tidligere

## 4.2 Sikkerhetskriterier mot utknekking

Sikkerhetskriteriene som er undersøkt tar utgangspunkt i den minimale og maksimale temperaturøkningen over nøytraltemperatur,  $\Delta T_{Bmin}$  og  $\Delta T_{Bmax}$ . Ved maksimal temperaturøkning vil det skje en utknekking, mens ved minimal temperaturøkning er det en energibarriere tilstede. Det vil si at ved minimal temperaturøkning, så må sporet tilføres energi for at det skal skje en utknekking. Sikkerhetskriteriene kan beskrives ved følgende betingelser (Kish and Samavedam 2013):

- Den tillatte temperaturøkningen over nøytraltemperaturen kan ikke være større enn den laveste utknekkingstemperaturen,  $\Delta T_{Bmin}$ , på grunn av muligheten for utknekking over denne skinnnetemperaturen.
- En tilstrekkelig energibarriere bør være tilstede ved  $\Delta T_{Bmin}$  dersom denne temperaturen brukes som den tillatte skinnnetemperaturen.
- Dersom differansen mellom  $\Delta T_{Bmin}$  og  $\Delta T_{Bmax}$  er mindre enn  $10\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $\approx 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), så må det innføres en sikkerhetsfaktor,  $SF$ , på  $\Delta T_{Bmin}$  for å redusere sannsynligheten for utknekking.

Figur 16 viser at dersom skinnene blir varmet opp til  $\Delta T_{Bmax}$  over nøytraltemperaturen, så er skinnene i en ustabil tilstand og kan knekke ut til tilstand 3 uten tilførsel av ekstra energi. Dersom skinnene er varmet opp til mellom  $\Delta T_{Bmin}$  og  $\Delta T_{Bmax}$ , så må det tilføres ekstra energi for at det skal skje en lateral forskyvning til tilstand 1, 2 eller 3.



Figur 16: Temperaturøkning over NT og utknekking (Kish and Samavedam 2013)

I følge Kish og Samavedam kan den maksimale tillatte temperaturøkningen over nøytral oppsummeres som:

$$\Delta T_{all} = \begin{cases} \Delta T_{B_{min}}; & \text{for } (\Delta T_{B_{max}} - \Delta T_{B_{min}}) > 10^{\circ}F \\ \Delta T_{B_{min}} - SF; & \text{for } (\Delta T_{B_{max}} - \Delta T_{B_{min}}) < 10^{\circ}F; 0 \leq SF \leq 10^{\circ}F \\ \Delta T_p - 10^{\circ}F; & \text{for } \Delta T_{B_{max}} = \Delta T_{B_{min}} = \Delta T_p; \text{ Progressiv utknekking} \end{cases} \quad (15)$$

Videre beskriver de en sikkerhetsmargin mot utknekking (*BSM* – Buckling Safety Margin). *BSM* er et mål på «reservestyrken» mot utknekking for et spor med gitt nøytraltemperatur og skinnnetemperatur, og forteller hvor nærme skinnnetemperaturen er den tillatte temperaturen.

$$BSM = \Delta T_{all} - (T_R - T_N) \quad (16)$$

Tabell 5 nedenfor oppsummerer grenseverdiene for *BSM* fra Kish og Samavedam.

Tabell 5: Sikkerhetsmargin mot utknekking (*BSM*). Fra (Kish and Samavedam 2013)

Margin	<i>BSM</i> [°F]	<i>BSM</i> [°C]	Sannsynlighet for utknekking
Ingen margin	< 0	< 0	Svært høy
Minimum margin	0-20	0-11	Høy
Tilstrekkelig margin	20-40	11-22	Middels
Ønsket margin	> 40	> 22	Lav

(Esveld 1998) og (Esveld 1998) beskriver sikkerhetsmarginer ved bruk av beregningsprogrammene CWERRI og CWR Buckle. CWERRI er et program som er utviklet ved TU Delft i Nederland, og kan brukes til å modellere den longitudinelle, vertikale og laterale responsen til et helsveist spor. CWR Buckle er et program som er utviklet av Volpe Centre og Department of Transportation i USA, og kan brukes til å modellere energien som trengs for å knekke ut sporet, for eksempel energien fra et passerende tog.

$T_{allow}$  er den maksimale tillatte skinnnetemperaturen over nøytraltemperaturen som regnes som trygg, altså at solsløyng ikke inntreffer.  $T_{allow}$  kan sees på som en buffer for mange årsaker til at skinnnetemperaturen øker eller en ekvivalent økning i trykkreftene i skinnene skjer. Dette kan f.eks. være lufttemperatur, solinnstråling, bremskrefter og endring av nøytraltemperatur.

CWERRI gir en  $T_{allow}$  på

$$T_{allow} = T_{Bmin} + 0,25 \cdot (T_{Bmax} - T_{Bmin}) \quad (17)$$

CWR Buckle definerer  $T_{allow}$  på samme måte som i CWERRI, men definerer  $T_{allow}$  som den temperaturen hvor energien som trengs for å knekke ut sporet er 50 % av energien som trengs for å knekke ut sporet ved  $T_{Bmin}$ . På bakgrunn av beregninger i CWERRI og CWR Buckle, så har ERRI (European Railway Research Institution) foreslått følgende sikkerhetskriterier mot utknekkning av sporet:

$$T_{allow} = \begin{cases} T_{Bmin} + 25\% \text{ av } \Delta; & \text{dersom } \Delta > 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{Bmin}; & \text{dersom } 5^\circ\text{C} < \Delta < 20^\circ\text{C} \\ T_{Bmin} - 5 \text{ }^\circ\text{C}; & \text{dersom } 0 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta < 5 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Der } \Delta = T_{Bmax} - T_{Bmin}$$

Esveld konkluderer med at et sikkerhetskriterium basert på  $T_{Bmax}$  ikke er akseptabelt og et sikkerhetskriterium basert på  $T_{Bmin}$  er for konservativt. Han anbefaler sikkerhetskriteriet som korresponderer til en reservestyrke på om lag 50 % av den totale utknekkingsenergien ved  $T_{Bmin}$ .

Tabell 6 viser tiltak ved høye temperaturer i Storbritannia. Det er innført hastighetsreduksjoner basert på kritiske skinnnetemperaturer over nøytraltemperaturen og hvilken tilstand ballasten er i. Den kritiske skinnnetemperaturen vil ikke være konstant i løpet av sommeren. Dersom den kritiske temperaturen inntreffer tidlig på sommeren og et antall solslyng skjer, så er ikke mer solslyng forventet før temperaturen overgår det tidligere maksimum. Nøytraltemperaturen (NT) i Storbritannia er 27 °C (Chapman, Thornes et al. 2008).

Tabell 6: Tiltak ved høye temperaturer i Storbritannia (Chapman, Thornes et al. 2008)

Sporets tilstand	Standby	30/60 mph hastighetsreduksjon	20 mph hastighetsreduksjon
God tilstand	NT + 32 °C	NT + 37 °C	NT + 42 °C
Utilstrekkelig ballast	NT + 10 °C	NT + 13 °C	NT + 15 °C

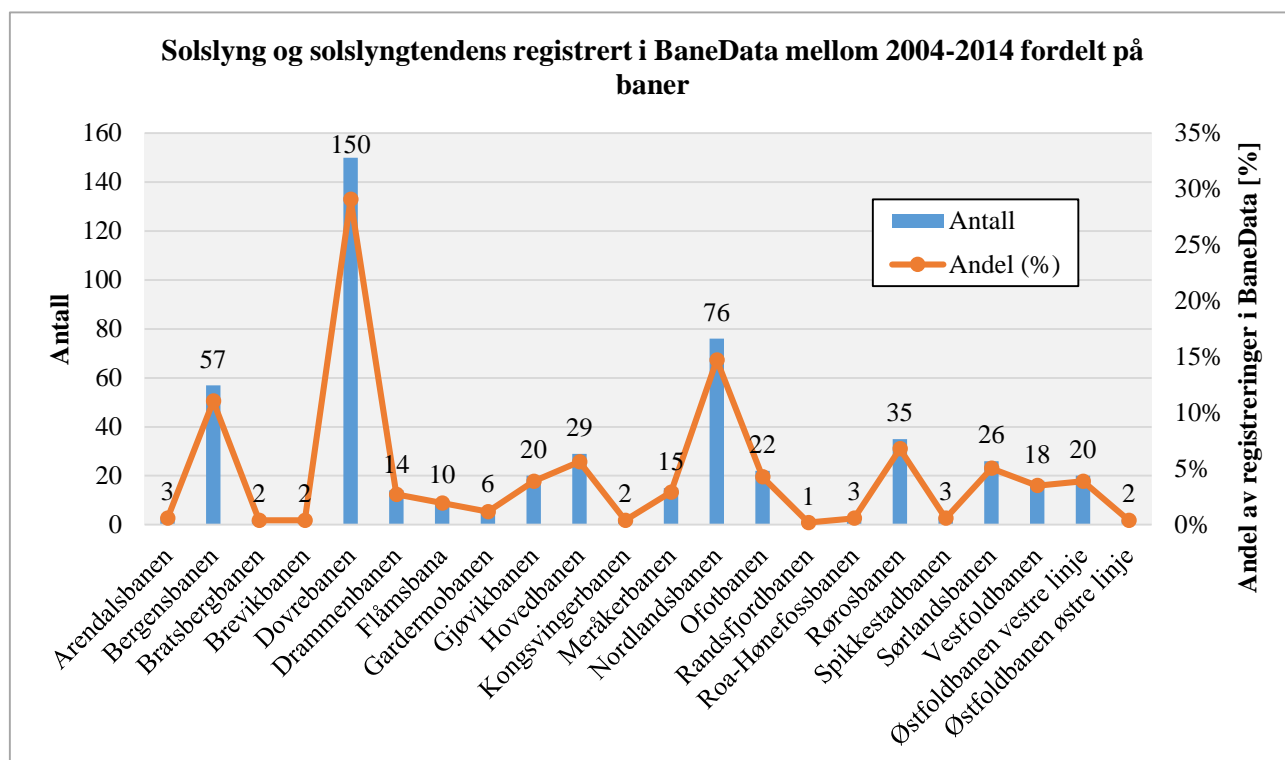


## 5 Resultater

I dette kapitlet skal et grunnlag for å kunne foreslå beredskap ved fare for solsllyng utarbeides.

### 5.1 Kartlegging av tidligere solsllyng på landsbasis

Data fra BaneData brukes for å kartlegge hvilke baner og banestrekninger som har slitt mest med solsllyngproblematikken de siste ti årene.

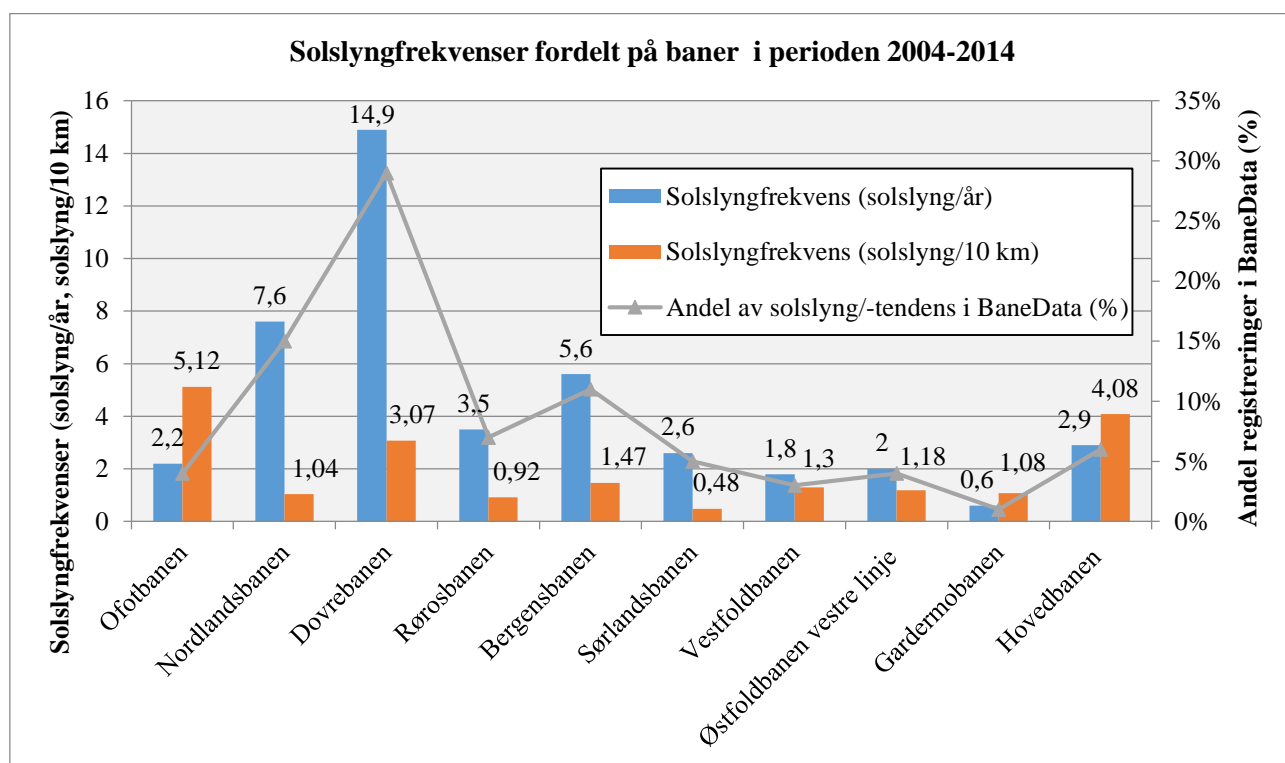


Figur 17: Antall solsllyngfeil registrert i BaneData mellom 2004-2014 fordelt på baner

Figur 17 viser at i en 10 års periode mellom 2004 og 2014, så skiller Dovrebanen (29 %), Nordlandsbanen (15 %) og Bergensbanen (11 %) seg ut med flest registrerte solsllyng eller tilløp til solsllyng i BaneData.

### 5.1.1 Solslyngfrekvenser

Solslyngfrekvenser kan brukes til å sammenligne ulike baner på likt grunnlag. Det er sett på solsllyngfrekvensene til Ofotbanen, Nordlandsbanen, Dovrebanen, Rørosbanen, Bergensbanen, Sørlandsbanen, Vestfoldbanen, Østfoldbanen vestre linje, Gardermobanen og Hovedbanen over en 10 års periode mellom 2004-2014.



Figur 18: Solslyngfrekvens fordelt på baner

Figur 18 viser at Dovrebanen har høyest frekvens av solsllyng/-tendens i løpet av året med 14,9 solsllyng/år, mens det er Ofotbanen som strekningsvis har den høyeste frekvensen av solsllyng/-tendens med 5,12 solsllyng/10 km. Videre utmerker Hovedbanen og Dovrebanen seg med strekningsvise frekvenser på henholdsvis 4,08 solsllyng/10 km og 3,07 solsllyng/10 km. Bergensbanen, Nordlandsbanen og Rørosbanen utmerker seg med høy årlig frekvens av solsllyng med henholdsvis 5,6 solsllyng/år, 7,6 solsllyng/år og 3,5 solsllyng/år.



Tabell 7: Solslyngfrekvenser Ofotbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Narvik havn - Vassijaure	42,99	22	100 %	2,2	5,12
Totalsum	42,99	22	100 %	2,2	5,12

Tabell 8: Solslyngfrekvenser Nordlandsbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Trondheim - Hell	31,54	1	1 %	0,1	0,32
Hell - Steinkjer	93,96	13	17 %	1,3	1,38
Steinkjer - Grong	94,04	2	3 %	0,2	0,21
Grong - Majavatn	102,2	23	30 %	2,3	2,25
Majavatn - Mosjøen	84,27	6	8 %	0,6	0,71
Mosjøen - Bjerka	62,67	9	12 %	0,9	1,44
Bjerka - Lønsdal	133,47	11	14 %	1,1	0,82
Lønsdal - Fauske	72,08	5	7 %	0,5	0,69
Fauske - Bodø	54,52	6	8 %	0,6	1,10
Totalsum	728,75	76	100 %	7,6	1,04

Tabell 9: Solslyngfrekvenser Dovrebanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Eidsvoll - Hamar	57,96	41	28 %	4,1	7,07
Hamar - Fåberg	65,37	64	43 %	6,4	9,79
Fåberg - Vinstra	74,63	4	3 %	0,4	0,54
Vinstra - Dombås	76,53	24	16 %	2,4	3,14
Dombås - Hjerkin	38,73	3	2 %	0,3	0,77
Hjerkin - Oppdal	47,87	5	3 %	0,5	1,04
Oppdal - Støren	70,39	2	1 %	0,2	0,28
Støren - Trondheim	53,48	6	4 %	0,6	1,12
Totalsum	484,95	149	100 %	14,9	3,07

Tabell 10: Solslyngfrekvenser Rørosbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Hamar - Elverum	32,23	0	0 %	0	0,00
Elverum - Koppang	88,27	6	17 %	0,6	0,68
Koppang - Tynset	99,85	14	40 %	1,4	1,40
Tynset - Røros	52,37	0	0 %	0	0,00
Røros - Haltdalen	54,05	6	17 %	0,6	1,11
Haltdalen - Støren	55,30	9	26 %	0,9	1,63
<b>Totalsum</b>	<b>382,07</b>	<b>35</b>	<b>100 %</b>	<b>3,5</b>	<b>0,92</b>

Tabell 11: Solslyngfrekvenser Bergensbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Hønefoss - Trolldalen	38,55	17	30 %	1,7	4,41
Trolldalen - Ål	99,67	20	36 %	2	2,01
Ål - Haugastøl	45,79	7	13 %	0,7	1,53
Haugastøl - Finse	28,45	1	2 %	0,1	0,35
Finse - Reimegrend	60,53	4	7 %	0,4	0,66
Reimegrend - Voss	22,66	6	11 %	0,6	2,65
Voss - Dale	39,63	1	2 %	0,1	0,25
Dale - Bergen	45,38	0	0 %	0	0,00
<b>Totalsum</b>	<b>380,65</b>	<b>56</b>	<b>100 %</b>	<b>5,6</b>	<b>1,47</b>

Tabell 12: Solslyngfrekvenser Sørlandsbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Gulskogen - Hokksund	15,23	0	0 %	0	0,00
Hokksund - Kongsberg	26,71	19	73 %	1,9	7,11
Kongsberg - Nordagutu	48,50	2	8 %	0,2	0,41
Nordagutu - Nelaug	135,49	4	15 %	0,4	0,30
Nelaug - Kristiansand	86,23	1	4 %	0,1	0,12
Kristiansand - Egersund	158,35	0	0 %	0	0,00
Egersund - Stavanger	72,19	0	0 %	0	0,00
Ganddal godsterminal	1,83	0	0 %	0	0,00
<b>Totalsum</b>	<b>544,52</b>	<b>26</b>	<b>100 %</b>	<b>2,6</b>	<b>0,48</b>

Tabell 13: Solslyngfrekvenser Vestfoldbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Drammen - Larvik	105,11	14	78 %	1,4	1,33
Larvik - Eidanger	32,96	4	22 %	0,4	1,21
Totalsum	138,07	18	100 %	1,8	1,30

Tabell 14: Solslyngfrekvenser Østfoldbanen vestre linje 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Oslo S - Ski	23,18	8	40 %	0,8	3,45
Ski - Moss	35,89	2	10 %	0,2	0,56
Moss - Sarpsborg	51,59	3	15 %	0,3	0,58
Sarpsborg - Kornsjø	58,25	7	35 %	0,7	1,20
Totalsum	168,92	20	100 %	2	1,18

Tabell 15: Solslyngfrekvenser Gardermobanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Oslo S - Gardermoen	51,33	4	67 %	0,4	0,78
Gardermoen - Eidsvoll	4,45	2	33 %	0,2	4,49
Totalsum	55,78	6	100 %	0,6	1,08

Tabell 16: Solslyngfrekvenser Hovedbanen 2004-2014

Banestrekning	Lengde (km)	Antall	Andel (%)	Frekvens (solslyng/år)	Frekvens (solslyng/10 km)
Oslo S	3,79	9	31 %	0,9	23,75
Lodalen	1,138	2	7 %	0,2	17,57
Alnabru skiftestasjon	6,293	1	3 %	0,1	1,59
Loenga	2,062	0	0 %	0	0,00
Oslo S - Aker	6,539	2	7 %	0,2	3,06
Aker - Lillestrøm	10,676	6	21 %	0,6	5,62
Lillestrøm - Eidsvoll	40,558	9	31 %	0,9	2,22
Totalsum	71,056	29	100 %	2,9 (1,8)*	4,08 (2,53)*

\*Solslyngfrekvenser i parentes ekskluderer Oslo S og Lodalen

I tabell 7-16 har solslyngfrekvensene til de ulike strekningene på Ofotbanen, Nordlandsbanen, Dovrebanen, Rørosbanen, Bergensbanen, Sørlandsbanen, Vestfoldbanen, Østfoldbanen vestre linje, Gardermobanen og Hovedbanen blitt undersøkt for de siste ti årene for å finne hvilke banestrekninger som skiller seg ut.

Oslo S har en svært høy solslyngfrekvens på 23,75 solslyng/10 km. Den strekningsvise solslyngfrekvensen (solslyng/10 km) må imidlertid sees i sammenheng med den årlige frekvensen (solslyng/år). Oslo S har en årlig frekvens på 0,9 solslyng/år, noe som er på lik linje sammenlignet med andre banestrekninger. Det samme gjelder for Lodalen som har en årlig frekvens på 0,2 solslyng/år. Grunnen til at disse strekningene tilsynelatende har så høye frekvenser (solslyng/10 km) er at antall spormeter er langt større enn strekningenes lengde. Det er svært mange spor ved Oslo S og Lodalen av varierende kvalitet som brukes til hensetting og vedlikehold. Ved å ekskludere Oslo S og Lodalen blir solslyngfrekvensene for Hovedbanen 1,8 solslyng/år og 2,53 solslyng/10 km.

Dovrebanen, og spesielt strekningene Eidsvoll-Hamar og Hamar-Fåberg har høye solslyngfrekvenser, og skiller seg sammen med Ofotbanen ut fra de andre banene med de høyeste årlige og strekningsvise solslyngfrekvensene. Eidsvoll-Hamar har solslyngfrekvenser på 4,1 solslyng/år og 7,07 solslyng/10 km, mens Hamar-Fåberg har solslyngfrekvenser på 6,4 solslyng/år og 9,79 solslyng/10 km. Disse to strekningene står for 71 % av alle registrerte solslyng eller solslyngtendenser i BaneData på Dovrebanen mellom 2004-2014. Dovrebanen sett under ett har solslyngfrekvenser på 14,9 solslyng/år og 3,07 solslyng/10 km.

Dovrebanen har store utfordringer knytt til drenering og banenes stabilitet. Mange av stikkrennene og linjegrøftene på Dovrebanen har for liten kapasitet til å ta unna vann ved store nedbørsmengder. Det har de siste årene vært store problemer for Dovrebanen gjennom Gudbrandsdalen på grunn av flom og ras. Dette kan være svært skadelig for banelegemet, og det har skjedd utglidninger av underbygningen som følge av for store vannmengder. Flom kan regelrett vaske bort hele sporet eller deler av sporet, samt at store mengder finstoff kan blandes inn i overbygningen. Redusert kvalitet på ballasten og tilførsel av store vannmengder reduserer den laterale sideforskyvningsmotstanden og faren for at solslyng skjer øker.

Ofofbanen har solslyngfrekvenser på 5,12 solslyng/10 km og 2,2 solslyng/år. Banen kjennetegnes som landets tyngste trafikkerte bane der malmtogene fra Kiruna utgjør hoveddelen av trafikken. Banen går fra Narvik havn til riksgrensen og er 43 km lang. Største tillatte aksellast er 30 tonn og det kjøres 10-12 malmtog i hver retning hver døgn. Svært høy belastning stiller store krav til sporets stabilitet, og høye aksellaster kan forårsake løftebølger foran og bak akslene som midlertidig reduserer sporets sideforskyvningsmotstand.

