

Marcus Moltzau Christiansen

Sporgeometriens betydning for slitasjeutviklingen til jernbanehjul i skinnekontaktflate

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Elias Kassa

Medveileder: Alf Helge Løhren

Juni 2022

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Blaze, J.

Marcus Moltzau Christiansen

Sporgeometriens betydning for slitasjeutviklingen til jernbanehjul i skinnekontaktflate

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Elias Kassa

Medveileder: Alf Helge Løhren

Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk



Norwegian University of
Science and Technology

Forord

Denne våren skriver jeg mitt masterarbeid ved utdanningsinstitusjonen som i min spede barndom bar det stolte navnet Norges tekniske høgskole (NTH). Arbeidet utgjør siste modul av mitt 5-årige sivilingeniørstudium, og det er med stor ettertanke at jeg i skrivende stund kaster et blikk over all den kunnskap, innsikt og forståelse som har fulgt med på veien. Jeg er videre svært takknemlig for muligheten jeg nå har fått til å dykke dypere inn i et av fagområdene som har inspirert meg aller mest i løpet av studiet. Få ting er vel mer givende enn å dyrke den aller særreste og mest fascinerende viten man har opplevd å få servert fra en energisk professor i en forelesningssal.

Da jeg skulle finne en spesifikk, jernbaneteknisk problemstilling penset jeg meg raskt inn på dynamikken mellom hjul og skinne. Introdusert for denne disiplinen ble jeg første gang under mitt utvekslingsår ved Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. I masterarbeidet ser jeg nærmere på fenomenet hjulslitasje, og som byggstudent plasserer jeg jernbaneinfrastrukturens innvirkning på denne slitasjen under lupen. Jeg har hatt stor glede av å gjennomføre selvstendig behandling av faglig krevende problemstillinger. Det har samtidig gitt meg en mestringsfølelse å la ting jeg har lært i løpet av studiet komme til anvendelse for løsning av problemer underveis.

Masteroppgaven er skrevet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i formelt samarbeid med statens jernbaneinfrastrukturforvalter, Bane NOR SF. Arbeidet er samtidig gjennomført i tett samarbeid med den tidligere verkstedenheten til Norges Statsbaner, Mantena AS. Jeg ønsker først og fremst å takke de involverte partene. Jeg vil takke mine to veiledere, professor Elias Kassa ved NTNU og sjefingeniør dr.ing. Alf Helge Løhren i Bane NOR, for et godt samarbeid helt fra den forberedende prosjektoppgaven til innlevering av masteren. Jeg takker for tett oppfølging og gode samtaler. Oppgaven har ellers et klart grensesnitt mot det maskintekniske fagområdet, og her har den løpende kommunikasjonen med Torstein Aalen og Thomas Djupvik fra Mantena vært avgjørende. Jeg vil takke for gode innspill og oppklaringer, og for de helt nødvendige dataene på hjulslitasjemål. Jeg vil videre takke Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Schindler ved RWTH for engasjerende forelesninger som vekket min interesse for skinnefartøysdynamikk. I forbindelse med masterarbeidet vil jeg dessuten takke vitenskapelig assistent ved Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme, Patrick Schneider, for verdifulle, faglige innspill til oppgaven.

Jeg vil ellers takke min familie for en fin oppvekst med vid mulighet til å tilegne seg ny innsikt, og for all støtte både før og under studiet. Jeg vil takke venner for lystige stunder som har gjort seige kvelder på lesesalen overkommelige. Jeg vil takke inspirerende lærere og forelesere fordelt over 19 år for alt de har lært meg. Jeg vil avslutningsvis benytte anledningen til å takke Ann-Karin ved IT-avdelingen for den himmelhøye medmenneskelighet hun utviste da hun iherdig, gjennom flere timer bisto i gjenvinning av tapt data, vital for dette masterarbeidet.



Marcus M. Christiansen

Trondheim, juni 2022

Sammendrag

Både jernbaneinfrastrukturen og det rullende materiellet som trafikkerer den utsettes ved ordinær drift for uunngåelig slitasje i hjul-skinne-kontaktflaten. Slitasjen medfører et jevnlig behov for vedlikehold, som er kostbart men helt nødvendig for tilfredsstillelse av krav til sikkerhet samt opprettholdelse av akseptabel kjøredynamikk. Med hvilken hastighet slitasjen skrider frem og hvordan den brer seg over hjul- og skinneoverflate vil variere med en rekke opptredende omstendigheter. Slitasjens oppførsel vil imidlertid ha stor betydning i en vedlikeholdssammenheng, og det er allerede lagt ned mye arbeid i undersøkelse av ulike omstendigheters betydning for slitasjen, både ved simulering og gjennom observasjon av reell slitasje. Temaet er imidlertid langt i fra ferdig utforsket, og målet med dette arbeidet er å bidra til økt innsikt i de forhold som styrer slitasjens utvikling. Arbeidet begrenses riktignok til undersøkelse av sporgeometriens innvirkning på hjulslitasjen, hvilket er særlig aktuelt for materiell på det norske, kuperte og kurverike nettet. Utviklingen i norsk jernbane de senere år har dessuten ført til diverse utfordringer, som ustabilitet på rette partier grunnet for høy konisitet samt et behov for økning av vedlikeholdsintervall på enkelte hjul. Begge disse problemene kan knyttes til hjulslitasjen, og er med på å gjøre masterarbeidet desto mer dagsaktuelt.

Arbeidet tar utgangspunkt i utforming av en empirisk modell, der hjulprofilers slitasjeutvikling kartlegges ut i fra observasjoner av reelle hjul. I tillegg gjøres en analyse av den respektive sporgeometrien som hjulene slites ut på, og datagrunnlaget for analysen består av mer enn 22 000 enkeltmålinger på hjul samt traséparametre i nærmere 14 000 trasépunkter. Hjulmålingene på hjul fra tre norske ruter danner grunnlaget for beregning av hjulprofilers geometriske endring med tilbakelagt avstand. Rutene som undersøkes er Sørlandsbanen, Dovrebanen og Østfoldbanen, og alle hjulene som inngår i analysen tilhører Type-73-togsett som utelukkende har operert på én av de tre rutene i forsøksperioden. De tre rutene er valgt slik at hjulene som sammenlignes opererer på tre ulike sporgeometrier, men ellers opererer under svært like omstendigheter, slik at ulikheter i hjulslitasje i stor grad kan relateres til den avvikende sporgeometrien. Som utgangspunkt for beskrivelse av rutenes horisontal- og vertikolgeometri er intervaller for horisontalkurveradius og stigningsgrad definert. Videre er rutene delt opp mellom trasépunkter og element for element tilordnet rett intervall, og ruteandelen på de ulike geometrier er beregnet ut ifra dette. Rutenes horisontal- og vertikolgeometriske fordeling utgjør sammenligningsgrunnlaget for sporgeometri. På bakgrunn av analyseresultatene er sammenhenger mellom sporgeometri og hjulslitasjens utvikling detektert.

Videre er en utredning av øvrige omstendigheter som kan tenkes å spille inn på slitasjebildet tillagt stor vekt. Dataen som ligger til grunn for analysen er validert med hensyn til alle disse omstendighetene, da variasjon i omstendigheter mellom rutene kan virke forstyrrende på analysen og bidra til betydelig usikkerhet rundt resultatet. Det konkluderes med at omfanget av eventuelle forstyrrende faktorer er begrenset, og at de anvendte dataene er godt egnede for formålet.