På Ofofbanen er det stigning omtrent helt til riksgrensen og det er tresviller med Hey-Back befestigelser på nesten hele strekningen med unntak av nyere bygd kryssingsspor med betongsviller. Lokomotivene som brukes er svært sterke og tunge, og de påfører sporet store bremskrefter. Det er også registrert svært stor traksjon fra lokomotivene i oppoverbakke som bidrar til økte akselerasjonskrefter i sporet<sup>6</sup>. Dette gjør at skinnevandring blir et problem, og som nevnt i kapittel 2.2.2 *Nøytraltemperatur* fører det til at nøytraltemperaturen kan endres. Redusert nøytraltemperatur gjør at man mister kontrollen over kreftene i sporet og muliggjør solslyng ved lavere temperaturer.

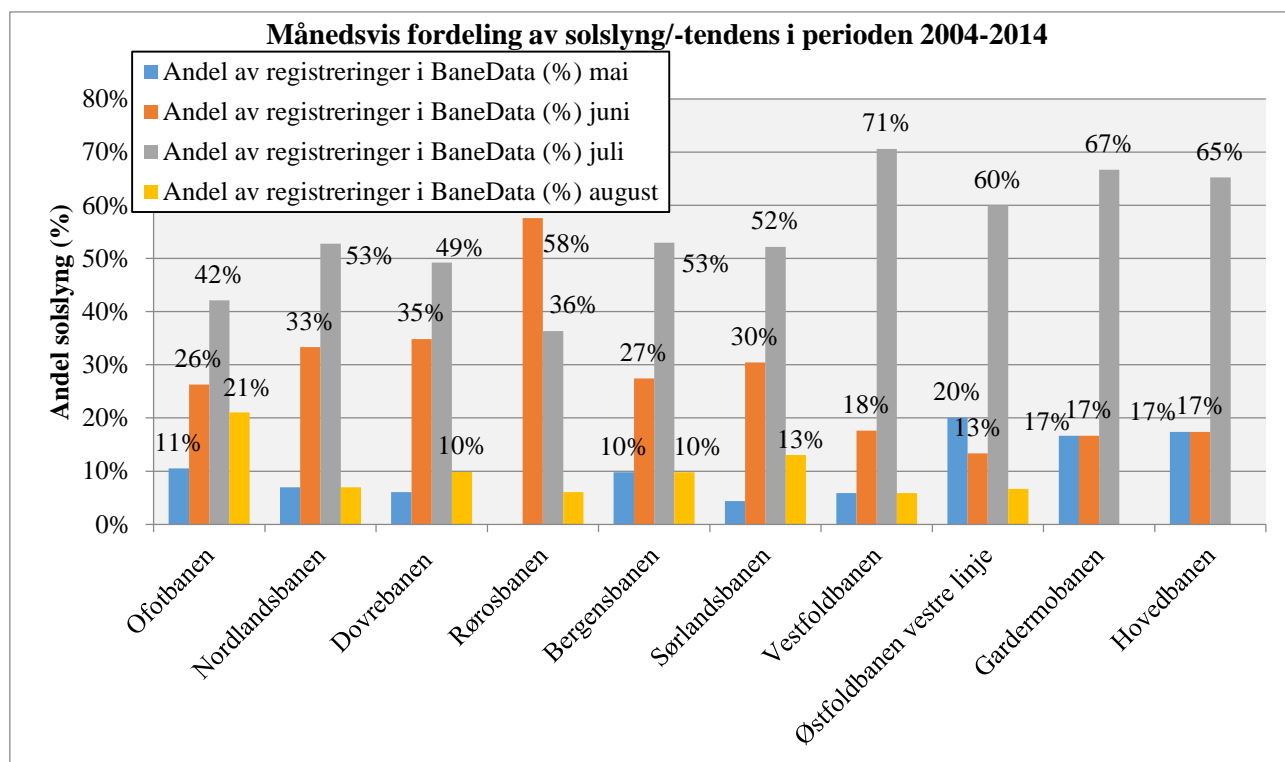
---

<sup>6</sup> I følge veileder Alf Helge Løhren

## 5.1.2 Månedsvise fordeling av solsløyg/-tendens

Tabell 17: Månedsvise fordeling av solsløyg og solsløygendens i perioden 2004-2014

Bane	Andel (%) mai	Andel (%) juni	Andel (%) juli	Andel (%) august
Ofofbanen	11 %	26 %	42 %	21 %
Nordlandsbanen	7 %	33 %	53 %	7 %
Dovrebanen	6 %	35 %	49 %	10 %
Rørosbanen	0 %	58 %	36 %	6 %
Bergensbanen	10 %	27 %	53 %	10 %
Sørlandsbanen	4 %	30 %	52 %	13 %
Vestfoldbanen	6 %	18 %	71 %	6 %
Østfoldbanen vestre linje	20 %	13 %	60 %	7 %
Gardermobanen	17 %	17 %	67 %	0 %
Hovedbanen	17 %	17 %	65 %	0 %
<b>Totalsum</b>	<b>8 %</b>	<b>32 %</b>	<b>52 %</b>	<b>9 %</b>



Figur 19: Månedsvise fordeling av solsløyg/-tendens fordel på baner

Figur 19 viser Tabell 17 grafisk. I løpet av de siste ti årene har størst andel solsløyg/-tendens skjedd i juli for alle banene, med unntak av Rørosbanen der 58 % av alle solsløyg/-tendensene skjedde i juni.

### 5.1.3 Avsporinger som følge av solslyng

I perioden 2006-2014 skjedde syv avsporinger som følge av solslyng (Løhren 2015). Ved å se på ulykkesrapportene kan likhetstrekk vurderes og sammenlignes.



*Figur 20: Avsporing på Dovrebanen 26.7.2006 (bilde fra nrk.no)*

Figur 20 viser hvordan en vogn fra avsporede toget har falt ned skråningen og hvor nærme den havnet fra en hytte. Denne avsporingen førte til store skader på det rullende materiellet, samt omfattende skader på 500 betongsviller, skinner og flere kontaktledningsmaster.



*Figur 21: Avsporing på Dovrebanen 20.5.2010 (bilder fra GD.no)*

Figur 21 viser omfanget av en avsporing på Dovrebanen ved Harpefoss i 2010. Ni vogner sporet av og førte til omfattende skader på sporet og KL-anlegget.

Tabell 18 viser avsporinger der solslyng var den direkte årsaken. En gjentakende årsak i Statens havarikommisjon for transport (SHT) sine rapporter er feil nøytraltemperatur på avsporingstedet i kombinasjon med nedsatt sidestabilitet og høy skinnetemperatur. Viktigheten av å ha kontroll over sporets beliggenhet ved å måle inn sporet mot GVUL/VUL og nøytralisering av sporet etter sporarbeider vektlegges. Manglende nøytralisering fremheves som en av de viktigste årsakene til at solslyngene skjedde.

I flere av avsporingene var sporets sidestabilitet nedsatt på grunn av sporjusteringer. Sporjusteringer uten nøytralisering kan føre til både at sporstabiliteten blir midlertidig nedsatt og at nøytraltemperaturen blir feil, jfr. kapittel 2.2 *Faktorer som påvirker solslyng*. Sporjusteringer på Dovrebanen 26.7.2006 gjorde at sidestabiliteten var nedsatt samtidig som det ble gjeninnført linjehastighet uten at ballasten var blitt konsolidert. På Nordlandsbanen 30.5.2014 ble det gjort mindre sporjusteringer samme dag som avsporingen skjedde, i kombinasjon med endret nøytraltemperatur fra en skinnekapp i oktober 2013.

Det var ingen personskader i avsporingene, men i alle tilfellene var det omfattende skader på sporet og det rullende materiellet. Skader i sporet er kostbare å reparere, samt at det skaper forsinkelser og innstillinger av tog. Eksempelvis så førte en avsporing på Nordlandsbanen i 2014 ved Trofors skader på sporet til ca 10 000 000 kr og skader på det rullende materiellet til ca. 360 000 kr, og banen måtte stenge i fire døgn.

Bortsett fra avsporingen på Bergensbanen 2.7.2009, så var det godstog som var involvert i alle avsporingene. Grunnen til at godstog er mer utsatt for solslyng kan være at de har høyere aksellast enn passasjertog og det skaper en større løftebølge, som forklart i kapittel 2.2.3 *Sporets stabilitet*. Passasjertog har også som oftest bedre boggikonstruksjoner enn godstog som kan håndtere sidebevegelser i sporet bedre.



Tabell 18: Solslyng som førte til avsporinger i perioden 2006-2014

Bane	Km	Dato	Årsak	Konsekvens
Dovrebanen (Strekningsanalysen)	Ukjent	23.7.2014	Vedvarende høy varme	Ingen personskader. Strekningen stengt mellom Vinstra og Kvam. Sporet måtte bakses på plass og KL justeres.
Nordlandsbanen (SHT 2015)	366,08	30.5.2014	Skinnetemperatur målt til 34,5 °C. Sveist inn skinnekapp i oktober 2013 uten at det ble foretatt nøytralisering. Dette førte til at nøytraltemperaturen ble redusert. Det ble gjennomført mindre sporarbeider ved avsporingstedet samme dag, noe som svekket sporets sidestabilitet.	Ingen personskader. Toget fortsatte ca. 1000 m etter avsporingen. Skader på vogner til ca. 360 000 kr. Skader i sporet til ca. 10 millioner kroner, og førte til en stengning i fire døgn
Dovrebanen (SHT 2014)	281,5	22.7.2013	Høy skinnetemperatur (målt til 41 °C). Skader i sporet etter flommen i 2013. Sporjusteringer ved km 281,470 og 281,507 3-7. juni uten at sporet ble nøytralisert. Manuell pakking på stedet 19. juli uten kantvibrator og sporstabilisator. Sannsynligvis ukjent/feil nøytraltemperatur og nedsatt sideforskyvningsmotstand.	Ingen personskader. 10 vogner sporet av og førte til at 320 m av sporet ble ødelagt til en kostnad av 2,6 millioner kroner. 530 sviller, 200 m kontaktledning og 3 kontaktledningsmaster måtte byttes ut. Skader på Heggerusta planovergang.
Dovrebanen (Løhren 2015)	Ukjent	20.5.2010	Ifølge Jernbaneverkets analyse- og ulykkegruppe er det mangelfull granskning og dokumentasjon etter avsporingen.	Ingen personskader. 300 m skinnegang og KL ødelagt. Store skader sporet og rullende materiell
Bergensbanen (Løhren 2015)	245,62	2.7.2009	Høy skinnetemperatur (>30 °C), pilhøydefeil > 65 mm	Ingen personskader. Sporet kappet og bakset tilbake.
Dovrebanen (SHT 2007)	339,7	26.7.2006	Utbedret solslyng ved km 339,87 24. juli uten å nøytralisere sporet. Baksing og pakket foretatt. Hastighet satt til linjehastighet uten at ballasten var tilstrekkelig konsolidert. Sannsynligvis ukjent/feil nøytraltemperatur.	Ingen personskader. Store skader på 7 vogner (falt 100 m ned en skråning), omfattende skader på 500 betongsviller, skinne og flere kontaktledningsmaster.
Østfoldbanen vestre linje (SHT 2007)	77,5	6.7.2006	Sannsynligvis feil nøytraltemperatur, svekket sideforskyvningsmotstand og skinnetemperaturen ble anslått til 50-60 °C. Manuell pakking av en dobbelsville under svært høy skinnetemperatur.	Ingen personskader. Mindre skader på vogner, omfattende skader på 500 sviller og to kontaktledningsmaster

## 5.2 Regresjonsanalyse

I kapittel 2.2.1 *Kritisk knekktemperatur* ble det diskutert en empirisk sammenheng mellom luft- og skinnnetemperaturen gitt ved ligning (10). I dette kapitlet skal forholdet mellom luft- og skinnnetemperaturen målt ved to detektorstasjoner langs Trønderbanen undersøkes ved en lineær regresjonsanalyse, og det skal utarbeides et 90 % prediksjonsintervall som kan brukes til å praktisk forutsi skinnnetemperaturen.

### 5.2.1 Analyseområde

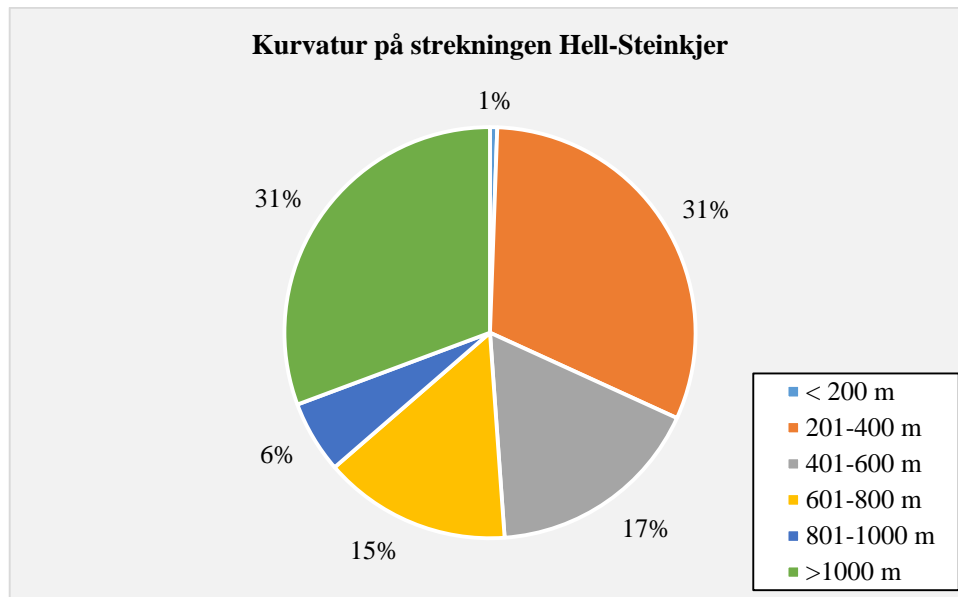
Dataene som er brukt i regresjonsanalysen er hentet fra Skatval, Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon. Se vedlegg 11.3 *Målevognsbilder* for bilde av detektorstasjonene.

Skatval detektorstasjon ligger på kilometer 43,340 på Nordlandsbanen mellom Trondheim og Steinkjer. Figur 22 viser plasseringen til detektorstasjonen. Detektorstasjonen består av en varmegangsdetektoren som måler lufttemperatur og en hjulskadedetektor som måler skinnnetemperatur. Detektorstasjonen ligger på en åpen slette og sporets retning er N-S.

Trondheim-Steinkjer trafikkeres av lokaltog mellom Lundamo-Steinkjer og representerer intercity-tilbudet i Trøndelag. I tillegg kjøres det mye gods- og fjerntog nordover til Mo i Rana og videre til Bodø. Kurvaturen på strekningen preges av kurver med radius mellom 200-400 m og kurver med radius over 1000. Figur 23 viser prosentvis fordeling av kurveradier på strekningen Hell-Steinkjer.



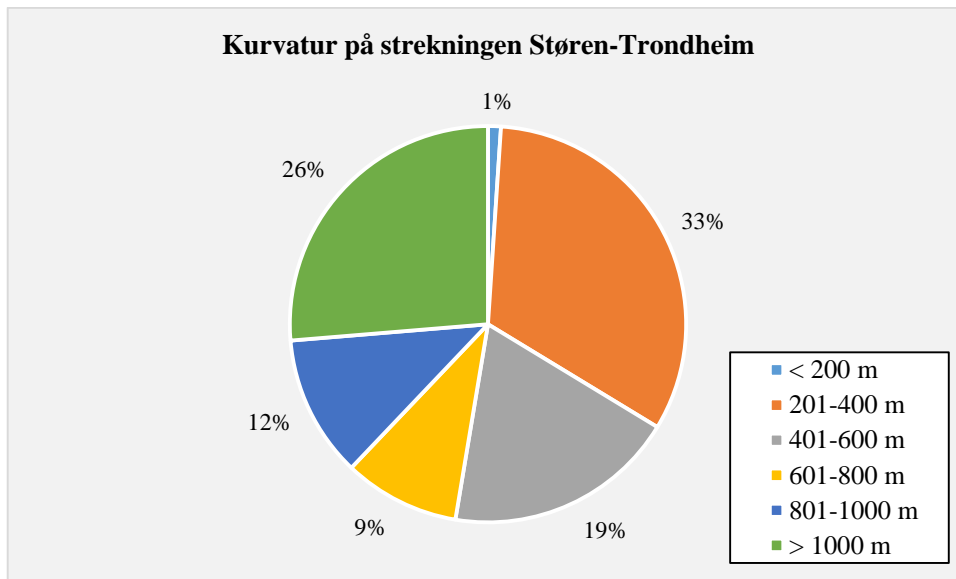
Figur 22: Skatval detektorstasjon



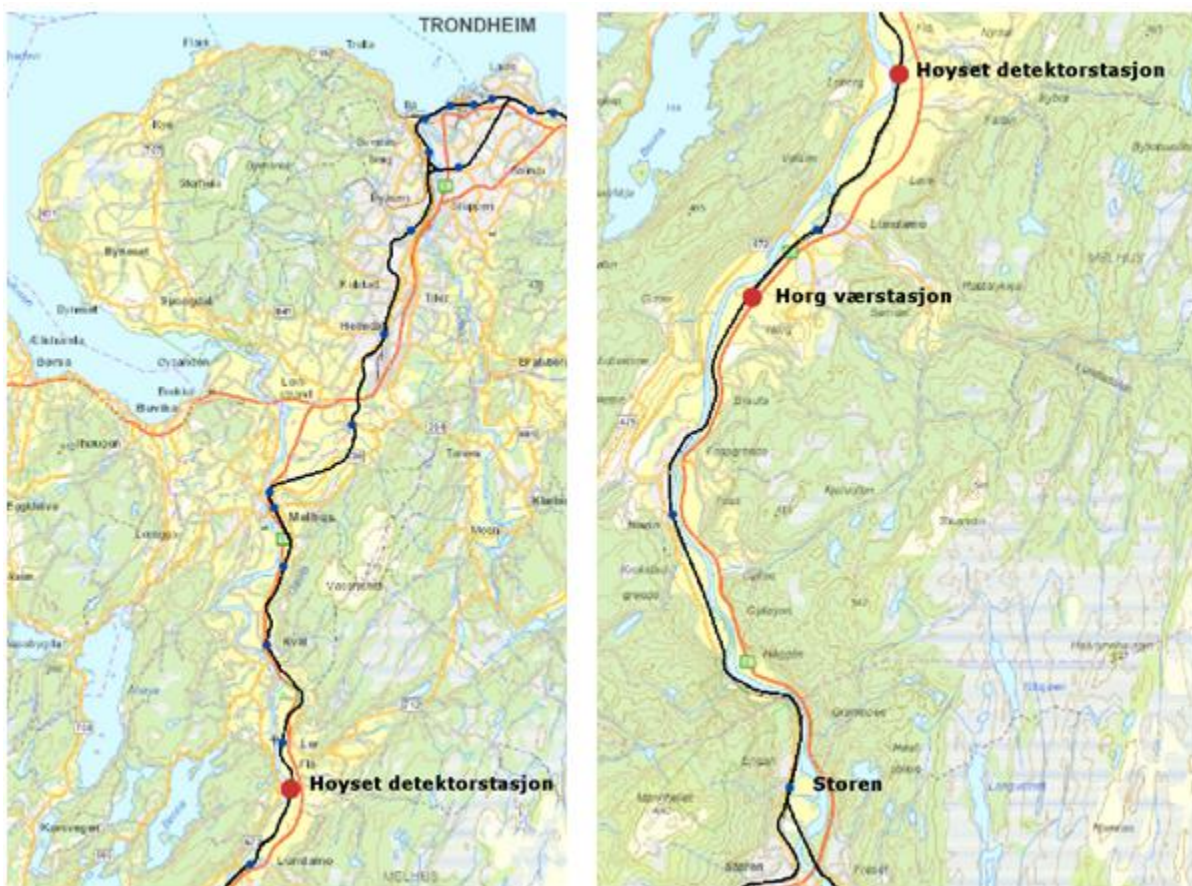
*Figur 23: Horisontalgeometri Hell-Steinkjer*

Høyset detektorstasjon ligger på km 518,46 på Dovrebanen mellom Lundamo og Ler. Den er elektrifisert og trafikkeres av alle togtyper, inkludert dieseldrevne tog. Ved Støren møtes Rørosbanen og Dovrebanen, og banen frem til Trondheim er tungt trafikkert. Figur 24 viser at horisontalgeometrien preges av kurveradier mellom 200-400 m, 400-600 m og større enn 1000 m.

Detektorstasjonen på Høyset består av en hjulskadedetektor som måler skinnets temperatur, men ingen varmegangdetektor som måler lufttemperatur. Data om lufttemperatur er derfor hentet fra nærmeste værstasjon. Figur 25 viser plasseringen til Høyset detektorstasjonen og Horg værstasjon. Horg værstasjon driftes av Statens vegvesen og ligger ca. 5 km i luftlinje sør for Høyset detektorstasjon langs E6 og Dovrebanen. Den ligger i ca. samme høyde (40 m.o.h.) som Høyset detektorstasjon, og begge stasjonene ligger i åpent terreng i retning N-S.



Figur 24: Horisontalgeometri Støren-Trondheim



Figur 25: Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon

## 5.2.2 Data fra Skatval detektorstasjon

Dataene fra Skatval detektorstasjon er fra somrene 2012, 2013 og 2014. Tabell 19 viser regresjonsstatistikk for de ulike datasettene fra Skatval detektorstasjon. Se vedlegg 11.5.1 *Skatval detektorstasjon* for regresjonslinjene for de ulike somrene.

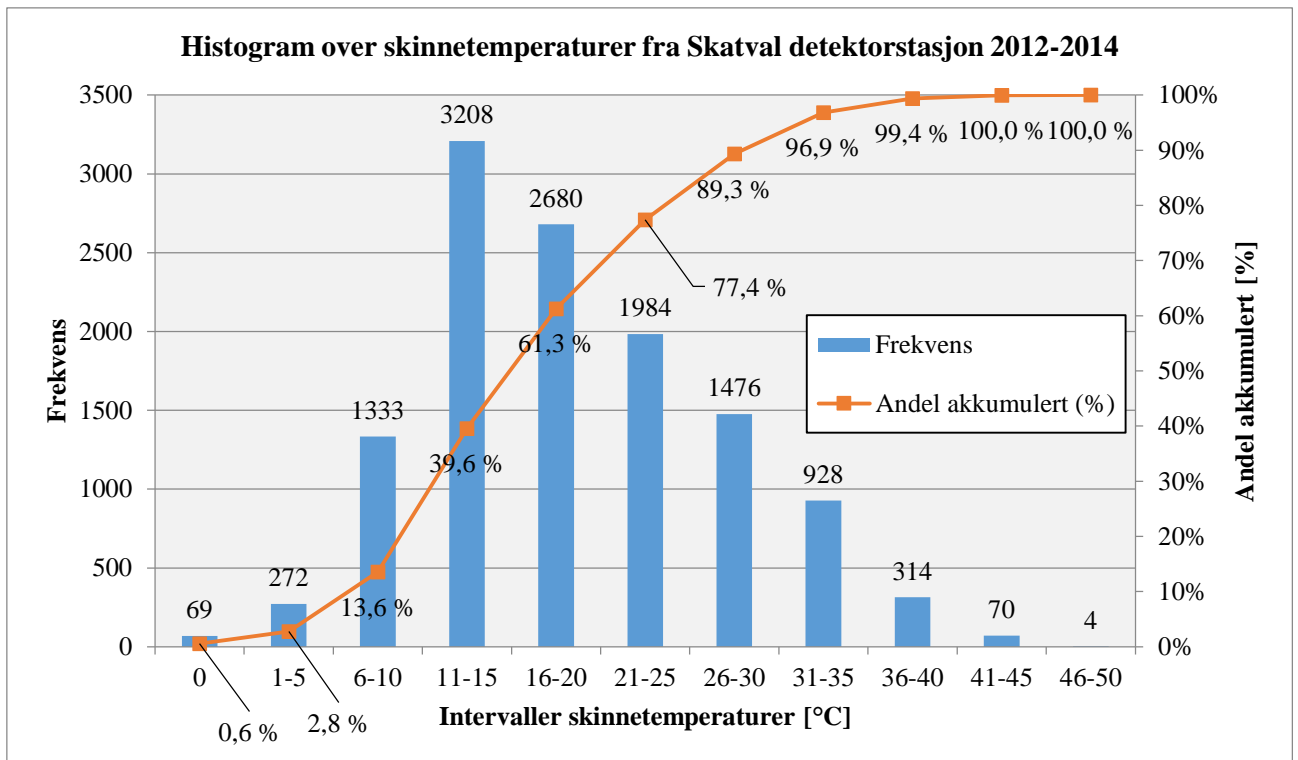
Utvalget brukt i regresjonsanalysen består av 12 338 målinger av luft- og skinnnetemperaturen. Et 90 % prediksjonsintervall gir en feilmargen i prediksjonen av skinnnetemperaturen på  $\pm 6,2$  °C. De ulike somrene er relativt like der stigningstallet for regresjonslinjen varierer fra 1,29-1,43, der regresjonslinjen for alle somrene har et stigningstall på 1,33. Alle regresjonene har skjæringspunkt som varierer mellom -1,67 – -4,04. En regresjonskoeffisient,  $R^2$ , på 0,79 for alle somrene sier at 79 % av variasjonen skyldes systematikk, mens 21 % skyldes tilfeldigheter.

Den beste regresjonen er fra sommeren 2014 med en korrelasjonskoeffisient,  $R$ , på 0,91, en regresjonskoeffisient,  $R^2$ , på 0,84 og en standardfeil på 3,45. Denne sommeren har også lavest feilmargen ved et 90 % prediksjonsintervall med  $\pm 5,7$  °C.

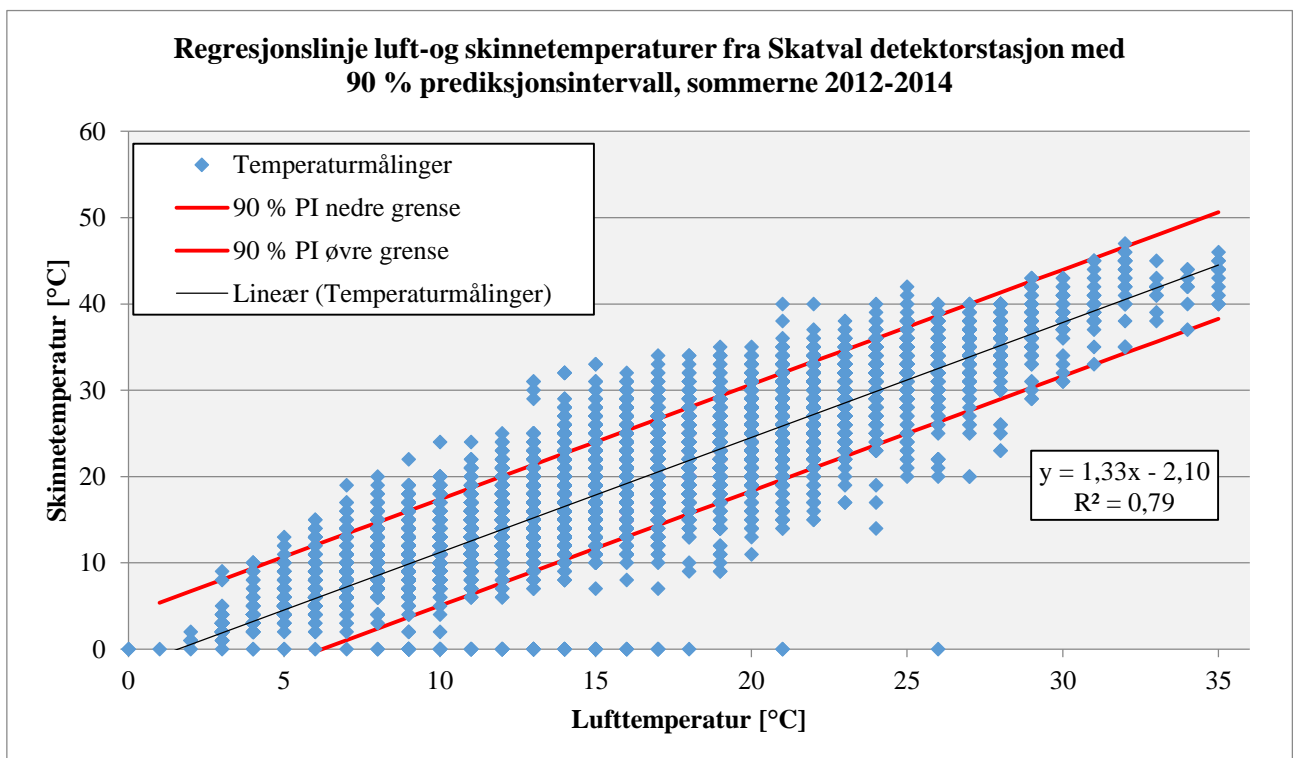
Tabell 19: Resultater fra regresjonsanalyse, Skatval detektorstasjon

Tidsperiode	Antall målinger	Maks $T_{\text{skinne}}$ [°C]	R	$R^2$	Standardfeil, $S_e$	Temperaturmodell [°C]	Feilmargen [°C]
1.5.2012-31.8.2012	3419	40	0,87	0,76	4,01	$T_{\text{skinne}} = 1,37 * T_{\text{luft}} - 1,72$	$\pm 6,6$
1.5.2013-31.8.2013	4526	43	0,89	0,79	3,67	$T_{\text{skinne}} = 1,43 * T_{\text{luft}} - 4,04$	$\pm 6$
1.5.2014-31.8.2014	4393	47	0,91	0,84	3,45	$T_{\text{skinne}} = 1,29 * T_{\text{luft}} - 1,67$	$\pm 5,7$
Totalt	12338	47	0,89	0,79	3,75	$T_{\text{skinne}} = 1,33 * T_{\text{luft}} - 2,10$	$\pm 6,2$

Figur 26 viser grafisk skinnnetemperaturene fra hjulskadedektoren på Skatval. Den høyeste skinnnetemperaturen som ble registrert var 47 °C, og 75 %-prosentilen for skinnnetemperaturene er 25 °C. Figur 27 viser regresjonslinjen med tilhørende prediksjonsintervall.



Figur 26: Skinnetemperaturer Skatval 2012-2014



Figur 27: Regresjon fra Skatval, 2012-2014

### 5.2.3 Data fra Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon

Dataene fra Høyset og Horg er fra somrene 2012 og 2013. For å se regresjonslinjer for de ulike somrene, se vedlegg 11.5.2 *Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon*. Tabell 20 viser regresjonsstatistikk for datasettene fra Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon.

Sammenlignet med utvalget fra Skatval detektorstasjon, så er datautvalget fra Høyset/Horg langt mindre. Dette er på grunn av at det var tekniske problemer med hjulskadedektoren på Høyset i mars 2104, og at det ikke var mulig å hente ut værdata for hele sommeren fra Horg værstasjon. Utvalget som er brukt i regresjonsanalysen for Høyset/Horg består dermed av 1744 målinger av luft- og skinnnetemperaturen.

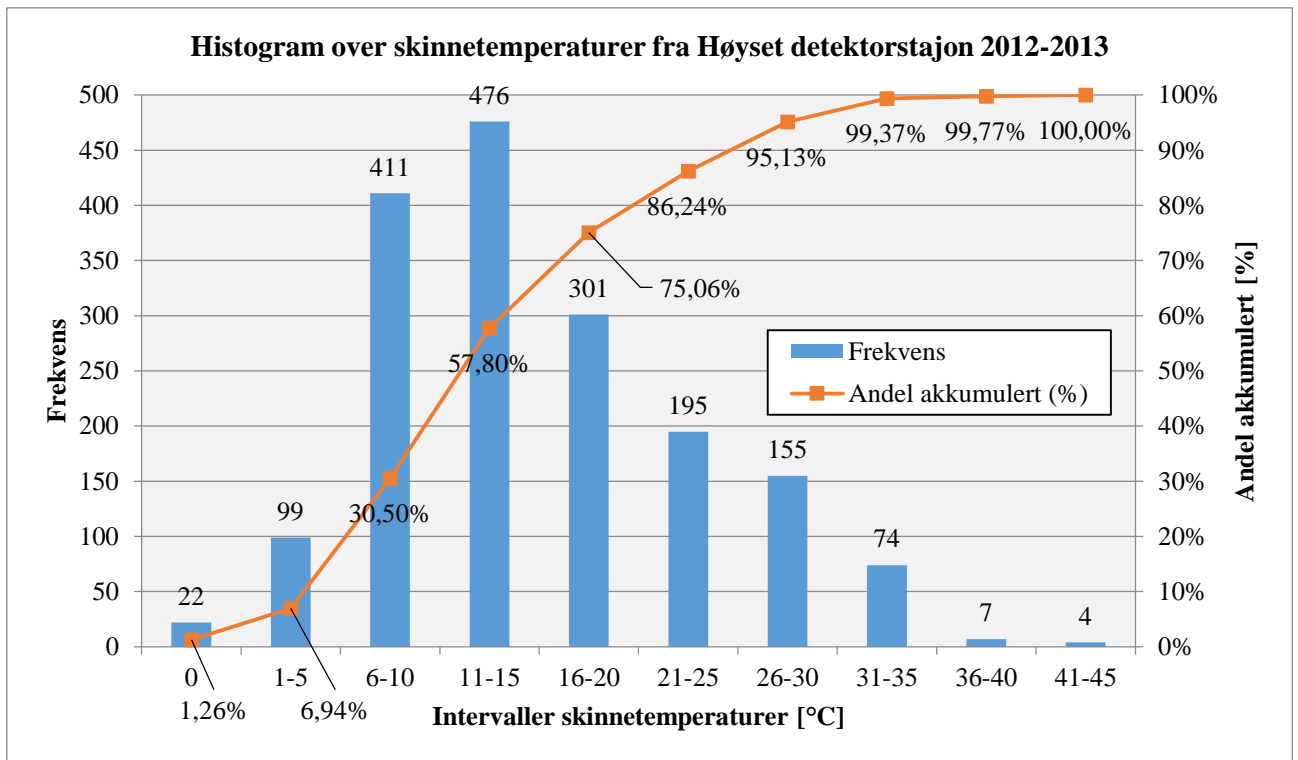
Regresjonskoeffisienten,  $R^2$ , for sommerene viser at 56 % av variasjonen skyldes systematikk i datagrunnlaget. Den beste regresjonslinjen er fra sommeren 2013 med en korrelasjonskoeffisient på 0,81, en regresjonskoeffisient på 0,66 og en standardfeil på 4,86. Denne regresjonen har også den laveste feilmarginen ved et 90 % prediksjonsintervall.

Stigningstallet for den predikerte  $T_{\text{skinne}}$  er 1,15, mens for sommerene isolert sett er stigningstallet 1,32 og 1,21 for henholdsvis sommeren 2012 og 2013. Feilmarginene for prediksjon av den uobserverte skinnnetemperaturen varierer fra 8-9,1 °C.

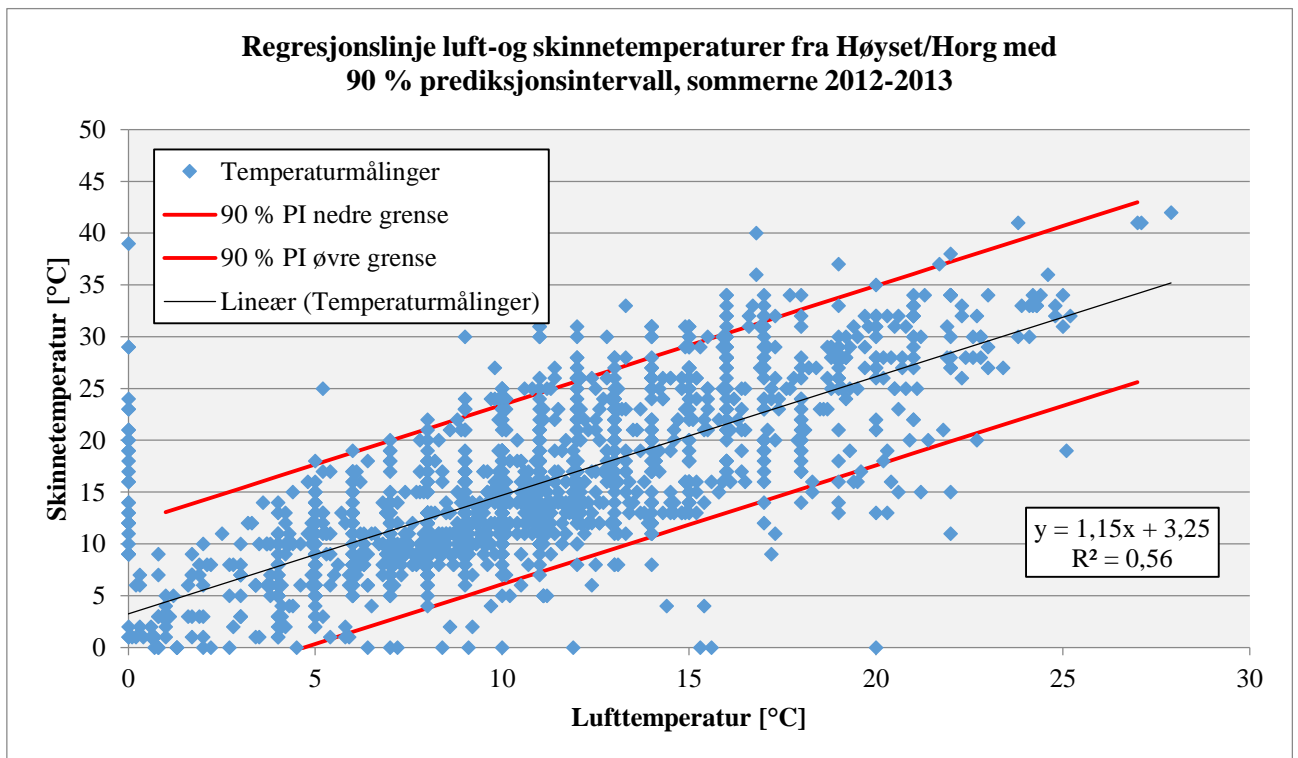
Tabell 20: Resultater fra regresjonsanalyse, Høyset/Horg

Tidsperiode	Antall målinger	Maks $T_{\text{skinne}}$ [°C]	R	$R^2$	Standard-feil, $S_e$	Temperaturmodell [°C]	Feilmargin [°C]
22.5.2012-3.7.2012	911	39	0,68	0,46	5,52	$T_{\text{skinne}} = 1,32 * T_{\text{luft}} + 1,47$	± 9,1
1.5.2013-17.6.2013	833	42	0,81	0,66	4,86	$T_{\text{skinne}} = 1,21 * T_{\text{luft}} + 1,87$	± 8
Totalt	1744	42	0,75	0,56	5,26	$T_{\text{skinne}} = 1,15 * T_{\text{luft}} + 3,25$	± 8,6

Figur 28 viser skinnnetemperaturene fra Høyset grafisk. Den høyeste skinnnetemperaturen som ble registrert var 47 °C og 75 %-prosentilen for skinnnetemperaturene er 20 °C. Figur 29 viser regresjonslinjen mellom luft- og skinnnetemperatur med tilhørende prediksjonsintervall.



Figur 28: Skinnnetemperaturer Høyset, 2012-2013



Figur 29: Regresjon Høyset/Horg, 2012-2013

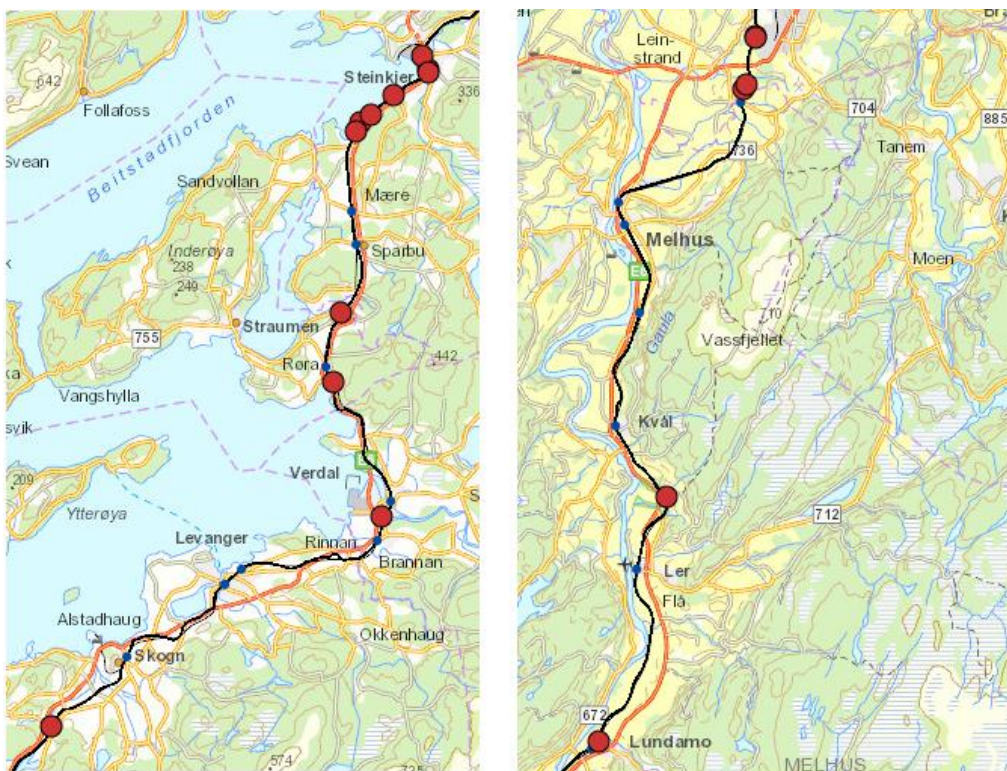


### 5.3 Kartlegging av tidligere solslyng langs Trønderbanen

Dette kapitlet undersøker tidligere solslyng langs Trønderbanen og skal gi en oversikt over faktorer som har innvirket på tidligere solslyng. Figur 30 viser hvor det har skjedd solslyng eller tilløp til solslyng langs Hell-Steinkjer og Støren-Trondheim i perioden 1998-2014. Det er noe høyere konsentrasjon av solslyng/-tendens i området rundt Steinkjer, strekningen mellom Verdal og Steinkjer, og nord for Melhus.

Forholdet mellom luft- og skinnnetemperaturen funnet i regresjonsanalysen brukes til å estimere hva skinnnetemperaturen var når solslyngene skjedde og baserer seg på data om maksimal lufttemperatur den dagen solslyngen skjedde. Dette hentes fra nærmeste værstasjon. Estimerte skinnnetemperaturer kan videre brukes som et grunnlag for å foreslå terskelverdier for ulike beredskapsnivå.

Fargekoder for skinnnetemperaturene er brukt for å vise høye og lave temperaturer relativt til hverandre, der rødt er høy temperatur og grønt er lav temperatur. Data om kurvatur fra løfteskjema og data om når sporet sist var pakket, tilstand på ballast og type befestigelse hentes fra BaneData, og er inkludert siden de kan ha innvirkning på sporets sidestabilitet.



Figur 30: Tidligere solslyng/-tendens langs Trønderbanen

Tabell 21: Tidligere solslyng med estimert skinnnettemperatur, Hell-Steinkjer

Km	Dato	Omfang	Nærmeste værstasjon	T <sub>luft</sub> [°C]	T <sub>skinne</sub> [°C]	T <sub>skinne - 6.2</sub> [°C]	T <sub>skinne + 6.2</sub> [°C]	R [m]
69.84	22.7.2014	Tilløp	Engstad	30	38	32	44	0
95	27.5.2014	Tilløp	Verdal	18	21	15	28	0
104.4	10.7.2014	Tilløp	Mære 3	32	40	34	46	311
108.7	26.7.2014	Tilløp	Mære 3	29	36	30	42	276
120	8.6.2014	Tilløp	Mære 3	24	30	24	36	410
125	5.6.2007	Solslyng	Steinkjer	25	31	25	37	245
125.86	5.6.2007	Solslyng	Steinkjer	25	31	25	37	230
119.416	8.6.2006	Solslyng	Steinkjer <sup>1</sup>	13	15	9	21	2128
124.8	9.7.2005	Solslyng	Steinkjer	26	32	26	38	245
122.5	4.6.2002	Solslyng	Steinkjer	28	35	29	41	320
120.8	4.6.2002	Solslyng	Steinkjer <sup>1</sup>	28	35	29	41	413
<b>T<sub>snitt</sub> =</b>				<b>25</b>	<b>31</b>	<b>25</b>	<b>37</b>	

<sup>1</sup>Mære 3 er egentlig den nærmeste værstasjonen, men det mangler temperaturdata disse datoene. Nærmeste værstasjon blir da Steinkjer-Reppe.

Tabell 22: Tidligere solslyng med fokus på sporet, Hell-Steinkjer

Km	Sist pakket	Tilstand på ballast	Type befestigelse	Feilårsak i BD
69.84	10.05.2014	God	Pandrol e-clip	Høy temperatur (> 30°C)
95	31.10.2002	God	Pandrol e-clip	Dårlig ballast, stor svilleavstand, utslitte smådeler, feil fjærer
104.4	06.10.2013	God	Pandrol e-clip	Høy temperatur (> 30 °C)
108.7	14.05.2014		Pandrol e-clip	Høy temperatur (> 30 °C), lite ballastprofil, stor svilleavstand
120	17.05.2014	God	Pandrol e-clip	Høy temperatur (> 30 °C)
125	23.05.2002	Dårlig*	Hey-Back	
125.86				
119.42				
124.8	Ingen data tilgjengelig så langt tilbake			
122.5				Skinnetemperatur 40 °C
120.8				

\*Ballastprofilet registrert juni 2014

Tabell 21 viser solslyng eller tilløp til solslyng på strekningen Hell-Steinkjer i perioden 2002-2014 med omkringliggende lufttemperatur fra nærmeste værstasjon og estimert skinnnetemperatur. Den laveste skinnnetemperaturen er estimert til  $15 \pm 6,2$  °C, mens den høyeste er  $40 \pm 6,2$  °C. Gjennomsnittlig skinnnetemperatur ved tidligere solslyng/-tendens langs Hell-Steinkjer er estimert til  $31 \pm 6,2$  °C.

Tabell 22 viser de samme solslynghendelsene med fokus på sporets sidestabilitet. Ballastens tilstand er i BaneData delt inn i god, mindre god og dårlig, og baseres på skjønsmessige vurderinger av ballastens renhet og fraksjon, tykkelse og skulderbredde. Solslyng/-tendens i lave lufttemperaturer kan tyde på andre forhold som innvirker på faren for solslyng. Dette kan eksempelvis være sterk solinnstråling, feil nøytraltemperatur eller sterkt nedsatt sidestabilitet.

27.5.2014 var det tilløp til solslyng ved km 95. Dette var i en lav lufttemperatur og på rettlinje. I BaneData er feilårsaken oppgitt som dårlig ballast, stor svilleavstand, utslitte smådeler og feil fjærer. Fra målevognsbilder kan det virke som ballasten er noe forurenset og at det er en del vegetasjon i linjegrøftene som kan redusere dreneringsevnen til sporet. Utover det er det vanskelig å si noe mer om hvordan tilstanden til sporet påvirket solslyngene.

8.6.2006 var det en solslyng ved km 119.416 i en lufttemperatur på ca. 13 °C og en estimert skinnnetemperatur på  $15 \pm 6,2$  °C. Dette var i en slak kurve (R=2128). Det er ingen feilårsak oppgitt i BaneData, men fra målevognsbilder kan det se ut som det er en solrik plass. Ved ca. km 119.500 ser det ut som en planovergang har blitt fjernet, noe som kan ha påvirket nøytraltemperaturen. Det er vanskelig å si en direkte årsak siden det mangler mye informasjon om hvordan sporets tilstand var tilbake i 2006.

Se vedlegg *11.4 Andre relevante målevognsbilder* for relevante målevognsbilder av km 95 og 119.416.

Fra tabellene er det ikke mulig å trekke ut en konklusjon for hvordan maskinelt sporvedlikehold, ballastens kvalitet og type befestigelse innvirker på faren for solslyng langs strekningen Hell-Steinkjer. I BaneData er høy temperatur den feilårsaken som er oppgitt flest ganger, i tillegg til stor svilleavstand og dårlig ballast. I BaneData foreligger den nyeste informasjonen om sporet og det er derfor ikke mulig å si noe om hvordan sporets stabilitet var tilbake i 2002.