Resultatene av analysen indikerer at sporgeometri har betydelig innvirkning på slitasjeutviklingen til et hjulprofil. Slitasjens fremskridelse over hjulprofilet tyder på at stigninger brattere enn 20 promille innebærer en svært kritisk hjulbaneslitasje. Det detekteres ellers en sammenheng mellom avstanden tilbakelagt på horisontalkurver med radius mindre enn 400 m og mengden materiale slitt bort på flens. Hjul som opererer på kurvete traseer med mye stigning og fall vil i snitt behøve dobbelt så hyppig vedlikehold som ruter som opererer på rettere strekninger. Samtidig vil kostnadene per vedlikehold være høyere fordi slitasjens beskaffenhet gjør gjenoppsettelse av korrekt overflategeometri dyrere. Analysen viser samtidig at mange hjul slitt ut på rettere sporgeometrier bygger flens, og det kan derfor tenkes at en reduksjon i det totale vedlikeholdsbehovet vil kunne oppnås gjennom en friere disponering av materiellet over ulike ruter. Hjulprofilene vil på den måten bli slitt jevnere og det er sannsynlig at omfanget av både flensbygging og tynn flens i mange tilfeller vil kunne reduseres.

Generelt kan det virke som om hjulene tenderer til å slites ned mot en slags likevekt, der hjuloverflaten gradvis vil innta en geometri som tillater videre slitasje å foregå jevnt over hele profilet, på samme vis som hos en slitasjeprofil. Overflategeometrien ved likevektstilstand later til å avhenge av sporgeometrien hjulet opererer på. En prøving av denne hypotesen forutsetter måledata på hele hjuloverflaten.

Abstract

Both the railway infrastructure and the rolling stock are exposed to unavoidable wear on the wheel-rail contact surface during ordinary operation. The wear entails a regular need for maintenance, which is expensive but absolutely necessary for satisfying safety requirements as well as maintaining acceptable dynamic behaviour. The speed of how the wear progresses and its distribution over the wheel and rail surface will vary with a number of occurrences. However, the behaviour of wear will be of great importance in a maintenance context, and a lot of work has already been done in investigating the significance of various circumstances for wear and tear, both by simulation and through observation of actual wear. However, the topic is far from complete, and the goal of this work is to contribute to a greater understanding of the conditions that govern the development of wear. The work is admittedly limited to examining the impact of track geometry on wheel wear, which is particularly relevant for material on the Norwegian, hilly and curved network. Recent developments in the Norwegian railway have also resulted in a number of challenges, including instability on straight sections due to high conicity and the need to increase maintenance intervals on some wheels. Both of these problems can be linked to wheel wear.

The work is based on making an empirical model, which maps the wear development of wheel profiles based on observations of real wheels. In addition, an analysis of the respective track geometry of how the wheels wear out is performed, and the basis for the analysis consists of more than 22,000 individual measurements on wheels as well as route parameters at almost 14,000 route points. The wheel measurements on wheels from three Norwegian routes form the basis for calculating the geometric change of wheel profiles with distance travelled. The routes examined are the Sørlandsbanen, Dovrebanen and Østfoldbanen, and all the wheels included in the analysis belong to Type-73 train sets that have only operated on one of the three routes during the trial period. The three routes are chosen so that the wheels being compared operate on three different track geometries but otherwise operate under very similar circumstances, so that differences in wheel wear can mainly be related to the deviating track geometry. To describe the horizontal and vertical geometry of the routes, intervals for horizontal curve radius and degree of slope are defined. Furthermore, the routes are divided between route points and stepwise assigned to the correct interval, and the route proportion of the various geometries is calculated on this basis. The horizontal and vertical geometric distribution of the routes forms the basis for comparing the track geometries. Based on the analysis results, correlations between track geometry and the development of wheel wear have been detected.

Furthermore, a study of other circumstances that may influence wheel wear is being carried out. The data on which the analysis is based has been validated with regard to all these circumstances, as variation in circumstances between the routes can have a disruptive effect on the analysis and contribute to considerable uncertainty about the result. It is concluded that the extent of any interfering factors is limited, and that the data used is well suited for the purpose.