Tabell 23: Tidligere solslyng med estimert skinnnettemperatur, Støren-Trondheim

Km	Dato	Omfang	Nærmeste værstasjon	T <sub>luft</sub> [°C]	T <sub>skinne</sub> [°C]	T <sub>skinne - 8.6</sub> [°C]	T <sub>skinne + 8.6</sub> [°C]	R [m]
522.8	10.9.2014	Tilløp	E6 Horg	19	25	17	34	284
539.125	10.9.2014	Tilløp	E6 Heimdal	18	24	15	33	300
522.8	13.7.2014	Tilløp	E6 Horg	30	38	29	46	284
539.125	9.7.2014	Tilløp	E6 Heimdal	31	39	30	48	300
539.1	7.8.2009	Solslyng	Trondheim Voll <sup>2</sup>	25	32	23	41	300
537.541	25.7.2008	Solslyng	Trondheim Voll <sup>2</sup>	27	34	26	43	305
537.7	28.7.2000	Tilløp	Trondheim Voll <sup>3</sup>	23	30	21	38	310
515.07	13.8.1998	Solslyng	Gaulfoss <sup>4</sup>	22	29	20	37	296
<b>T<sub>snitt</sub> =</b>				<b>24</b>	<b>31</b>	<b>23</b>	<b>40</b>	

<sup>2</sup>Nærmeste værstasjon er egentlig E6 Heimdal, men mangler data denne datoen. Nærmeste værstasjon blir da Trondheim Voll.

<sup>3</sup>Nærmeste værstasjon er egentlig E6 Klett men det mangler data for denne datoen.

<sup>4</sup>Nærmet værstasjon er egentlig E6 Horg.

Tabell 24: Tidligere solslyng med fokus på sporet, Støren-Trondheim

Km	Sist pakket	Tilstand på ballast	Type befestigelse	Feilårsak i BD
522.8	21.7.2014	Mindre god	Pandrol	Høy temperatur (> 30 °C)
539.125	03.8.2014	Mindre god	Pandrol	Høy temperatur (> 30 °C)
522.8	31.7.2013	Mindre god	Pandrol	Høy temperatur (> 30 °C)
539.125	31.7.2013	Mindre god	Pandrol	
539.1	2007			Høy temperatur (> 30 °C)
537.541	30.9.2002			Varmeperiode
537.7				Skinnetemperatur 40 °C
515.07		Ingen data tilgjengelig		

Tabell 23 viser alle registrerte solsllyng/-tendens i BaneData tilbake til 1998 på strekningen Støren-Trondheim med estimert skinnnetemperatur den dagen solsllyngen skjedde. Det er større usikkerhet knyttet til denne modellen enn modellen fra Skatval med en feilmargin i estimert skinnnetemperaturen på  $\pm 8,6$  °C. Den laveste skinnnetemperaturen er  $24 \pm 8,6$  °C, mens den høyeste er  $39 \pm 8,6$  °C. Gjennomsnittlig estimert skinnnetemperatur for de 8 tilfellene av solsllyng/-tilløp er  $31 \pm 8,6$  °C. Alle solsllyng/-tendensene skjedde i krappe kurver ( $R < 400$  m).

Tabell 24 viser de samme hendelsene som i tabell 23, men med fokus på tilstanden på sporet. Tilstand på ballasten ble registrert i juni 2014, og ballasten ble registrert som mindre god på grunn av flere partier med smale fyllinger. Det skjedde tilløp til solsllyng ved samme sted to år etter hverandre, ved km 522,8 og km 539,125, noe som kan tyde på at disse stedene har problemer som påvirker faren for solsllyng.

Se vedlegg 11.4 *Andre relevante målevognsbilder* for målevognsbilder av disse to stedene. Fra målevognsbildene kan det se ut som det er smale fyllinger ved km 522.8 og noe vegetasjon i banelegemet ved km 539.125.

Alle feilårsakene som var oppgitt i BaneData for solsllyng langs Støren-Trondheim er høy temperatur. Tilstanden på ballasten er registrert som mindre god, men det er vanskelig å vite konkret hva som ligger i det begrepet. Utover høy temperatur og smale fyllinger, så er det ikke mulig å trekke en konklusjon fra tabell 24 for hvordan maskinelt sporvedlikehold, ballasten og type befestigelse påvirker faren for solsllyng langs strekningen Støren-Trondheim

Generelt kan man si at smale fyllinger i krappe kurver fører til lavere kritisk knekktemperatur, jfr. kapittel 2.2.3 *Sporets stabilitet*, og at vegetasjon i banelegemet kan redusere dreneringsevnen til sporet, noe som igjen reduserer sporets sidestabilitet.

Tabell 21 og Tabell 23 viser at alle undersøkte solsllyng eller solsllyngtendens langs Støren-Trondheim skjedde i krappe kurver med radius mindre enn 400 meter, mens langs Hell-Steinkjer skjedde 8 av 11 tilfeller i krappe kurver. Som forklart i kapittel 2.2.3 *Sporets stabilitet* har kurvaturen innvirkning på den kritisk temperaturøkningen ved at det skapes en kraftresultant fra trykkreftene utover i kurven.

## 5.4 Resultater fra spørsmålsrunden

Hensikten med spørsmålsrunden er å kartlegge hva de ulike banestrekningene gjør for å redusere faren for solslyng i dag, hvilke langsiktige tiltak som er viktigst for å forebygge solslyng, samt å få konkrete innspill til hvordan en beredskapsplan ved fare for solslyng kan se ut.

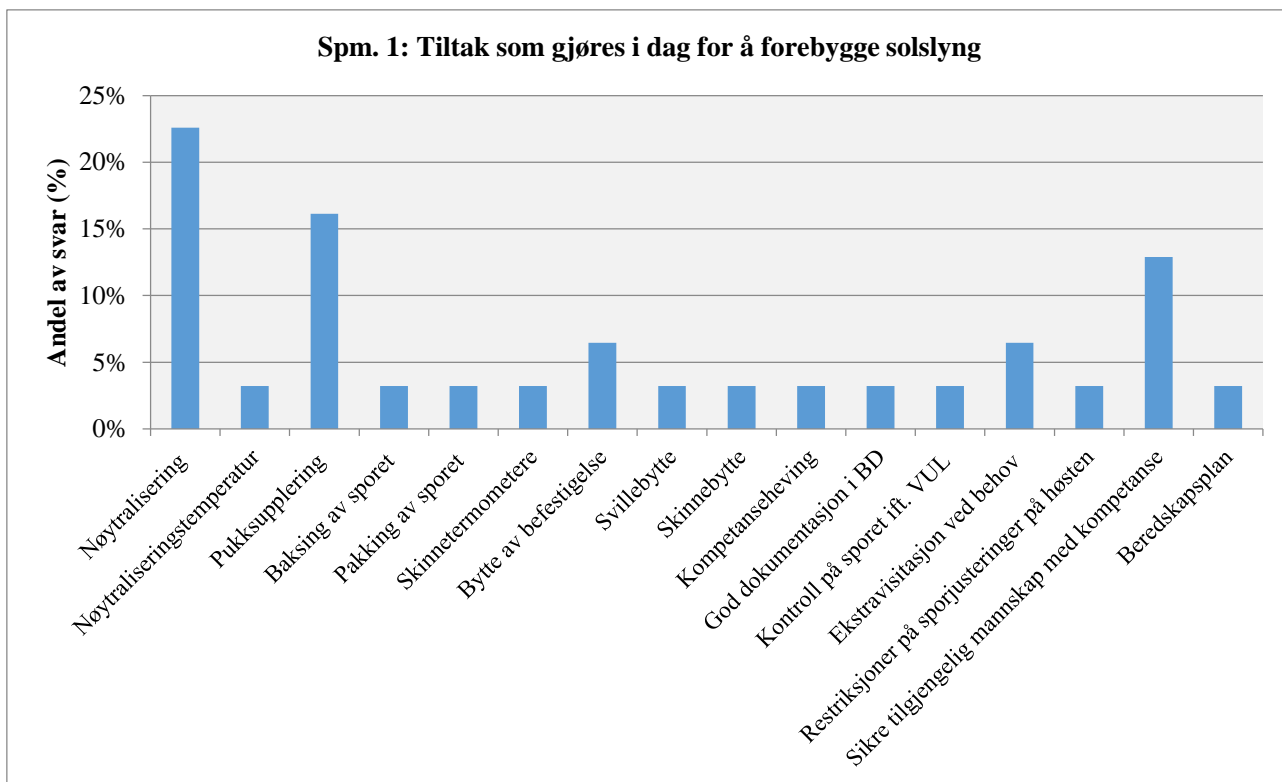
13. 04.2015 ble det gjennomført et pilotintervju for å få tilbakemelding på hvordan mottaker tolker spørsmålene, og samme dag ble spørsmålene sendt ut til de 17 banesjefene i Jernbaneverket. Forespørselen som ble sendt ut ligger i vedlegg *11.2.1 Epost sendt til banesjefene i Jernbaneverket.*

### 5.4.1 Spørsmål

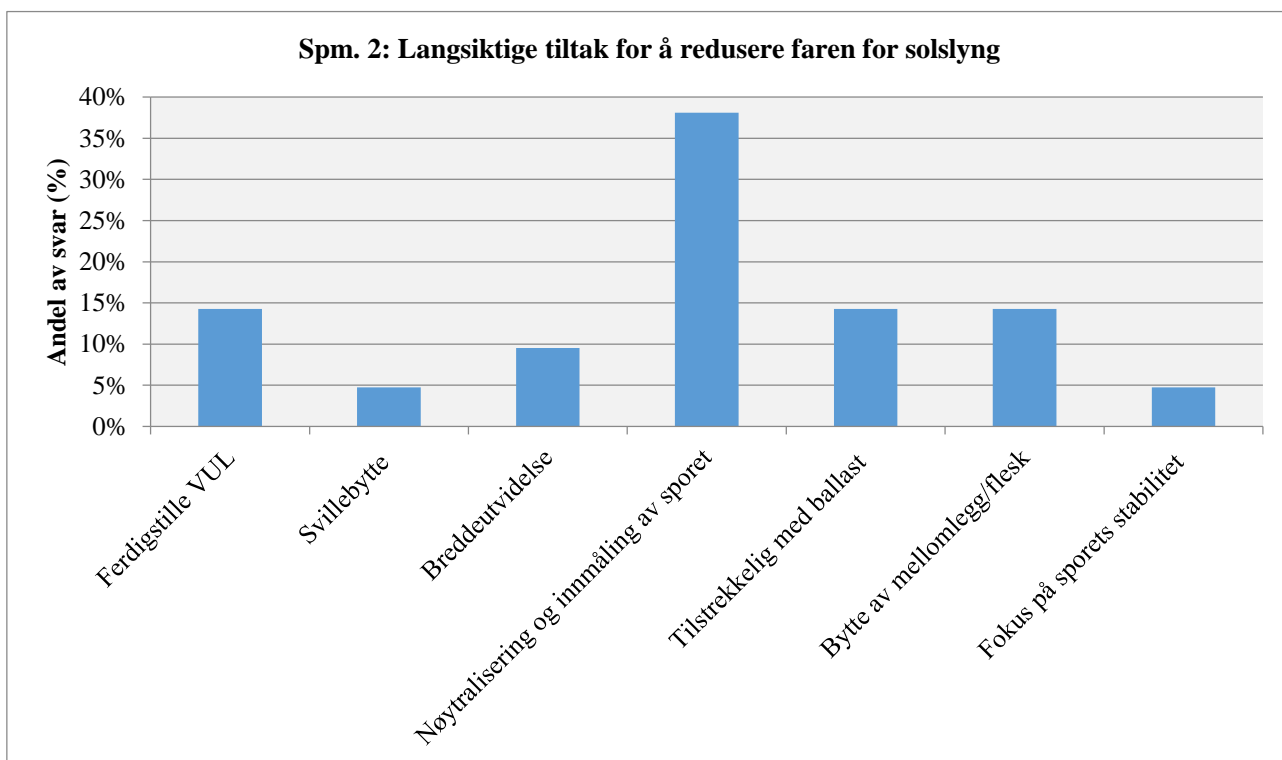
1. Hvilke tiltak gjøres i dag på din banestrekning for å forebygge solslyng?
2. På lengre sikt, hvilke tiltak mener du er viktigst på din banestrekning for å redusere faren for solslyng?
3. Har du noen konkrete innspill om hva som burde være med i en slik beredskapsplan?

### 5.4.2 Svar

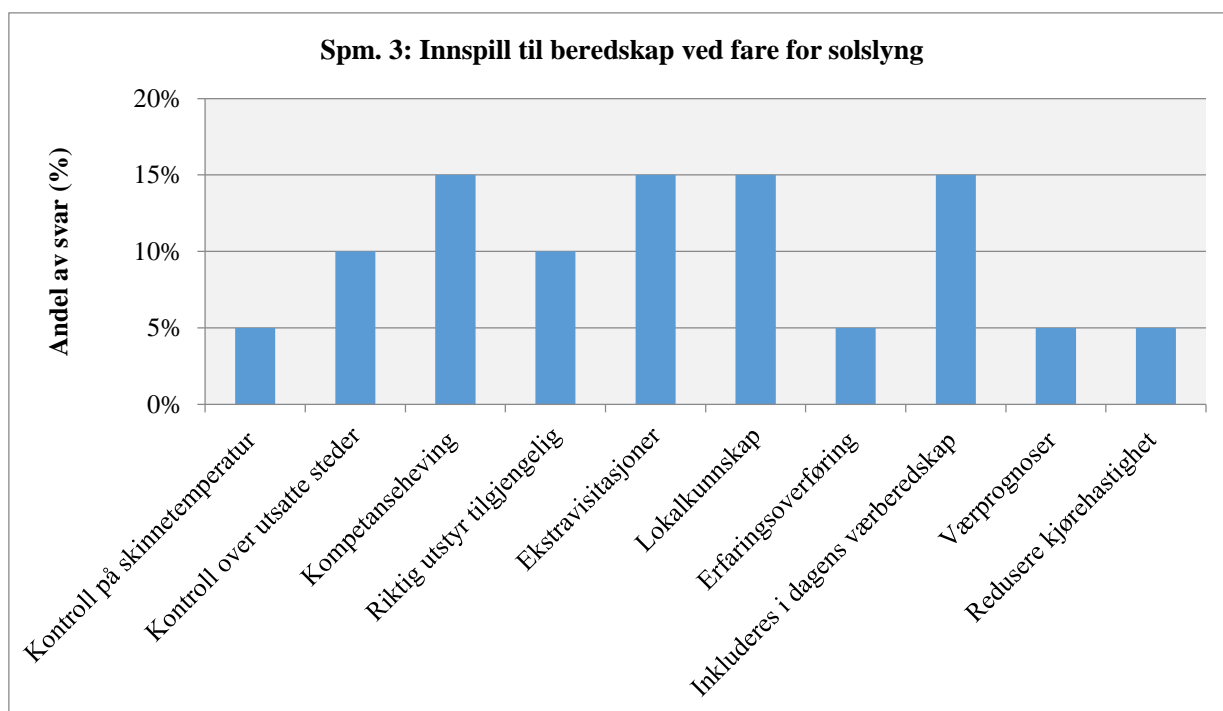
Spørsmålsrunden endte med en svarprosent på 41 %, og banene som svarte på forespørselen var Vestfoldbanen, Østfoldbanen Øst, Røros- og Solørbanen, Trønderbanen, Nordlandsbanen Sør, Bergensbanen og Sørlandsbanen Midt. Figur 31, 32 og 33 viser svarene på henholdsvis spørsmål 1, 2 og 3. Svarene er kategorisert som andel av alle innspillene og viser hvilke innspill som kom inn flest ganger.



Figur 31: Tiltak som gjøres i dag for å forebygge solslyng



Figur 32: Langsiktige tiltak for å redusere faren for solslyng



*Figur 33: Innspill til beredskap ved fare for solslyng*

Figur 31 viser tiltak som gjøres for å forebygge solslyng i dag. Nøytralisering, pukksupplering og tilgjengelig mannskap med riktig kompetanse fremheves som de viktigste tiltakene. Alle banene som svarte mente at nøytralisering av utsatte steder måtte være førsteprioritet. Pukksupplering fremheves som det viktigste tiltaket for å øke sidestabiliteten til sporet, mens tilgjengelig mannskap med riktig kompetanse for å håndtere oppståtte solslyng fremheves som det viktigste for beredskapen.

Figur 32 viser hvilke tiltak som er viktigst på lang sikt for å redusere faren for solslyng. Nøytralisering og innmåling av sporet fremheves som det viktigste langsiktige tiltaket for å redusere faren for solslyng. Andre viktige tiltak som fremheves er å ferdigstille VUL, sørge for tilstrekkelig ballast og bytte av mellomlegg/flesk. VUL vil gjøre at man kan ha kontroll over sporets beliggenhet, mens god ballast og mellom/flesk vil sørge for økt sidestabilitet og rammestivhet i sporet.

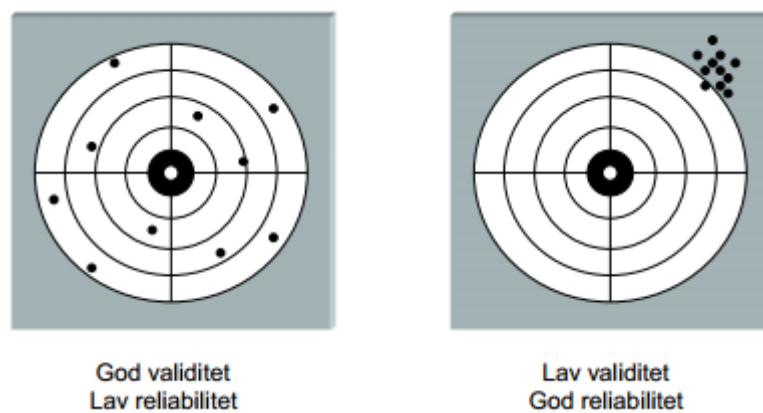
Figur 33 viser innspill til en mulig beredskapsplan ved fare for solslyng. Kompetanseheving, ekstravisitasjoner, lokalkunnskap og at beredskapen kan inkluderes i dagens værberedskap er de innspillene som ble lagt mest vekt på. I tillegg fokuseres det på kontroll over utsatte steder og at riktig utstyr er tilgjengelig, for eksempel pakkmaskin eller riktig sveiseutstyr.



## 6 Diskusjon

I dette kapitlet skal resultatene fra litteraturstudiet og analysen drøftes, og mulige feilkilder skal belyses. Beredskap ved fare for solslung skal også drøftes og skal danne grunnlag for et forslag til en beredskapsplan ved solslungfare.

Reliabilitet kan defineres som påliteligheten til resultatene, mens validitet defineres som gyldigheten til resultatene. Figur 34 viser hvordan Knut Samset definerer reliabilitet og validitet (Samset 2014).



*Figur 34: Reliabilitet og validitet (Samset 2014)*

Reliabilitet er knyttet til om analysen representerer den virkelige situasjonen, og tar for seg hvordan analysen er gjort. Høy reliabilitet vil si at dersom analysen eller undersøkelsen gjøres på nytt, så skal man få det samme resultatet.

Validitet er knyttet til om analysen undersøker det den har til hensikt å finne ut av. Dersom resultatene mangler validitet, så er det større mulighet for at man trekker feil konklusjon fra resultatene.

## 6.1 Drøfting av resultater

### 6.1.1 Resultater fra litteraturstudiet

Målet med litteraturstudiet var å undersøke muligheter for automatisk overvåkning av problemområder der det er høy fare for solslyng. Det teoretiske grunnlaget gjorde imidlertid at fokuset på litteraturstudiet ble flyttet over på måling av skinne- og nøytraltemperatur da disse to faktorene er essensielle i bestemmelsen av temperaturinduserte krefter i sporet. Det ble funnet automatiske temperaturmålere som kan sende informasjon om skinnnetemperaturen i sanntid, se vedlegg *11.6 RTMU produktspesifikasjoner*. Direkte og indirekte måling av nøytraltemperaturen ble også diskutert, men ingen av disse løsningene kan automatisk varsle om feil nøytraltemperatur. Bruk av VERSE eller indirekte måling av nøytraltemperaturen ved innmåling av sporet mot VUL-merker er de to løsningene som virker mest realistisk. Dette krever at VUL-nettet fullføres og brukes aktivt til innmåling av sporets beliggenhet, eller at banene bruker VERSE der man mistenker feil nøytraltemperatur.

Det ble også fokusert på om det finnes noen sikkerhetskriterier mot solslyng internasjonalt, da dette kan ha betydning for bestemmelse av beredskap. Sikkerhetskriteriene som ble funnet bygger på energibetraktninger fra ulike beregningsprogram og uten disse programmene kan ikke sikkerhetsmarginene i Tabell 5 brukes. Disse resultatene ble for teoretiske og har liten relevans for beredskapsarbeidet i denne oppgaven. Tabell 6 viser hastighetsnedsettelse i Storbritannia basert på kritiske skinnnetemperaturer over nøytraltemperaturen i kombinasjon med tilstanden på ballasten. Disse er mer relevante for beredskapen enn sikkerhetskriteriene basert på  $\Delta T_{Bmax}$  og  $\Delta T_{Bmin}$ . Hastighetsnedsettelse gjennomføres uansett dersom lufttemperaturen er forventet til å overstige 36 °C.

Litteraturstudiet kan konkluderes med at det finnes metoder for måling av både skinne- og nøytraltemperaturen. RTMUer vil kunne varsle om høye skinnnetemperaturer i sanntid og kan være et godt verktøy for de ulike banestrekningene. Dette forutsetter imidlertid at nøytraltemperaturen ligger innenfor nøytralområdet slik at kreftene i sporet kan bestemmes. Nøytraltemperaturen kan også måles, enten ved innmåling mot VUL-merker eller ved bruk av VERSE. Dette er vedlikeholdsoppgaver som vil være gunstig å gjøre på våren før sommervarmen slår inn. Dette er løsninger som har høy validitet og reliabilitet.

## 6.1.2 Resultater fra analysen

I analysen er data fra BaneData Innsyn i stor grad benyttet. Mange av registreringene i BaneData er av varierende kvalitet og kan bare brukes til å konstatere at det har skjedd en feil eller at en sporkomponent må byttes ut. Ofte er feilårsak ikke utfylt, og dette gjør det vanskelig å si noe om trender til at det skjer feil og dermed sette inn riktig vedlikeholdstiltak. Dette kan skyldes at de som registrerer i BaneData ikke vet årsaken eller at rapporteringsrutinene ikke er gode nok. Det må fokuseres mer på hvorfor det er en feil i sporet og ikke bare at det er identifisert en feil.

Figur 35 viser et utklipp fra BaneData Innsyn. Det viser solslyng og solslyngtendens på Hovedbanen med data om km og tidspunkt solslyngen oppstod. Utklippet viser at det er flere dobbel- og trippelregistreringer på samme dato. Feilregistreringer og manglende feilårsak forekommer med alle banene, og dette reduserer validiteten til resultatene som er basert på BaneData.

Km	Objekt	Idriftssatt dato	Tidspunkt oppstått
0	KO-SPO-000267		04.07.1991
0	KO-SPO-000267		30.07.1991
0.5	KO-SPO-000267		28.07.1999
0.5	KO-SPO-000267		29.07.1999
0.5	KO-SPO-000267		29.07.1999
0.65	KO-SKI-011340	01.01.1985 00:00:00	25.05.2012
0.65	KO-SKI-011340	01.01.1985 00:00:00	25.05.2012
0.74	KO-SKI-011337	01.01.1981 00:00:00	25.05.2012
0.75	KO-SPO-001328		21.07.2013
0.75	KO-SPO-001328		21.07.2013
0.85	KO-SPO-001675		21.07.2013
0.85	KO-SPO-001675		21.07.2013
0.9	KO-SPO-000267		27.07.1999
0.9	KO-SPO-000267		27.07.1999
0.9	KO-SPO-000267		27.07.1999
0.95	KO-SPO-000267		27.07.1999
0.95	KO-SPO-000267		01.08.1999

Figur 35: Utklipp fra BaneData Innsyn

Det er også en trend at langt flere solslyng og solslyngtendens er registrert de siste årene enn tidligere. Det er grunn til å tro at større fokus på solslyngproblematikken de siste årene har resultert i flere registreringer i BaneData. Eksempelvis hadde Nordlandsbanen 50 registrerte solslyngfeil i 2014 sammenlignet med 4 registreringer i 2013.

Avsporinger som følge av solslyng har blitt undersøkt, og bygger i stor grad på Statens havarikommisjon for transport (SHT) sine ulykkesrapporter. Disse rapportene fokuserer på årsak og konsekvens av avsporingene, og har god validitet. I tillegg har BaneData og Strekningsanalysen blitt brukt. Kontakt med Jernbaneverkets ulykkes- og analysegruppe ble også opprettet for å få informasjon om årsaksforhold.

I regresjonsanalysen er data fra Høyset og Skatval detektorstasjon benyttet. Dataene fra Skatval er fra mai-august 2012, 2013 og 2014, mens dataene fra Høyset er fra periodene 22.5.2012–3.7.2012 og 1.5.2013–17.6.2012. Dette gjør at flere somre kan sammenlignes, og det øker validiteten til resultatene. Det hadde imidlertid vært interessant å sammenligne somre enda flere år tilbake.

På Høyset er det en hjulskadedetektor som måler skinnnettemperatur, men ingen varmegangsdetektor som kan måle lufttemperaturer på samme måte som på Skatval. Dette gjorde slik at data om lufttemperatur måtte hentes fra nærmeste værstasjon. Den nærmeste værstasjonen er Horg værstasjon som ligger ca. 5 km sør for Høyset og driftes av Statens vegvesen. Det var ikke mulig å hente ut data for hele perioden mai-august fra Horg, og det er derfor datasettene fra Høyset/Horg som er brukt i regresjonsanalysen er mer fragmentert enn dataene fra Skatval.

Ved Horg værstasjon måles lufttemperaturen hvert tiende minutt i motsetning til måling av skinnnettemperaturen ved hver togpassering ved Høyset. Dataene fra Horg var også på et annet format enn dataene fra Høyset, og datoene for registreringene ble ikke oppfattet av Excel. Dette førte til en krevende sorteringsjobb. Det kan ikke utelukkes at det skjedde menneskelige feil under sorteringsjobben. Dataene fra Høyset og Horg ble sammenstilt med en feilmargin på ca. 5-10 minutter. Manuell sortering og sammenstilling av dataene fra Høyset og Horg reduserer reliabiliteten til resultatene.

Regresjonen fra Skatval detektorstasjon behandler i alt 12 338 observasjoner av luft- og skinnnettemperaturen, mens regresjonen fra Høyset/Horg består av totalt 1744 observasjoner. Høyset/Horg har større standardfeil og større feilmargin fra prediksjonsintervallet enn regresjonen fra Skatval. I tillegg til et langt lavere antall observasjoner, gjør dette at temperaturmodellen fra Høyset/Horg har lavere validitet enn temperaturmodellen fra Skatval.

Regresjonen fra Skatval har en korrelasjonskoeffisient på 0,89 og en regresjonskoeffisient på 0,79. Det vil si at det er en svært sterk avhengighet mellom luft- og skinnnetemperaturen ved Skatval og 79 % av den totale variasjonen skyldes systematikk, altså variasjon i lufttemperaturen. Ved Høyset/Horg har regresjonen en korrelasjonskoeffisient på 0,75 og en regresjonskoeffisient på 0,56. Korrelasjons- og regresjonskoeffisienten er lavere ved Høyset/Horg enn ved Skatval da det er større usikkerhet knytt til disse dataene.

Det ble valgt et prediksjonsintervall med et 10 % signifikansnivå. Prediksjonsintervallene gir en feilmargin i prediksjonen av skinnnetemperatur på  $\pm 6,2$  °C og  $\pm 8,6$  °C for henholdsvis Skatval og Høyset/Horg. En feilmargin på nesten 9 °C er høyt og utgjør stor usikkerhet i prediksjonen av skinnnetemperaturen.

Både Skatval og Høyset detektorstasjon ligger relativt åpent til på en slette med sporets retning nord-sør. Dette gjør at sporet ligger utsatt til for solinnstråling, vind og regn. Det er imidlertid ikke mulig å skille hvordan ulikt vær påvirker skinnnetemperaturen. Her er det viktig å skille mellom korrelasjon og kausalitet. Det er høy korrelasjon mellom luft- og skinnnetemperaturen, men høy skinnnetemperatur kan også skyldes andre forhold og varierer i stor grad etter lokale forhold. Eksempelvis kan sterk solinnstråling et sted skape høye lokale skinnnetemperaturer, mens et regnskur i nærheten kan senke skinnnetemperaturen. Dette reduserer validiteten til temperaturmodellene.

I kartleggingen av tidligere solslyng ble solslyngen først plottet i Jernbaneverkets kartvisning, så ble data fra nærmeste værstasjon hentet ut fra [senorge.no](http://senorge.no) eller [eklima.no](http://eklima.no), og så ble skinnnetemperaturen estimert ved å bruke temperaturmodellene fra regresjonsanalysen. Den nærmeste værstasjonen det ble hentet data fra var i noen tilfeller et stykke unna hvor det skjedde solslyng/-tendens. Eksempelvis var nærmeste værstasjon E6 Heimdal men siden det manglet data for denne stasjonen, så måtte Voll Trondheim brukes. Det kan være store lokale værforhold i Trøndelag og det er en svakhet at værdataene stammer fra en værstasjon på en annen lokalisasjon med andre sol-, vind- og høydeforhold enn der det skjedde solslyng.

I tillegg ble nyeste data om maskinelt sporvedlikehold (pakking), type befestigelse og kvaliteten på ballasten inkludert for å prøve å se hvordan sporets stabilitet innvirket ved tidligere solslyng. Disse dataene går ikke tilbake til de tidligste tilfellene av solslyng og i mange av tilfellene var kvaliteten på registreringene dårlig. Ballastprofilen ble for eksempel

målt inn i 2014 og da blir det vanskelig å si hvordan ballastprofilen var tilbake i 2002. Det er derfor vanskelig å si hvordan disse faktorene påvirker faren for solsløng.

Det ble sendt ut tre spørsmål til banesjefene for å kartlegge tiltak for å forebygge solsløng, samt for å få innspill til beredskap ved fare for solsløng. Ved utarbeidelse av spørsmålene ble det fokusert på at spørsmålene skulle være enkle å forstå og at det ikke skulle være for mange spørsmål slik at terskelen for å svare var liten, og på den måten få en høy svarprosent. Det var imidlertid lav svarprosent (41 %) noe som kan tyde på spørsmålsrunden kunne vært gjennomført på en annen måte, for eksempel som dybdeintervju med et mindre utvalg personer. Banesjefene har mye å gjøre, så det kan tenkes at andre personer i Jernbaneverket hadde hatt bedre mulighet til å svare på spørsmålene, for eksempel faggrupelederne eller oppsynsmennene.

De to første spørsmålene om hva som gjøres for å forebygge tiltak i dag og hva som er de viktigste langsiktige tiltakene fikk mange like svar, der det viktigste svaret var nøytralisering og kontroll av sporet. Disse to spørsmålene ble tolket relativt likt, men med flere ulike innspill i spørsmål 1. Disse spørsmålene kunne muligens vært slått sammen til ett, og da kunne terskelen for å svare vært lavere. I spørsmål 3 ble det spurt etter konkrete innspill til beredskap ved fare for solsløng. Noen av respondentene tolket dette spørsmålet som beredskap som skal håndtere oppståtte solsløng. Hensikten var å få innspill til beredskap som skal redusere faren for solsløng og ikke håndtere oppstått solsløng. Spørsmålet kunne ha vært formulert på en klarere måte slik at alle oppfattet hva som ble spurt etter.

Spørsmålsrunden har god validitet. Spørsmålene ble sendt ut til banesjefene i Norge. Banesjefen kjenner banestrekningen sin godt, og han skal ha oversikt over alle sikkerhetskritiske som kan påvirke den operative driften, jfr. kapittel 3.3.4 *Spørsmålsrunde*. Innspillene som kom inn i spørsmålsrunden har god forankring i banesjefenes ønsker for beredskap ved fare for solsløng.

## 6.2 Drøfting av beredskap ved fare for solsllyng

Så hvordan kan resultatene brukes til å foreslå en beredskapsplan ved fare for solsllyng? I dette kapitlet skal terskelverdier og beredskapsnivå drøftes, og ulike tiltak ved ulike beredskapsnivå diskuteres.

Terskelverdiene skal definere beredskapen. En terskelverdi kan defineres som

*«Den minimumsstyrke en påvirkning må ha for å gi en bestemt virkning»*

Det er altså en grenseverdi som må overstiges før et nytt beredskapsnivå kan innføres. Fra kapittel 5.3 *Kartlegging av tidligere solsllyng langs Trønderbanen* var det ikke mulig å finne en trend for hvordan sporets sidestabilitet påvirker antall solsllyng langs Trønderbanen. Det tas dermed utgangspunkt i lufttemperatur som terskelverdier. Skinnetemperatur kunne også vært brukt som terskelverdier, men det krever at skinnetermometre plasseres på definerte problemområder. Det kan imidlertid diskuteres om at dersom skinnetermometre utplasseres, så kan det tyde på at man er så usikker på kreftene i sporet at andre tiltak må vurderes for å sikre sporets stabilitet og nøytraltemperatur. Et godt bygd og vedlikeholdt spor skal tåle de skinnetemperaturene som oppstår i Norge om sommeren.

Lufttemperaturer er enkle å forutse fra værprognoser, og med temperaturmodellene fra regresjonsanalysen er det mulig å forutsi skinnetemperaturen når lufttemperaturen er kjent. Dette forutsetter imidlertid at nøytraltemperaturer ligger innenfor nøytralområdet og at kreftene i sporet dermed kan anslås direkte fra skinnetemperaturen.

Fra kapittel 5.2 *Regresjonsanalyse* ble det klart at ved Skatval detektorstasjon er forholdet mellom luft- og skinnetemperaturen over somrene 2012, 2013 og 2014 gitt ved

$$\hat{T}_{skinne} = 1,33 \cdot T_{luft} - 2,1 \quad (19)$$

Fra Høyset/Horg er forholdet mellom luft- og skinnetemperaturen over somrene 2012 og 2013 gitt ved

$$\hat{T}_{skinne} = 1,15 \cdot T_{luft} + 3,25 \quad (20)$$

I kapittel 5.3 *Kartlegging av tidligere solslyng langs Trønderbanen* ble modellene fra regresjonsanalysen brukt til å estimere hva skinnnetemperaturen var ved tidligere solslyng/-tendens. På strekningen Hell-Steinkjer ble skinnnetemperaturen for alle solslyng/-tendensene i snitt estimert til  $31 \pm 6,2$  °C, mens på strekningen Støren-Trondheim ble skinnnetemperaturen i snitt estimert til  $31 \pm 8,6$  °C. I øvre del av prediksjonsintervallene for strekningene går skinnnetemperaturen opp til 46 °C for Hell-Steinkjer og opp til 48 °C for Støren-Trondheim.

Det er innarbeidet i Jernbaneverket at skinnnetemperaturen klassifiseres som høy når den er over 30 °C. Dette vises godt i BaneData da en av de vanligste feilårsakene som er oppgitt er «høy temperatur (>30 °C)».

Avsporingene som følge av solslyng i kapittel 5.1.3 *Avsporinger som følge av solslyng* rapporterer om høye skinnnetemperaturer som en del av årsaken til at solslyngene skjedde, i tillegg til sannsynligvis feil nøytraltemperatur. Avsporingen på Østfoldbanen vestre linje 6.7.2006 rapporterer om skinnnetemperatur anslått til 50-60 °C. Avsporingen på Dovrebanen 22.7.2013 rapporterer om en målt skinnnetemperatur på 41 °C.

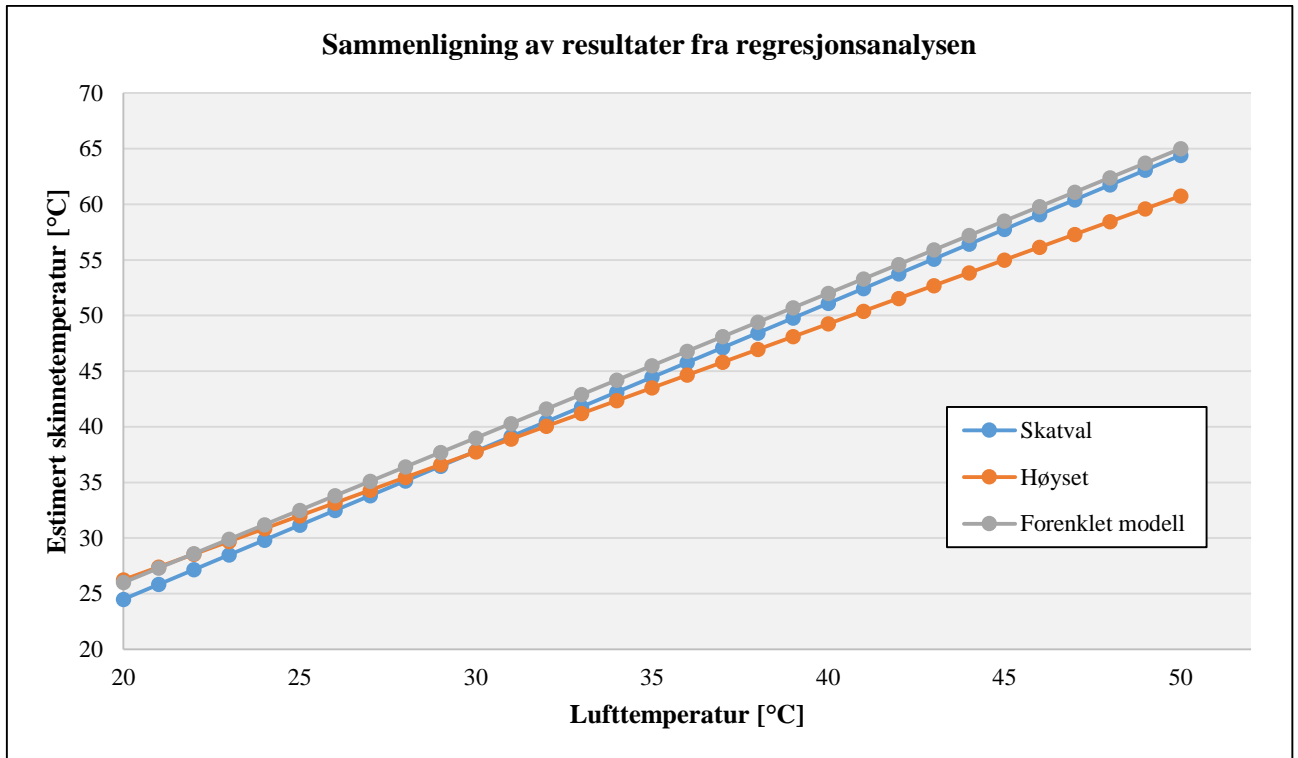
I kapittel 2.4 *Beredskap* ble fasene til dagens værberedskap for ras med en mobiliseringsfase, aksjonsfase og innføring av begrensninger forklart. Disse beredskapsnivåene bygger på terskelverdier for nedbør, med eventuelt bidrag til snøsmelting. Det er imidlertid vanskeligere å differensiere faren for solslyng på samme måte som faren for ras. Det er i større grad «enten eller» ved solslyngfare enn ved fare for ras, og det velges derfor to beredskapsnivå; oransje beredskap og rød beredskap. Oransje beredskap er aksjonsfasen og rød beredskap er innføring av begrensninger på samme måte som værberedskapen for ras.

For å kunne foreslå terskelverdier for hele Trønderbanen foreslås en forenklet, konservativ temperaturmodell gitt ved

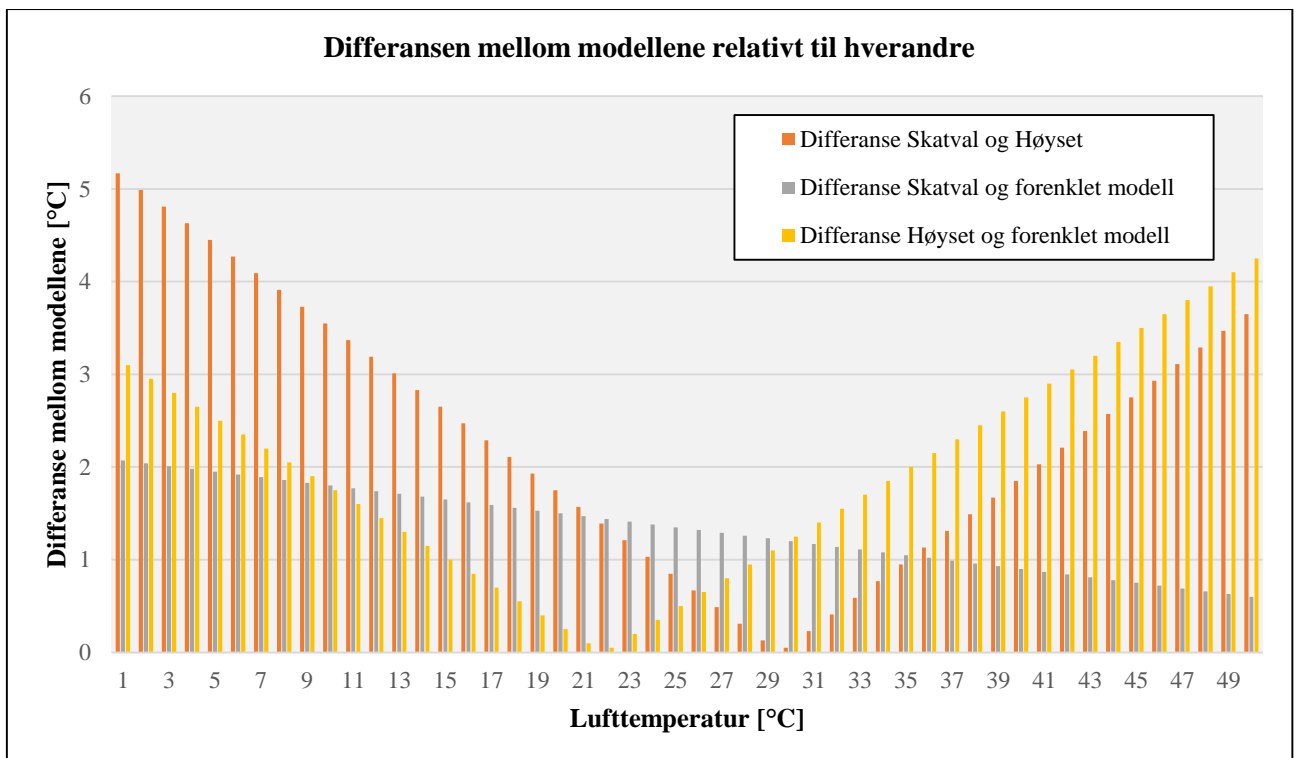
$$\hat{T}_{skinne} = 1,3 \cdot T_{luft} \quad (21)$$

Temperaturmodellen i ligning (21) vil gjøre det enklere å praktisk kunne anslå skinnnetemperaturen langs hele Trønderbanen. Figur 36 viser en sammenligning av temperaturmodellene gitt i ligning (19), (20) og (21).





Figur 36: Sammenligning av temperaturmodellene



Figur 37: Differanse i predikert skinnetemperatur mellom modellene

Figur 37 viser differansen mellom de ulike temperaturmodellene relativt til hverandre. Differansen mellom modellene fra Skatval og Høyset er svært liten for lufttemperaturer på 27-31 °C, mens differansen mellom den forenkledede modellen og Skatval er synkende med økende lufttemperatur. Differansen mellom den forenkledede modellen og Høyset er minst ved lufttemperaturer på ca. 21-22 °C. Dette tyder på at den forenkledede modellen passer bedre for temperaturmodellen fra Skatval. Differansen mellom den forenkledede modellen, Høyset og Skatval er innenfor prediksjonsintervallene til temperaturmodellene fra Skatval og Høyset, gitt ved ligning (19) og (20). Den forenkledede modellen kan derfor ansees som realistisk for hele Trønderbanen.

Ved bruk av den forenkledede temperaturmodellen gitt i ligning (21) foreslås følgende terskelverdier for Trønderbanen:

Tabell 25: Terskelverdier for beredskap ved solslyngfare

Beredskapsnivå	Terskelverdier $T_{\text{luft}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{skinne}} [^{\circ}\text{C}]$	Fase
Oransje	$24 \leq T_{\text{luft}} < 32$	$31 \leq T_{\text{skinne}} < 42$	Aksjonsfase
Rødt	$T_{\text{luft}} \geq 32$	$T_{\text{skinne}} \geq 42$	Innføring av begrensninger

Terskelverdiene baseres på døgnetts varmest time.

Tabell 25 viser forslag til terskelverdier for oransje og rød beredskap. Det er valgt å legge terskelverdien for rød beredskap høyt på 32 °C på grunn av at det må være begrunnet at banen stenges for å redusere risiko for ulykker som følge av solslyng. Risikobegrepet defineres som produktet av sannsynlighet og konsekvens, og målet er å unngå at det skjer sikkerhetskritiske konsekvenser som følge av solslyng. En stengning er et alvorlig tiltak som medfører store forsinkelser og tap av inntekt. Oransje beredskap er valgt for lufttemperaturer på 24-32 °C. Ved bruk av ligning (21) gir det skinnnetemperaturer på 31–42 °C. En skinnnetemperatur på 31 °C samsvarer med resultatene i kapittel 5.3 *Kartlegging av tidligere solslyng langs Trønderbanen*. Det er også en skinnnetemperatur som allerede karakteriseres som høy i Jernbaneloverket (> 30 °C).

Om det skal innføres gul beredskap kunne det vært aktuelt å gjøre hele mai om til gul beredskap. Da kunne problemområder kartlegges, skinnnetermometre utplasseres og ressurser

mobiliseres før sommervarmen slår inn. Gul beredskap vil da ikke være en del av den trinnvise beredskapen som reduserer den akutte solsløyngfaren.

I følge teknisk regelverk<sup>7</sup> skal det gjennomføres ekstravisitasjoner etter perioder med sterk vedvarende varme og når det utføres sporarbeider som svekker sporets stabilitet. Det skal holdes spesielt tilsyn med skarpe kurver på smale fyllinger og strekningsavsnitt som erfaringsmessig er utsatt for solsløyng eller solsløyngtendenser. Tilsynet skal gjennomføres i døgnetts varmeste timer og/eller før tog skal passere, og tilsynet skal ikke opphøre før temperaturen er fallende.

Oransje beredskap er aksjonsfasen og vil bestå av tiltak som reduserer den akutte risikoen for solsløyng. I aksjonsfasen er hensikten å redusere faren for at det skjer solsløyng eller solsløyngtendens. Aksjonsfasen skal øke sporets stabilitet og/eller sikre at nøytraltemperaturen ligger innenfor nøytralområdet. I tillegg vil saktekjøring føre til redusert risiko for ulykker eller skader på sporet ved en eventuell solsløyng eller solsløyngtendens. Aktuelle tiltak i aksjonsfasen er ekstravisitasjoner med spesielt fokus på problemområder, hastighetsnedsettelse, kapping av sporet ved minste sidebevegelse, pukksupplering og baksing av sporet. På grunn av ekstravisitasjoner og hastighetsnedsettelser kan aksjonsfasen påvirke den øvrige togtrafikken ved utluking av andre tog for arbeidstog eller at togene må kjøre saktere enn normalt.

Ved rød beredskap er det overhengende solsløyngfare, og det er høy risiko for ulykker som følge av solsløyng. Rød beredskap er alvorlig og banen stenges. I rød beredskap er hensikten å unngå at solsløyng fører til ulykker, og dermed bidra til at sikker togframføring blir ivaretatt. Banen må være stengt til den overhengende faren for solsløyng er redusert, enten ved at det innføres oransje beredskap eller at beredskapen går til normal driftssituasjon. I de fleste tilfeller vil det være snakk om noen timer til temperaturen senkes eller til sporet kan kappes til kortere sporavsnitt, og senere nøytraliseres. Om det vurderes at togframføring er trygt skal det innføres hastighetsnedsettelse til sikthastighet.

---

<sup>7</sup> [https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Vedlikehold/Sporjustering\\_og\\_stabilisering#Tilsyn\\_med\\_helsveist\\_spor](https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Vedlikehold/Sporjustering_og_stabilisering#Tilsyn_med_helsveist_spor)

Umiddelbare og langsiktige tiltak som forebygger solslyng henger sammen. For eksempel vil kartlegging av utsatte områder være et langsiktige tiltak som anbefales å gjøre om våren, men vil spille en viktig rolle om sommeren. Dette vil gi en god pekepinn på hvor man bør gjennomføre umiddelbare tiltak for å redusere risiko for farlige situasjoner som følge av solslyng. Det er derfor hensiktsmessig å anbefale langsiktige tiltak i kombinasjon med umiddelbare tiltak, som vil utgjøre den trinnvise beredskapen. Disse langsiktige tiltakene vil i stor grad bygge på resultatene fra kapittel 5.4 *Resultater fra spørsmålsrunden*.

Roller og ansvarsfordeling er svært viktig å avklare ved en beredskapsplan, og vil gjøre det enklere å varsle om fare til riktig tid. Aktuelle aktører vil være banesjef, administrasjonsvakt, værvakt, beredskapsvakt og togleder. Disse rollene er definert i dagens værberedskap for ras, og ved å inkludere beredskap ved solslyngfare som en tilleggsinstruks i dagens værberedskap vil disse rollene også gjelde her. Værvakt er den rollen som har ansvar for overvåkning av været, vurdere observasjoner langs sporet og bestemme beredskapsnivået. Han skal også sørge for at informasjon om beredskapen blir gitt til banesjef, administrasjonsvakt, beredskapsvakt og togleder. Toglederen skal varsle lokførerne om beredskapsnivået, samt innhente observasjoner fra lokførerne og informere værvakt. Beredskapsvakten skal utføre ekstravisitasjoner og kontrollere sporets tilstand.

### **6.2.1 Bruksområde**

Studieområdet i analysen var jernbanestrekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer, og det er disse strekningene temperaturmodellene er basert på. Beredskapsplanen med tilhørende terskelverdier kan derfor brukes av Trønderbanen, og muligens Område Midt. Tiltakene som foreslås kan brukes i hele landet og vil bidra til å redusere faren for solslyng. Men det må vurderes hvorvidt terskelverdiene kan brukes. Det er tvilsomt at terskelverdiene gitt i tabell 25 vil være like gyldige for Sørlandet som de er for Trøndelag. Klimaforskjeller vil spille inn og områder med et annet klima enn Trøndelag vil ha et annerledes forhold mellom luft- og skinnnettemperaturen.

Et forslag til beredskap ved solslyngfare kan tenkes å inkluderes som en tilleggsinstruks i dagens værberedskap for ras. Dersom det skal være aktuelt å inkludere for hele landet, så må det gjennomføres analyser med et større datagrunnlag. Dataene må være representative for hele landet, og det anbefales at en multippel regresjonsanalyse gjennomføres for å undersøke hvordan andre værforhold innvirker på skinnnettemperaturen.

### 6.3 Vurdering av kildebruk

De viktigste kildene som ble brukt mest i denne masteroppgaven er

- Esveld, C., 2001, *Modern Railway Track*
- Sørli, P.H., rev. 2008, *Krefter i helsveist spor*
- Kerr, A., 2003, *Fundamentals of Railway Track Engineering*
- Chapman, Thorne, et. al, 2007, *Modelling of rail surface temperatures: a preliminary study*
- Blakstad, F., 1995, *Anvendt statistikk for trafikkingeniører*
- Kish, A. & Samavedam, G., 2013, *Track Buckling Prevention: Theory, Safety Concepts and Applications*
- Karlsen, K., 2012, *STY-601614: Instruks for tiltak ved ugunstige vær-situasjoner, Jernbaneverket*

Det teoretiske grunnlaget tar i stor grad utgangspunkt i *Modern Railway Track*, *Krefter i helsveist spor*, *Fundamentals of Railway Track Engineering* og *Modelling of rail surface temperatures: a preliminary study*. Disse belyser hvilke faktorer som påvirker faren for solslang, og har god validitet.

*Modelling of rail surface temperatures: a preliminary study* var inspirasjonen til regresjonsanalysen i denne oppgaven. I den studien blir en empirisk sammenheng mellom luft- og skinnnettemperaturen beskrevet, og ideen om å kunne praktisk forutsi skinnnettemperaturer langs Trønderbanen ble til. Lee Chapman jobber med anvendt klimatologi ved University of Birmingham og har over 50 publikasjoner. Et av hans spesialområder er hvordan klimaet påvirker infrastrukturen.

Coenraad Esveld er en av verdens ledende på jernbaneteknikk og boken hans, *Modern Railway Track*, er i skrivende stund blitt sitert 1010 ganger på Google Scholar. Han har også skrevet *Improved knowledge of CWR track* og *A new safety philosophy for CWR* som også er brukt i masteroppgaven.

I litteraturstudien ble *Track Buckling Prevention: Theory, Safety Concepts and Applications* brukt for å undersøke om det finnes noen sikkerhetskriterier mot solslyng. Dette er en rapport som tar for seg forskningen som er gjort på helsveiste spor i USA de siste 20 årene. Utviklingen av det deterministiske analyseprogrammet CWR-Buckle er også beskrevet. Rapporten er imidlertid svært teoretisk og har hatt liten relevans for arbeidet med beredskap i denne masteroppgaven. Dette er også nevnt i kapittel 6.1.1 *Resultater fra litteraturstudiet*. Videre i litteraturstudiet beskriver Xiaopei Cai ulike metoder for å måle skinnnetemperaturen. Dette er upublisert materiale som ble tilsendt av veileder som støttemateriale. Han beskriver ulike termometre for å måle skinnnetemperatur, og lister opp fordeler og ulemper ved de ulike løsningene. Det er imidlertid vanskelig å bedømme troverdigheten til rapporten da det virker som arbeidet er halvgjort og at forfatteren har hatt hastverk.

*Anvendt statistikk for trafikkingeniører* av Finn Blakstad ble publisert i 1995, ved Institutt for samferdselsteknikk ved NTH. Den tar for seg relevant statistikk for trafikkingeniøren, og ble først introdusert for undertegnede i emnet TBA4320 Trafikksikkerhet og risiko våren 2014. Teorien er lettlest og konsis, og forklarer statistikken på en enkel måte. Teorien om usikkerhet ved regresjonsanalysen er hentet derfra, og har høy validitet. I tillegg er en presentasjon fra Institutt for matematiske fag brukt for å definere prediksjonsintervallet.

*Instruks for tiltak ved ugunstige vær-situasjoner* har dannet grunnlaget for denne masteroppgaven. Det er en instruks i Jernbaneverket som definerer den trinnvise beredskapen ved gitte terskelverdier for nedbør og med eventuelt bidrag fra snøsmelting. Instruksen har høy validitet og er en troverdig kilde. Den har en enkel oppbygning og er lett å forstå. *Instruks for tiltak ved ugunstige vær-situasjoner* har hatt stor relevans for denne masteroppgaven. Forslaget til beredskap ved solslyngfare i kapittel 7 *Forslag til beredskap ved fare for solslyng* er bygget på samme måte som denne instruksen med det formål at den enkelt kan inkluderes som en tilleggsinstruks, og at leseren lett skal kunne lese og forstå den.

6. februar 2015 ble det avholdt et solslyngseminar i regi av Jernbaneverket. Seminaret samlet relevant personale fra Område Midt for å få en oppdatering på hvordan forebygge solslyng og praktisk håndtere solslyng. Foredragene ble holdt av svært kunnskapsrike ressurspersoner fra Teknologi, og seminaret bidro til å øke fokuset på solslyngproblematikken blant personalet som jobber langs linjen. Solslyngseminaret var en god start på arbeidet med denne masteroppgaven. Kildereferansen (Løhren 2015) er fra dette seminaret.

## 7 Forslag til beredskap ved fare for solsllyng

I dette kapitlet foreslås det både umiddelbare og langsiktige tiltak som vil redusere faren for solsllyng, samt redusere risikoen for ulykker som følge av solsllyng. Beredskap ved solsllyngfare tar utgangspunkt i samme oppsett som værberedskapen ved ras i «Instruks for tiltak ved ugunstige vær-situasjoner», på den måten kan den enkelt inkluderes som en tilleggsinstruks.

### 7.1 Tiltaksplan

Tiltaksplanen består av både umiddelbare og langsiktige tiltak. De umiddelbare tiltakene vil utgjøre den trinnvise beredskapen ved fare for solsllyng, mens de langsiktige tiltakene anbefales å inngå i det forebyggende vedlikeholdet til banestrekningene.

#### 7.1.1 Roller og ansvar

Tabell 26 viser roller og ansvar som gjelder ved dagens instruks for tiltak ved ugunstige vær-situasjoner, og som også vil gjelde i beredskapen ved fare for solsllyng.

Tabell 26: Roller og ansvar

Rolle	Ansvar
Banesjef	Leder for en banestrekning og dens organisasjon. Eier av infrastruktur
Administrasjonsvakt	Banesjefens fullmakter ved avvikshåndtering utenfor arbeidstid. Har ansvar for nødvendig rapportering i linjeorganisasjonen ved spesielle værforhold
Værvakt	Rolle gitt av banesjef for å utføre vakt med overvåkning av vær, vurdere observasjoner langs sporet og sette beredskapsnivå etter værforhold. Sørge for informasjon til beredskapsvakt og administrasjonsvakt om vær-situasjonens påvirkning av infrastrukturen.
Togleder	Den som overvåker og leder togframføring og annen virksomhet som har betydning for trafikksikkerheten
Beredskapsvakt linjen	Utfører Infrastruktur drift, ansvarlig for å iverksette ekstravisitasjon på egen eller værvaktas initiativ. Skal være operativ og gjennomføre målinger av skinnetemperatur ved solsllyngfare, og kontrollere områder/strekninger som er definert kritiske.

## 7.1.2 Trinnvis beredskap ved fare for solslyng

I tillegg til normal drift foreslås to beredskapsnivå med terskelverdier som må overgås for at beredskapen skal øke. I tillegg må andre sikkerhetskritiske forhold som kan påvirke faren for solslyng vurderes etter skjønn fra den enkelte værvakt. Dette kan eksempelvis være nedsatt sporstabilitet etter sporjusteringer. Terskelverdiene for lufttemperatur gjelder for jernbanestrekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer, og tar utgangspunkt i døgnetts varmeste time.

Figur 38 viser en skisse over den foreslåtte beredskapen ved solslyngfare.

<b>Normal driftssituasjon</b> $T_{\text{luft}} < 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$	<b>Aksjonsfase</b> $24 \leq T_{\text{luft}} < 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$	<b>Innføring av begrensninger</b> $T_{\text{luft}} \geq 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$
<ul style="list-style-type: none"><li>• Være bevisst på været og følge med på værprognoser</li><li>• Gjennomføre ordinære visitasjoner og være klar over problemområder</li><li>• Vurdere om økt beredskap skal innføres</li><li>• Ved vedvarende høy varme utover dagen kan økt beredskap vurderes</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hensikt: Redusere faren for solslyng</li><li>• Lokførere informeres om høy fare for solslyng</li><li>• Ekstra visitasjoner med spesielt fokus på tidligere problemområder og krappe kurver (<math>R \leq 400 \text{ m}</math>) med smale fyllinger</li><li>• Ved minste sidebevegelse i sporet skal sporet kappes og det skal gjøres pukksupplering ved behov</li><li>• Utlukking av tog for arbeidstog om nødvendig</li><li>• Vurdere hastighetsnedsettelse til sikthastighet</li><li>• Vurdere økt beredskap eller senkning av beredskapen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hensikt: Redusere risiko* for ulykker som følge av solslyng</li><li>• Banen stenges eller hastighetsnedsettelse til sikthastighet til temperaturen synker eller det er mulig å kappe sporet.</li><li>• Konstant overvåkning av situasjonen, og vurdere senkning av beredskapen</li><li>• Ekstravisitasjon skal gjennomføres, og faren skal vurderes som over før beredskapen kan senkes.</li></ul>

Figur 38: Trinnvis beredskap ved fare for solslyng

\*Risiko defineres som produktet av sannsynlighet og konsekvens.



## Hvit beredskap

Hvitt beredskap er normal driftssituasjon. Værvakt skal være bevisst på været og følge med på værprognoser, og ordinære visitasjoner skal gjennomføres. Beredskapsvakt er klar over problemområder og steder hvor det har blitt gjort sporjusteringer som kan ha påvirket sporets stabilitet eller nøytraltemperatur. Ordinære visitasjoner gjennomføres. Normal driftssituasjon vil gjelde for lufttemperaturer opp til 24 °C.

## Oransje beredskap

Oransje beredskapsnivå er aksjonsfasen, og gjelder for lufttemperaturer over 24 °C og opp til 32 °C. Hensikten med oransje beredskap er å redusere fare for at det skjer solslyng. Det kan fortsatt være normal drift i aksjonsfasen, men det vil være redusert hastighet, ekstravisitasjoner og inspeksjoner ved tidligere kartlagte problemområder. Ekstravisitasjoner kan skape forsinkelser eller at enkelte tog må innstilles.

Aktiviteter som skal gjennomføres i aksjonsfasen er:

- \*Værvakt fristilles i så stor grad som mulig fra andre arbeidsoppgaver slik at han kan fokusere på værberedskap
- Værvakt skal varsle beredskapsvakt og be om ekstravisitasjoner eller inspeksjoner av tidligere kartlagte problemområder.
- \*Det innføres sikthastighet
- \*Værvakt oppretter kontakt med fagekspertise etter behov
- \*Togleder skal varsle lokførerne om høy solslyngfare, og samtidig be om observasjoner fra lokførerne.
- \*Ved minste sidebevegelse i sporet skal sporet kappes og nødlaskes frem til nøytralisering er mulig. Det bør spesielt fokuseres på krappe kurver ( $R \leq 400$  m) med smale fyllinger, solrike steder og/eller steder hvor det har vært sporjusteringer. Hvis det tidligere har blitt kartlagt utsatte steder skal disse fokuseres på.
- Skjerpet overvåking av situasjonen. Basert på værprognoser, observasjoner fra lokførere og råd fra fagekspertise skal værvakt vurdere om beredskapen økes eller senkes.

\*Aktiviteter også gjeldende for rød beredskap.

## **Rød beredskap**

Ved rød beredskap skal det innføres begrensninger, og gjelder for lufttemperaturer lik eller over 32 °C. Ved så høye temperaturer er det høy fare for solslyng, og hensikten med rød beredskap er å redusere risikoen for ulykker som følge av solslyng. Banen stenges til temperaturen har gått ned eller frem til sporet har blitt kappet. Dersom det innføres sikthastighet istedenfor stengning, skal dette være begrunnet og vurdert som forsvarlig av værvakt, beredskapsvakt og/eller banesjef. Gjentakende punkter (\*) fra oransje beredskap skal gjennomføres ved anledning eller behov. Ved avslutning av rød beredskap skal det gjennomføres en ekstravisitasjon av banestrekningen før normal trafikk tillates.

### 7.1.3 Langsiktige tiltak for å redusere faren for solslyng

Tabell 27 viser langsiktige tiltak for å redusere faren for solslyng, og vil skape en mer robust jernbane. Disse tiltakene bør gjennomføres før sommeren slik at banestrekningen er bedre rustet til å håndtere de temperaturinduserte kreftene som oppstår i sporet når sommervarmen slår inn. Det er foreslått måleindikatorer som kan brukes til å måle effekten av tiltakene. I noen tilfeller må banene definere et mål for måleindikatorene, slik at effekten av tiltakene kan sammenlignes med ønsket mål.

Tabell 27: Langsiktige tiltak for å redusere faren for solslyng

Tiltak	Formål	Måleindikator
Kartlegge problemområder. Eksempelvis steder med solslyng/-tendens foregående år eller skarpe kurver med smalt formasjonsplan/utilstrekkelig ballastskulder og sterk solinnstråling	Kartlegge områder som med stor sannsynlighet kan få solslyng/-tendens. Ekstra oppmerksom på disse områdene gjennom sommeren	Antall solslyng/-tendens foregående år
Nøytralisere sporet på utsatte steder og måle inn mot VUL-merker	Ha kontroll over nøytraltemperaturen og sporets beliggenhet	Lengde spor som nøytraliseres (m)
Ferdigstille GVUL/VUL	Få kontroll over sporets beliggenhet og dermed kunne kontrollere nøytraltemperaturen	Grad av ferdigstillelse (%)
Plassere ut RTMU eller manuelle skinnetermometre på våren	Ha kontroll over skinnetermperatur gjennom sommeren og kunne samle inn temperaturdata	Antall skinnetermometre utplassert
Pukksupplering og bytte av slitte befestigelser	Øke sporets sidestabilitet og rammestivhet før sommervarmen	Lengde av spor (m)
Forbedre rapporteringsrutiner i BaneData	Gi et bedre og mer reelt overblikk over nødvendig vedlikehold. Bli en bedre informasjonskilde for sikkerhetsarbeidet.	-
Kompetanseheving og god erfaringsoverføring	Øke kompetansen til alle i baneorganisasjonen. Sikre at sporarbeider skjer på en korrekt og rasjonell måte	Fagseminarer, webkurs

Kartlegging av utsatte steder vil gi værvakt og beredskapsvakt en pekepinn på steder som har høyere fare for solslyng, hvor det er hensiktsmessig å gjennomføre målinger av skinnnetemperaturen, og hvor det eventuelt skal nøytraliseres og pukksuppleres. Utsatte steder kan defineres som steder langs linjen hvor det er høyere sannsynlighet for at det skjer solslyng/-tendens og/eller vil forårsake alvorlige konsekvenser ved solslyng. Dette kan eksempelvis være skarpe kurver med smalt formasjonsplan og høy solinnstråling, steder med feil nøytraltemperatur eller med antatt feil nøytraltemperatur, bratte fjellskjæringer der det er vanskelige redningsforhold ved en eventuell avsporing, og lignende. Her spiller lokalkunnskapen om banestrekningene en viktig rolle. Kompetanseheving og god erfaringsoverføring når erfarne folk slutter vil være svært viktig for å sikre god lokalkunnskap over hele linjestrekningen.

På utsatte steder vil nøytralisering<sup>8</sup> og innmåling av sporet før sommervarmen slår inn være gunstig. Da er man sikker på at nøytraltemperaturren er innenfor nøytralområdet og man har kontroll over sporets beliggenhet i forhold til VUL-merker. Det kan også være gunstig å legge nøytraltemperaturren i øvre del av nøytralområdet for å redusere trykkreftene om sommeren. Dette kan imidlertid bare gjøres i områder med relativt milde vintre slik at strekkreftene om vinteren ikke blir for store og resulterer i skinnebrudd, som beskrevet for Bergensbanen i kapittel 4.1.2 *Nøytraltemperatur*.

Varig utfesting av linjen (GVUL/VUL) definerer sporets beliggenhet i vertikal- og horisontalplanet. Et godt utbygd fastmerkenett gjør det mulig å kontrollere sporets beliggenhet og avgjøre om det har skjedd uønsket sideforskyvning i kurver. Dette kan være spesielt viktig etter sporarbeider eller etter vinteren da sporet har vært utsatt for strekkrefter. Bevegelse av sporet kan endre nøytraltemperaturren og kan være kritisk når sommervarmen slår inn. Tabell 18 viser avsporinger der solslyng var en direkte årsak til at avsporingene skjedde. I alle rapportene fra SHT påpekes det at nøytraltemperaturren sannsynligvis var for lav og at det var en kritisk årsak til at avsporingen skjedde.

---

<sup>8</sup> Prosedyre for nøytralisering fra teknisk regelverk:  
[https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsveist\\_spor/Vedlegg/Prosedyre\\_for\\_n%C3%B8ytralisering](https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsveist_spor/Vedlegg/Prosedyre_for_n%C3%B8ytralisering)

Utplassering av skinnetermometre gjør det å enkelt overvåke skinnetemperaturer. RTMU (Rail Temperature Monitor Unit) som beskrevet i kapittel 4.1.1 *Skinnetemperatur* og i vedlegg 11.6 *RTMU produktspesifikasjoner* gjør det mulig å automatisk varsle værvakt ved høye temperaturer, samt å samle inn temperaturdata som kan brukes til videre analyser.

Pukksupplering og bytte av slitte befestigelser vil øke sporets sidestabilitet og rammestivhet. Dette gjør at sporet er bedre rustet for å takle trykkreftene som oppstår i sporet om sommeren, samt at robustheten til sporet øker. Spesielt bør det fokuseres på økning av ballastskulderen i skarpe kurver. For kurver med smale formasjonsplan kan det være nødvendig å øke formasjonsplanets bredde for å forbedre sporets sidestabilitet.

Forbedret rapportering i BaneData vil gi et mer reelt bilde av vedlikeholdsbehovet og banene kan dermed enklere avgjøre hvor mye ressurser som skal settes inn og hvor disse ressursene skal settes inn. Det vil også gjøre det enklere å kartlegge problemområder som er spesielt utsatt for solslyng dersom man tar utgangspunkt i solslyng eller solslyngtendens foregående år. Større fokus på feilårsak vil også gjøre BaneData til en bedre datakilde for sikkerhetsarbeidet.



## 8 Konklusjon

Solslyng har et stort skadepotensiale. Avsporinger som følge av en uventet solslyng kan føre til personskader og store ødeleggelse både i sporet og på det rullende materiellet. Det vil derfor være hensiktsmessig å innføre trinnvis beredskap ved fare for solslyng som er muligens kan inkluderes i dagens værberedskap til Jernbaneverket. En eventuell tilleggsinstruks trenger imidlertid utprøving, og et større datagrunnlag må ligge til grunn for å bestemme terskelverdier for hele landet. Trinnvis beredskap ved fare for solslyng vil bidra til at faresituasjoner ikke utvikler seg til ulykkessituasjoner og bidrar dermed til økt sikkerhet på jernbanen om sommeren.

En beredskapsplan med to beredskapsnivå med tilhørende terskelverdier for lufttemperatur er foreslått. De to nivåene består av en aksjonsfase (oransje beredskap) og innføring av begrensinger (rød beredskap). Terskelverdiene må overskrides for at beredskapen skal øke. Hensikten med aksjonsfasen er å redusere fare for solslyng, mens hensikten med rød beredskap er å redusere risikoen for ulykker som følge av solslyng. Det foreligger også forslag til langsiktige tiltak som skal skape et mer robust jernbanespor og dermed forebygge solslyng. Terskelverdiene for beredskapsnivåene som er foreslått gjelder i første omgang for Trønderbanen da dataene i regresjonsanalysen er fra to steder langs strekningene Støren-Trondheim og Hell-Steinkjer.

Feil nøytraltemperatur og høy skinnnettemperatur er de viktigste årsakene til at solslyng skjer. Dersom sporet i tillegg har redusert sidestabilitet, for eksempel ved for lite ballastprofil eller etter flom eller ras, vil faren for solslyng være stor.

Ved bruk av temperaturmodellene fra regresjonsanalysen ble skinnnettemperaturen anslått ved tidligere solslyng og solslyngtendens langs Trønderbanen. For strekningen Støren-Trondheim ble den gjennomsnittlige skinnnettemperaturen ved tidligere solslyng og solslyngtendenser estimert til  $31 \pm 8,6$  °C. På strekningen Hell-Steinkjer ble den gjennomsnittlige skinnnettemperaturen estimert til  $31 \pm 6,2$  °C. Den kritiske skinnnettemperaturen vil imidlertid være avhengig av lokale forhold, og lokalkunnskap om sikkerhetskritiske forhold langs sporet er derfor svært viktig. Alle undersøkte solslyng og solslyngtendenser langs Støren-Trondheim skjedde i krappe kurver med radius mindre enn 400 m, mens langs Hell-Steinkjer skjedde 8 av 11 tilfeller i krappe kurver med radius mindre enn 400 meter.

Det finnes metoder for å måle både skinne- og nøytraltemperaturen, og fra disse målingene kan man beregne opptredende krefter i sporet. RTMU'er (Rail Temperature Monitor Units) kan varsle om høy skinnetemperatur ved å sende tekstmelding eller epost til værvakt.

Man trenger generelt bedre kontroll med nøytraltemperaturen i sporet. Nøytraltemperaturen kan måles enten direkte ved bruk av VERSE eller indirekte ved innmåling av sporet mot VUL eller GVUL-merker. Etter sporjusteringer er det viktig at sporet måles inn mot VUL, og eventuelt nøytraliseres, slik at sporet kan kontrolleres igjen dersom man mistenker at nøytraltemperaturen er endret.

Data fra BaneData har i stor grad blitt brukt i denne masteroppgaven. Kvaliteten på registreringene BaneData er varierende, og i mange tilfeller er det dobbel- og trippelregistreringer av samme feil. I tillegg mangler det ofte feilårsak. Ved registrering av feil langs linjen må det fokuseres mer på hvorfor det er en feil i spor og ikke bare konstatere at der er en feil. På den måten kan BaneData i større grad anvendes til sikkerhetsarbeid i fremtiden.



## 9 Videre anbefalinger

Det anbefales at problemområder med høy fare for solslyng og hvor det ikke kan utføres umiddelbare tiltak for å redusere faren, kartlegges og at skinnetermometre plasseres på disse stedene før sommervarmen slår inn. Problemområder kan være steder langs linjen hvor det var solslyng eller solslyngtendens foregående år, steder med sterk solinnstråling, steder hvor sporets sidestabilitet har blitt redusert eller hvor man mistenker endret nøytraltemperatur. Her vil god kompetanse og lokalkunnskap om linjen være svært viktig.

Ved spesielt utsatte steder anbefales det å legge nøytraltemperaturen i øvre del av nøytraltemperaturområdet. Med tanke på faren for solslyng bør nøytraltemperaturen legges så høy som mulig forutsatt at det ikke fører til skinnebrudd om vinteren.

Videre anbefales det at en multippel regresjonsanalyse gjennomføres for å undersøke hvordan andre værforhold påvirker skinneterperaturen. En multippel regresjonsanalyse undersøker effekten på en avhengig variabel ( $Y$ ) fra flere uavhengige variabler ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ). En slik analyse krever imidlertid omfattende data fra samme sted langs linjen. Dette kan medføre at Jernbaneverket må plassere ut skinnetermometre i sporet hvor værstasjonene deres er. Dersom det er mulig å innhente data om skinneterperatur, lufttemperatur, nedbør og solinnstråling fra samme sted langs linjen, så kan det danne grunnlag for en ny masteroppgave. Validiteten til temperaturmodellene i denne masteroppgaven kan også undersøkes på den måten.

Framtidige registreringer i BaneData bør ha større fokus på feilårsak. På den måten kan BaneData brukes i større grad i beredskapsarbeid. Forbedring av rapporteringsrutiner kan gjøres gjennom kursing av relevant personale, bevisstgjøring og/eller seminarer. Ved bevisstgjøring må hele driftsorganisasjonen gjøres klar over fordelene ved gode registreringer i BaneData, og en god kultur for registreringer må skapes i driftsorganisasjonene.

Dovrebanen og Ofotbanen har historisk sett slitt mest med solslyngproblematikken. Det anbefales at spesielt disse banene tar i bruk et beredskapssystem for å redusere faren for solslyng på en bedre måte.



## 10 Kilder

Ahmad, S. S., et al. (2013). "Development of a unified railway track stability management tool to enhance track safety." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit **227**(5): 493-516.

Ahmad, S. S. N., et al. (2009). A Comparative Study of Track Buckling Parameters of Continuous Welded Rail. Proceedings of the 8th International Conference on Mechanical Engineering Proceedings of the 8th International Conference on Mechanical Engineering.

Bance (2015). "RTMU11 - Rail temperature monitor unit." Retrieved 7.6.2015, from <http://bance.com/wp-content/uploads/2010/03/RTMU.pdf>.

Bartoli, I., et al. (2010). "Stress Dependence of Ultrasonic Guided Waves in Rails." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2159**.

Blakstad, F. (1995). Anvendt statistikk for trafikkingeniører. Trondheim, NTH, Institutt for samferdselsteknikk.

Cai, X. (2015). Rail Temperature Test Method

Chapman, L., et al. (2008). "Modelling of rail surface temperatures: a preliminary study." Theoretical and Applied Climatology **92**(1-2): 121-131.

Esveld, C. (1998). Improved knowledge of CWR track. Interactive Conference on Cost Effectiveness and Safety Aspects of Railway Track, UIC/ERRI, Paris.

Esveld, C. (1998). "A new safety philosophy for CWR “." CROW, June.

Esveld, C. (2001). Modern railway track, MRT Productions.

Fateh, M. (2010). Automated Measurement of Stress in Continuous Welded Rail.

Hayes, A. P. (2008). MAPS-SFT, a new tool in the infrastructure manager's toolbox. Railway Condition Monitoring, 2008 4th IET International Conference on.

Infrastruktur Vedlikehold, J. (2014). Plan for varig utfesting av linjen, Jernbaneverket.

Jernbanekompetanse.no (2015). "Sporets sidemotstand." Retrieved 09.03.2015, from [http://jernbanekompetanse.no/wiki/Sporets\\_sidemotstand](http://jernbanekompetanse.no/wiki/Sporets_sidemotstand)

Jernbaneverket (2011). Håndbok for vedlikehold.

Jernbaneverket (2012). "Teknisk regelverk: Prosedyre for bruk av VERSE målemetode for fastsetting av nøytraltemperatur i helseviste skinner." Retrieved 12.03.2015, from [https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsevist\\_spor/Vedlegg/Prosedyre\\_for\\_bruk\\_av\\_VERSE\\_m%C3%A5lemetode\\_for\\_fastsetting\\_av\\_n%C3%B8ytraltemperatur\\_i\\_helseviste\\_skinne#Valg\\_av\\_teststrekning](https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Bygging/Helsevist_spor/Vedlegg/Prosedyre_for_bruk_av_VERSE_m%C3%A5lemetode_for_fastsetting_av_n%C3%B8ytraltemperatur_i_helseviste_skinne#Valg_av_teststrekning).

Karlsen, K. (2012). STY-601614: Instruks for tiltak ved ugunstige vær-situasjoner, Jernbaneverket.

Kerr, A. D. (2003). Fundamentals of railway track engineering. Omaha, Neb., Simmons-Boardman Books.

Kish, A. and G. Samavedam (2013). Track Buckling Prevention: Theory, Safety Concepts, and Applications.

Lim, N.-H., et al. (2008). "Parametric study on stability of continuous welded rail track-ballast resistance and track irregularity." Int. J. Steel Structures **8**: 171-181.

Lindqvist, B. (2012). Statistikk for samfunnsvitere, NTNU.

Løhren, A. H. (2015). Solslyngseminar 6. februar 2015

Mariathas, T. (2013). Metodikk for beredskapsanalyse. Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk. Trondheim, NTNU.

Nucera, C. (2012). Propagation of nonlinear waves in waveguides and application to nondestructive stress measurement: 115-167.

Profillidis, V. A. (2006). Railway management and engineering. Aldershot, Hampshire, Ashgate.

Read, D. (2010). "Advances in rail neutral temperature measurement techniques." Railway Track & Structures: 21-23.

Read, D. and B. Shust (2007). "Investigation of prototype rail neutral temperature measurement system." Railway Track & Structure.

Reierstøl-Johnsen, E. Ø. (2014). Sikkerhetsrapport 2013, Statens jernbanetilsyn.

Samset, K. (2014). Forskningsmetodekurs 2014: Kvalitativ forskning NTNU.

Schive, C. (2009). Notat: Dispensasjonssøknad Jernbaneverket

SHT (2007). Avsporing Eidsvoll-Dombås 26. juli 2006, Statens havarikommisjon for transport

SHT (2007). Rapport om avsporing på Østfoldbanen ved km 77,5 ved Råde stasjon 6.7.2006. Statens havarikommisjon for transport

SHT (2014). Rapport om avsporing med godstog 41631 ved km 281,5 mellom Kvam og Sjøa på Dovrebanen 22. juli 2013. Statens havarikommisjon for transport.

SHT (2015). Rapport om avsporing med tog 5790 ved Trofors stasjon , Nordlandsbanen 30. mai 2014, Statens Havarikommisjon for Transport

SJT (2013). Veiledning om beredskap i jernbanevirksomhet. S. jernbanetilsyn.

Sørli, P. H. (2008). Krefter i helsveist spor. Oslo, Jernbaneverket.

Tveraaen, M. (2013). Sikkerhetshåndboken. Jernbaneverket Jernbaneverket

Van, M. (1996). "Buckling analysis of continuous welded rail track." HERON, 41 (3), 1996.

Yeltech (2015). "Rail temperature monitor unit." Retrieved 7.6.2015, from [http://yeltech.co.uk/wp-content/uploads/2013/10/temperature\\_unit\\_v2.pdf](http://yeltech.co.uk/wp-content/uploads/2013/10/temperature_unit_v2.pdf).

## **11 Vedlegg**

### **11.1 Oppgavetekst**

# **MASTEROPPGAVE**

**(TBA4955 Jernbane, masteroppgave)**

Espen Kalvø

Våren 2015

## **Beredskap ved fare for solslyng**

### **BAKGRUNN**

Solslyng er et problem som kan forekomme i sommerhalvåret på det norske jernbanenettet. Dette er et sikkerhetsproblem som kan skyldes både slitasje og nedsatt funksjon i enkelte overbygningskomponenter og vedlikeholdsoperasjoner som har en negativ innvirkning på sidestabiliteten i sporet. De siste ti årene har det vært syv avsporinger som følge av solslyng. Sommeren 2014 ble Dovrebanen stengt flere ganger og kjørehastigheten måtte settes ned på grunn av solslyng og solslyngtendenser. Dette var på grunn av høy skinnetemperatur, samt at den laterale stabiliteten til sporet var nedsatt på grunn av omfattende flomskader fra 2011 og 2013. Andre baner måtte også stenge for trafikk og/eller redusere kjørehastigheten som følge av solslyng.

Solslyng er en av sikkerhetsindikatorene Jernbaneverket rapporterer inn til Statens jernbanetilsyn. I 2013 rapporterte Jernbaneverket inn 67 tilfeller av solslyng (Reierstøl-Johnsen 2014). Dette vil si alle feil relatert til horisontalgeometrien (baksefeil) og som krever nøytralisering eller umiddelbar reduksjon av tillatt kjørehastighet for å opprettholde sikkerheten. I 2014 var antall solslyngfeil innrapportert i BaneData 156, der 67 av tilfellene førte til driftsforstyrrelser. I 2013 var antall driftsforstyrrelser som følge av solslyng 28.

Jernbaneverket har i dag en instruks for tiltak ved ugunstige værstsituasjoner som en del av sitt styringssystem (Karlsen 2012). Hensikten med instruksen er å forhindre at kritiske tilstander i underbygning og sideterreng som følge av ugunstige værstsituasjoner får sikkerhetsmessige konsekvenser. Det trinnvise beredskapssystemet er delt inn i tre beredskapsnivåer; gul, oransje og rød beredskap. Beredskapen er ment å øke med økende sannsynlighet for potensielle sikkerhetskritiske hendelser. Instruksen beskriver hvilke handlinger som skal utføres ved et gitt nivå av varslet og/eller målte verdier av regn, i kombinasjon med snøsmelting. Disse værparameterne for innføring av skjerpet beredskap gjelder ved økende sannsynlighet for erosjonsskader, flom, flomskred, jordskred og kollaps i vannmettede fyllinger og skråninger. Denne instruksen er nødvendigvis ikke tilsvarende for steinsprang, fjellskred, leirskred, snøskred, sørpeskred, solslyng, vind og stormflo. For disse hendelsene må skjønn utøves for fastsetting av behov for beredskap.

## **OPPGAVE**

### **Beskrivelse av oppgaven**

Det skal vurderes og utarbeides en metodikk for varsling av fare for solslyng på lignende måte som i *Instruks for tiltak ved ugunstige værstsituasjoner*. Det må tas stilling til ulike parametere som bør inngå i en beredskapsplan, samt hvordan ulike nivåer i en beredskapsplan for solslyng kan bygges opp. I tillegg vil det være viktig å vurdere hvordan sportekniske og meteorologiske forhold innvirker på faren for solslyng.

Innhenting av data vil hovedsakelig skje gjennom litteraturstudier og intervjuer. Det kan også være aktuelt med data fra BaneData, og dersom en spesifikk strekning vurderes så kan løfteskjemaer og befaringer bidra til datagrunnlaget. Dersom det er mulig å innhente meteorologiske data, så kan disse også brukes til å forstå hvordan meteorologiske forhold innvirker på faren for solslyng. Det vil være viktig med teoretisk kunnskap om overbygningskonstruksjoner, og om både laterale og longitudinale krefter som vil opptre i sporet.

Det må vurderes om det kan utarbeides generelle krav og strategier, eller om det må lages lokale strategier og beredskapsplaner for de ulike linjene. Det kan være aktuelt å velge ut en



strekning for å se mer detaljert på hvilke forhold og krav som vil gjelde for den spesifikke strekningen.

Hovedmålet med masteroppgaven er å bidra til en systematisk metodikk for å foreslå beredskapsnivå ved fare for solsløng, samt definere ulike beredskapsnivåer ved fare for solsløng.

### **Målsetting og hensikt**

- Utarbeide et forslag til en beredskapsplan når det er fare for solsløng
- Vurdere hvilke parametere og toleransekrav som skal inngå i en beredskapsplan for fare ved solsløng
- Bedre forståelse for hvordan sportekniske og meteorologiske forhold virker inn på faren for solsløng
- Undersøke mulighetene for automatisk overvåking av problemområder
- Kunne bidra til økt beredskap når det er fare for solsløng

### **Deloppgaver og forskningsspørsmål**

- Hvilke baner er mest utsatt for solsløng i Norge i dag? Hvilke årsaker til solsløng er vanligst, og kan man si noe om det finnes bakenforliggende årsaker?
- Hvilke kriterier er aktuelle å benytte for å innføre gul, oransje og rød beredskap når vi snakker om solsløng?
- Hvilke sportekniske og meteorologiske forhold innvirker på faren for solsløng?
- Hvordan kan baner som er utsatte for solsløng overvåkes? Kan solsløng varsles automatisk?
- Kan VUL/GVUL brukes i arbeidet med å foreslå beredskapsnivå når det er fare for solsløng?

### **Oppstart og innleveringsfrist:**

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

**Faglærer ved instituttet:** Elias Kassa (NTNU)

**Veileder (eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner:** Alf Helge Løhren  
(Jernbaneverket)

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 13.02.2015, (evt revidert:)

Underskrift

---

Faglærer

## 11.2 Spørsmålsrunde

### 11.2.1 Epost sendt til banesjefene i Jernbaneverket

Hei!

Mitt navn er Espen Kalvø, og jeg er en masterstudent fra NTNU i Trondheim som skriver masteroppgave for Jernbaneverket denne våren. Masteroppgaven har tittelen «Beredskap ved fare for solslyng». Utgangspunktet for oppgaven er dagens værberedskap for nedbør, og jeg skal vurdere om det kan utarbeides en beredskapsplan for solslyng på lignende måte. Veilederen min i Jernbaneverket er Alf Helge Løhren på Teknologi, og det er i samråd med ham jeg sender ut denne eposten.

I forbindelse med oppgaven, så ønsker jeg å få noen innspill fra de ulike strekningene om hvordan dere ser på beredskap ved fare for solslyng. Nedenfor har jeg satt opp tre spørsmål som jeg håper dere kan ta dere tid til å se på. Spørsmålene sendes ut til banesjefene i Jernbaneverket, og jeg ville satt stor pris på om dere eller noen andre i organisasjonen deres kunne svart innen 27. april.

1. Hvilke tiltak gjøres i dag på din banestrekning for å forebygge solslyng?
2. På lengre sikt, hvilke tiltak mener du er viktigst på din banestrekning for å redusere faren for solslyng?
3. Har du noen konkrete innspill til hva som burde være med i en slik beredskapsplan?

Om dere skulle ha noen spørsmål, så er det bare å ta kontakt med meg på e-post [Espen.Kalvo@jbv.no](mailto:Espen.Kalvo@jbv.no) eller telefon 46791798.

På forhånd takk for hjelpen!

Med vennlig hilsen  
Espen Kalvø

### 11.2.2. Mottakerliste

I spørsmålsrunden ble det sendt ut forespørsler til alle banesjefene. Disse er gitt i tabellen under.

*Tabell 28: Mottakerliste for spørsmålsrunden*

<b>Navn</b>	<b>Bane</b>
Knut Karlsen	Ofofbanen
Jan Birger Almåsbro	Nordlandsbanen Nord
Bjørn Sørum	Nordlandsbanen Sør
Geir Revdahl	Trønderbanen
Tor Rørosgård	Røros- og Solørbanen
Ivar Lauritzen	Dovre- og Raumabanen
Tormod Urdahl	Dovrebanen Sør
Lars Frøystein	Hoved- og Gardermobanen
Guttorm Moss	Oslo
Bjørn Ståle Varnes	Vestfoldbanen
Bjørn Skauge	Bergensbanen Vest
Guro Torpe	Bergensbanen Øst
Bjørn Hillestad	Østfoldbanen
Tormod Bergerud	Kongsvinger- og Gjøvikbanen
Terje Øygarden	Sørlandsbanen Øst
Harald Roland	Sørlandsbanen Midt
Linda Haugland	Sørlandsbanen Vest

### 11.3 Målevognsbilder av Skatval og Høyset detektorstasjon



*Figur 39: Skatval detektorstasjon ved km 43.340 på Nordlandsbanen*



*Figur 40: Høyset detektorstasjon ved km 518.46 på Dovrebanen*

## 11.4 Andre relevante målevognsbilder



*Figur 41: Km 95, Hell-Steinkjer*



*Figur 42: Km 119.416, Hell-Steinkjer*



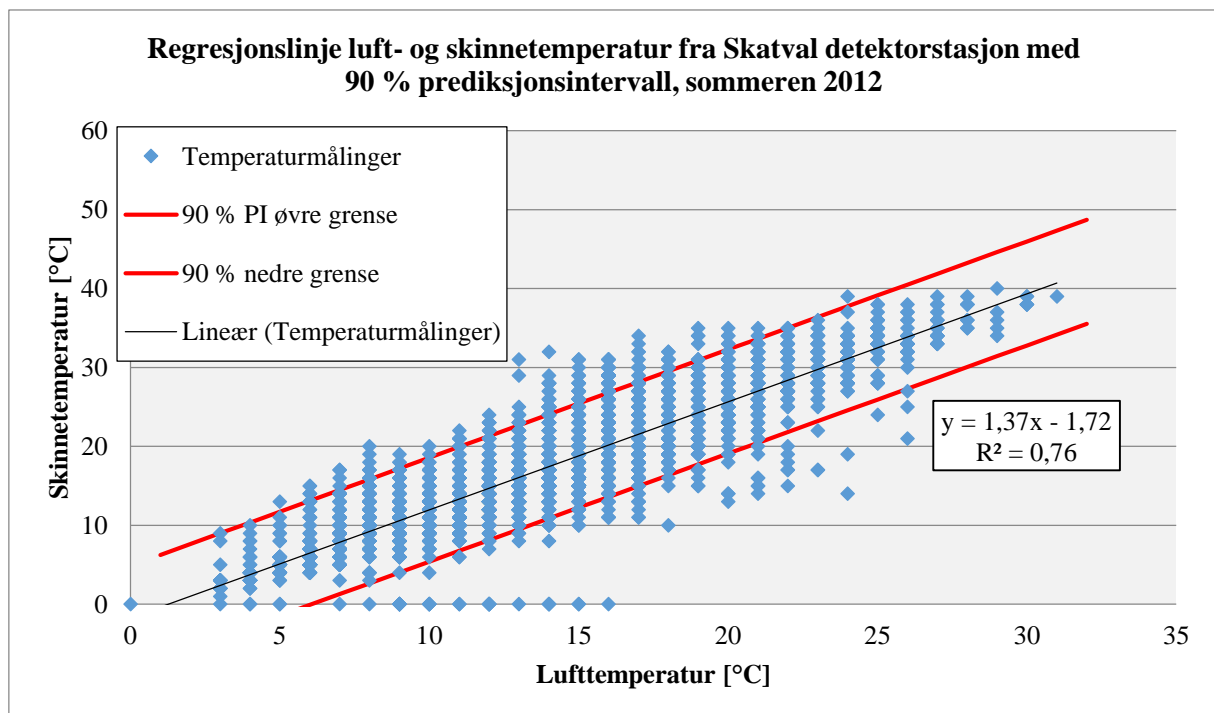
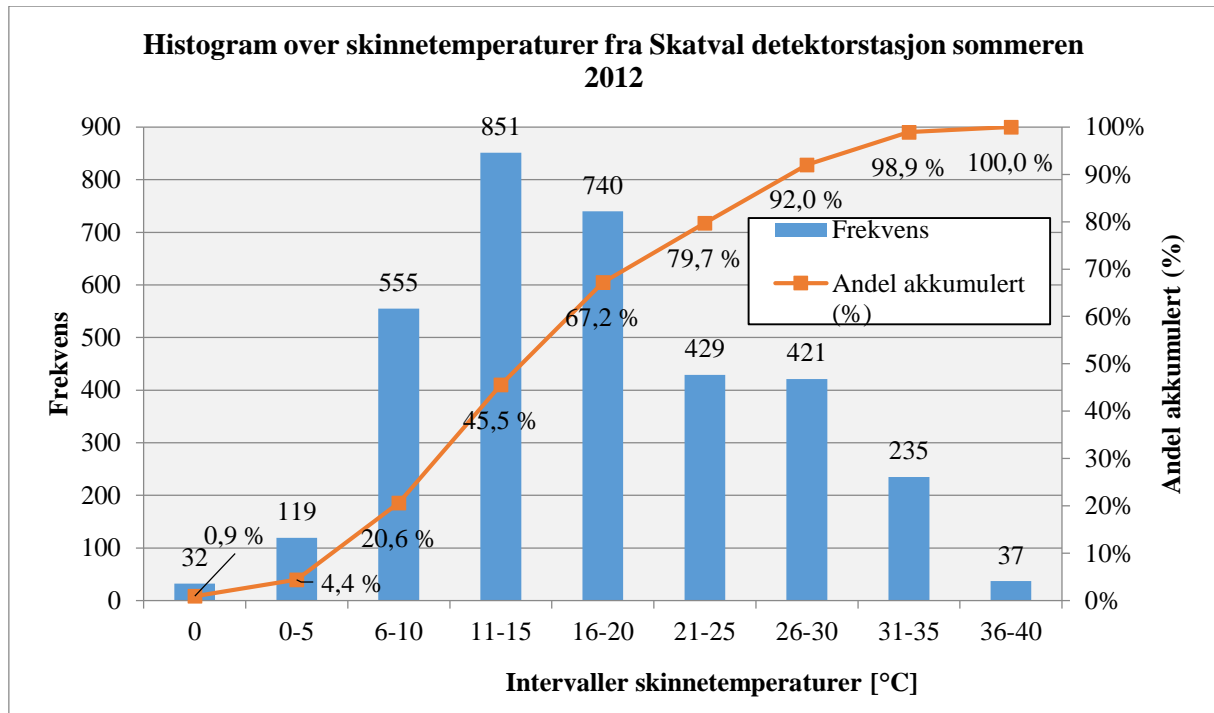
*Figur 43: Km 522.8*

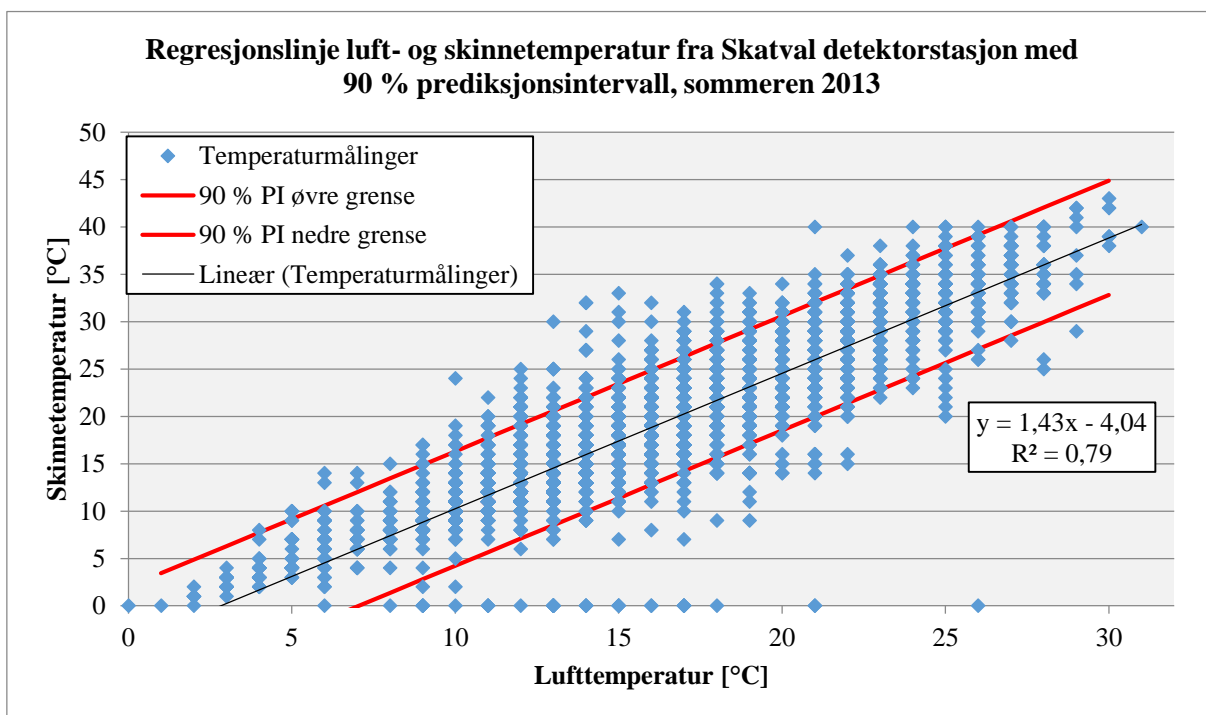
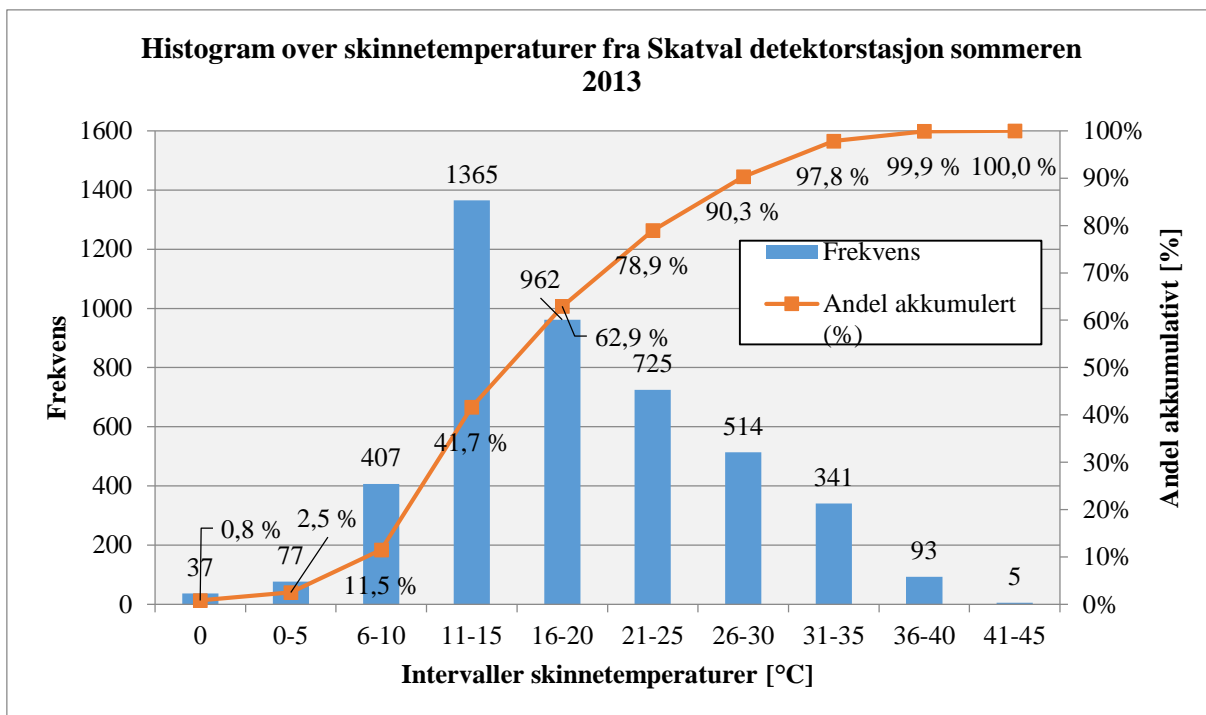


*Figur 44: Km 539.125*

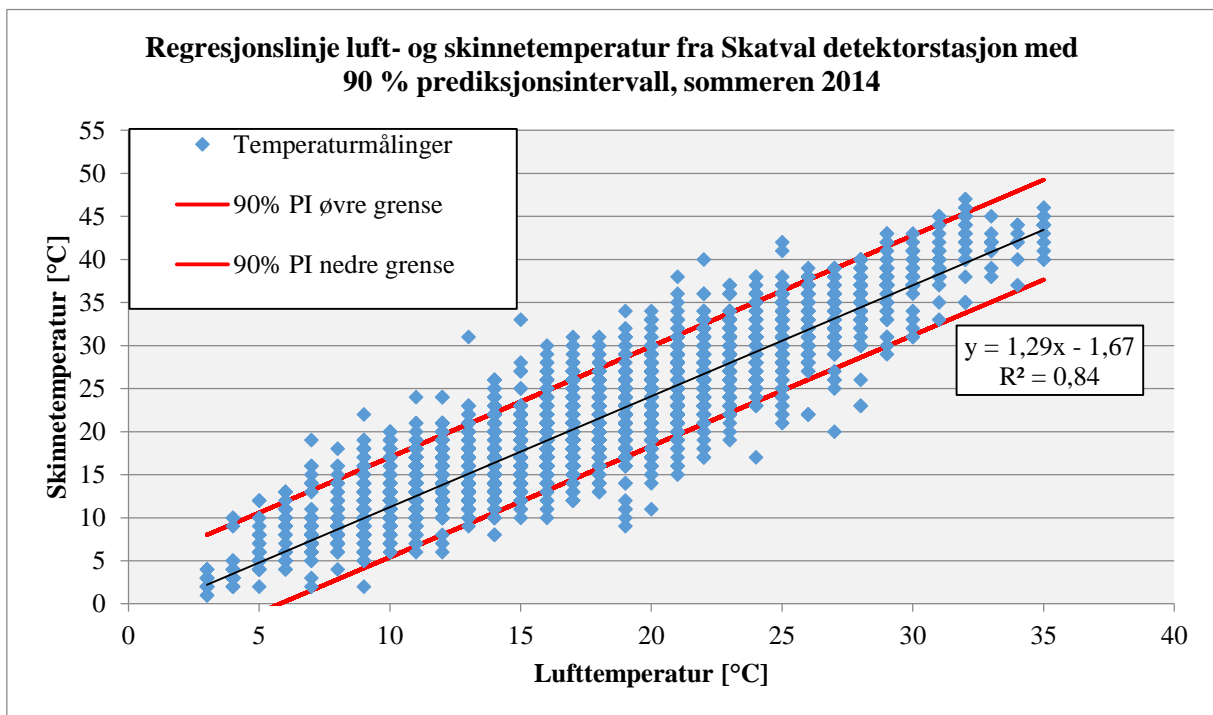
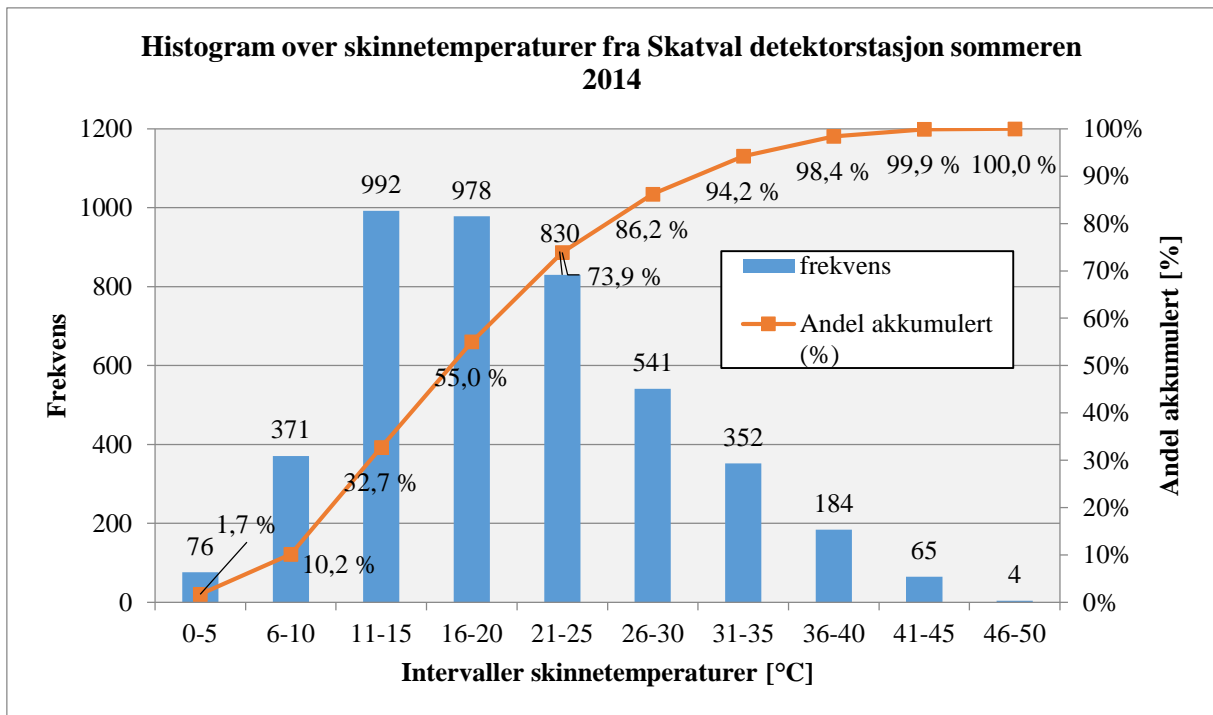
## 11.5 Diagrammer fra regresjonsanalysen

### 11.5.1 Skatval detektorstasjon

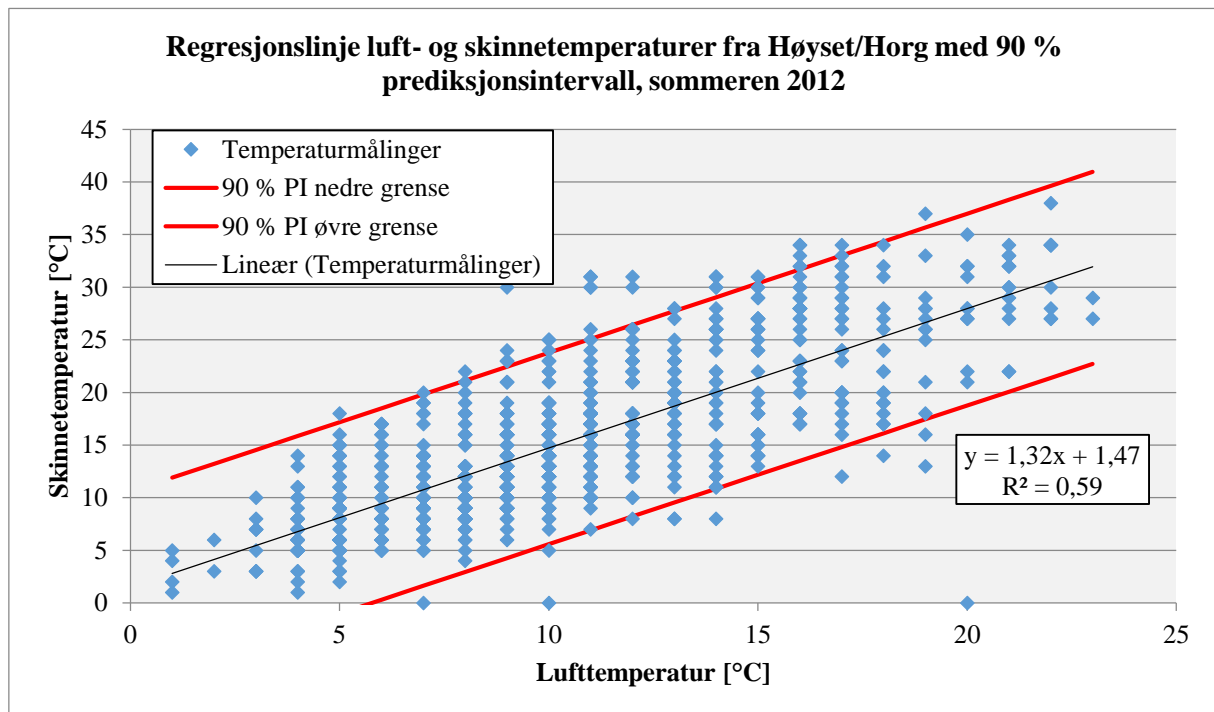
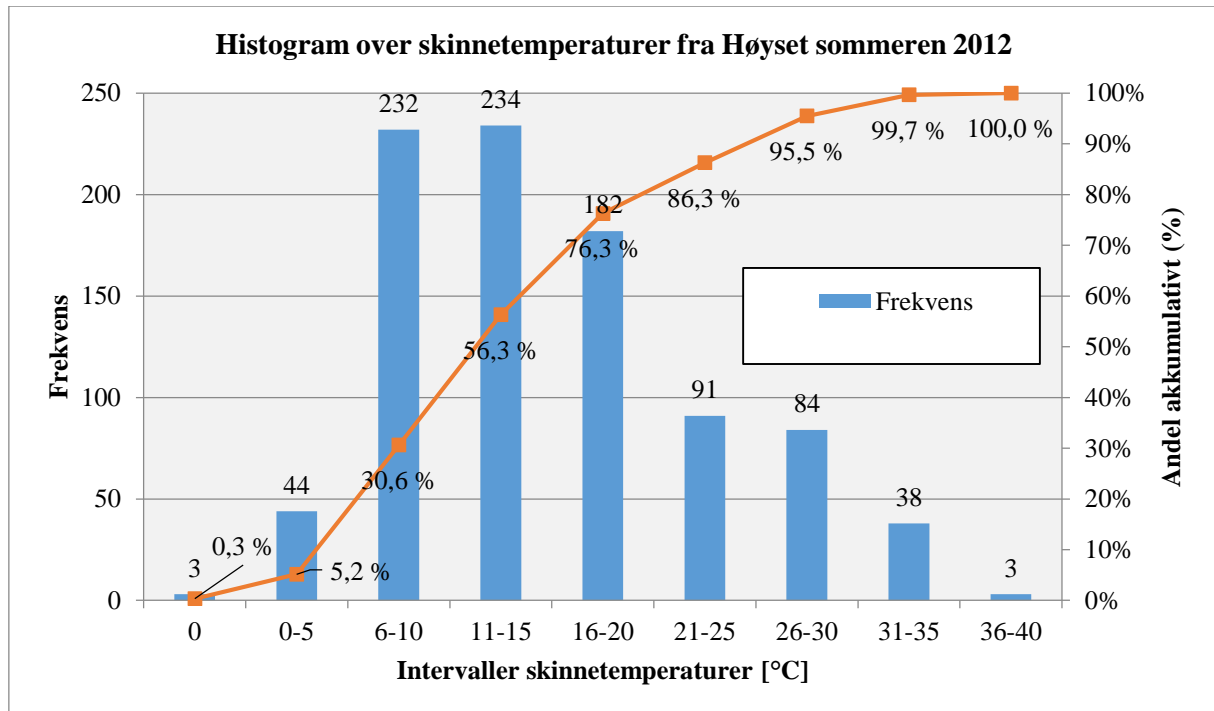


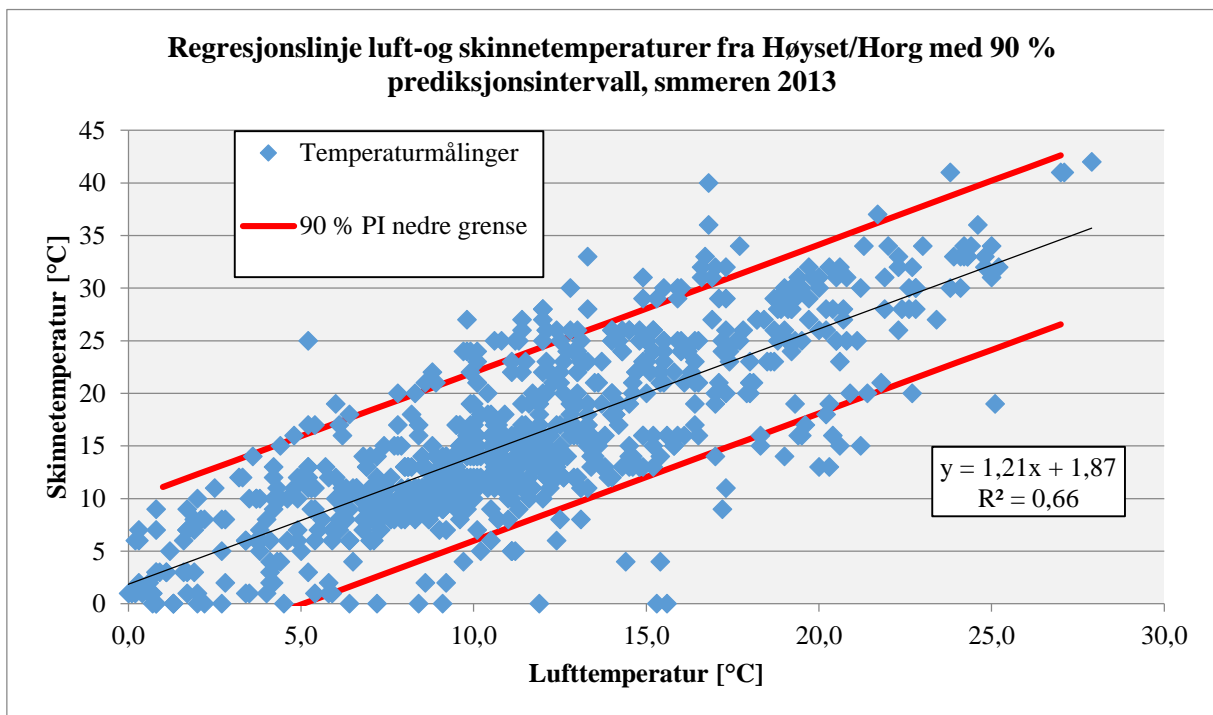
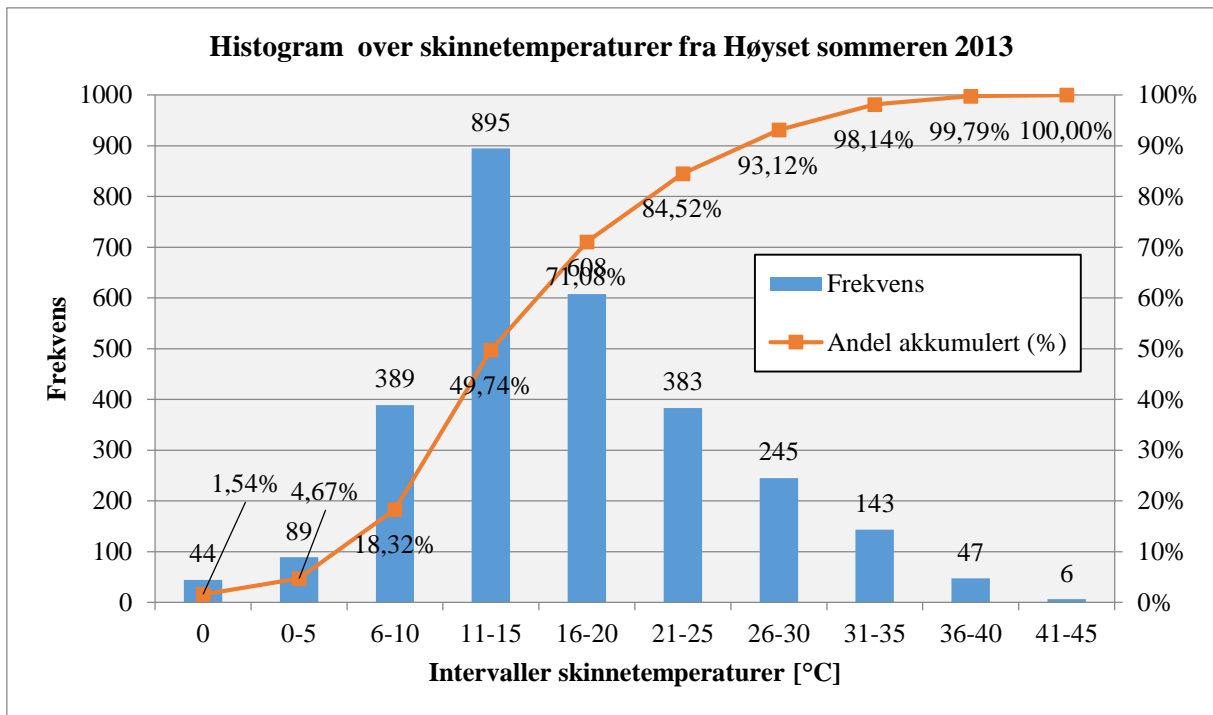






## 11.5.2 Høyset detektorstasjon og Horg værstasjon





## 11.6 RTMU produktspesifikasjoner

# RAIL TEMPERATURE MONITOR UNIT

Approval certificate  
No. PA05/04876

## RTMU



*"The RTMU has a network rail approved Vortok clip built into the design. This enables the unit to be clipped to any rail in any position in a matter of seconds."*

The **RTMU** is a low power device. The GSM module is normally powered down and the **RTMU** controls power to the sensors as required.

The unit is self contained and requires no additional batteries cabling or base station. It has a battery life of 6-24 months dependant on the programme

## MAIN BENEFITS

- Notification via text message or email.
- Completely mobile, self contained battery operated.
- Easy to program with simple text messages.
- Internet based reporting, alarm handling and information management.



Y E L T E C H

Upper Unstead FC, Unstead Lane  
Bramley Surrey, UK. GU5 0BT

Phone: 0870 478 4413, Fax: 0870 131 9654  
Email: sales@yeltech.co.uk  
www.yeltech.co.uk

Main benefits include:

- Notification by text messages or emails
- Completely mobile, self contained, battery operated
- Easy to program with simple text messages
- Internet based reporting and alarm handling solution and management information system

The RTMU provides for:

- Automatic temperature notification via text message or email.
- Completely mobile, self contained and battery operated.
- Easy to programme with simple text messages.

The Web Server provides for:

- Internet based reporting, alarm handling and information management.
- See the actual rail temperature, reports and trends from any computer / device with internet access.

System Features:

Rail Temperature – a PT100 sensor is fitted on top of the unit for a more accurate temperature reading. The RTMU is fully programmable via simple SMS and will send an alarm when the thresholds have been reached either via a text message and/or email.

Off-The-Line Sensor – the RTMU also incorporates a sensor to detect when the unit has been detached from the rail. The unit is self contained and requires no additional batteries, cabling or base station. It has a battery life of 6 – 24 months dependent upon the programme.

Web Server – the RTMU can communicate wirelessly using the GSM / GPRS to internet servers, where the data can be decoded and presented on the internet. The use of internet based data presentation techniques means that data can be viewed from any computer, anywhere, anytime.

Requirement for Set-Up

Data SIM Card – each RTMU requires a SIM card to communicate with the server.

Contact Details – of people who will be receiving the alarms. Mobile/ Cell phone numbers if alarms are to be sent via SMS and email addresses if alarms are to be sent via email.

Alarm Thresholds – temperature settings of critical rail temperatures (low and high temperatures).

RTMU Settings – identification of the unit, location of where the unit is to be installed etc.

Temperature Reading – the GSM Module is normally powered down (to preserve battery life) and the RTMU controls power to the sensors as required. The unit should be programmed to dictate the frequency of readings taken and for those reading to be logged into the server.

Utklippene er hentet fra (Yeltech 2015) og (Bance 2015).