The results of the analysis indicate that track geometry has a significant impact on the wear development of a wheel profile. The progress of the wear over the wheel profile indicates that slopes steeper than 20 per mille involve critical tire wear. There is also a correlation between the distance travelled on horizontal curves with a radius of less than 400 m and the amount of material worn away on the flange. Wheels that operate on curved routes with a lot of incline and fall will, on average, need twice as frequent maintenance as wheels that operate on flat routes. The cost per maintenance is also higher because the nature of the wear makes restoring correct surface geometry more expensive. At the same time, the analysis shows that many wheels worn on straighter track diameters build thicker flanges, and it is therefore conceivable that a reduction in the total need for maintenance can be achieved by increasing the variation in daily routes for the rolling stock. The wheel profiles will thus be worn more evenly, and it is probable that the extent of both thicker flange and thin flange will in many cases be reduced.

In general, it may seem as if the wheels tend to wear down towards a kind of equilibrium, where the wheel surface will gradually assume a geometry that allows further wear to take place evenly over the entire profile, in the same way as a wear profile does. The surface geometry at steady state seems to depend on the track geometry. A test of this hypothesis requires measurement data on the entire wheel surface.

Innhold

Figurer	ix
Tabeller	xi
1 Innledning	1
1.1 Vedlikehold av hjul og skinner	1
1.2 Norsk jernbane i endring	2
1.3 Begrensing av masterarbeidet	3
1.3.1 Slitasjebidrag	3
1.3.2 Vedlikehold	4
1.3.3 Hjuloverflaten	4
1.4 Arbeidets oppbygning	4
2 Teori	5
2.1 Hjulmål	5
2.2 Beregning av slitasje	6
2.3 Sporgeometriens teoretiske innvirkning på slitasjen	6
2.3.1 Introduksjon	6
2.3.2 Flensslitasje	6
2.3.3 Hjulbaneslitasje	7
2.4 Slitasje og kjøredynamikk	7
2.4.1 Sinusgange og ekvivalent konisitet	8
2.4.2 Kurvegange	8
2.4.3 Hjul-skinne-parring	9
3 Metode	11
3.1 Introduksjon	11
3.2 Betingelser til analysegrunnlag	11
3.2.1 Trasébetingelser	11
3.2.2 Hjulbetingelser	11
3.3 Anskaffelse av rådata	12
3.3.1 Datautvelgelse	12
3.3.2 Hjulslitasjedataanskaffelse	14
3.3.3 Trasédataanskaffelse	14
3.4 Forberedende databehandling for analyse	14

3.4.1	Hjulslitasjedatabehandling	14
3.4.2	Trasédatabehandling	15
3.5	Analyse av hjulslitasje	16
3.6	Analyse av trasé	17
3.6.1	Horisontalkurvatur	18
3.6.2	Vertikalkurvatur	18
3.7	Sammenligning	19
4	Evaluering av inndata	21
4.1	Trasédata	21
4.2	Slitasjedatamengde	21
4.3	Måleusikkerhet	21
4.4	Like og avvikende omstendigheter	22
4.4.1	Hjul	22
4.4.2	Skinner	22
4.4.3	Berøringsflate hjul-skinne	23
4.4.4	Togsettserie	23
4.4.5	Dempere	24
4.4.6	Bremser	24
4.4.7	Hyppighet av full nedbremsing	25
4.4.8	Hastighet	25
4.4.9	Friksjonsforhold	26
4.4.10	Sammendrag av omstendigheter	26
5	Resultater	29
5.1	Vedlikeholdsintervaller	29
5.2	Horisontalgeometri	30
5.3	Vertikalgeometri	31
5.4	Hjulslitasje	33
6	Diskusjon	37
6.1	Kommentarer til målinger og usikkerhet	37
6.1.1	Spredning i hjuldata	37
6.1.2	Polynomenes avbøying	38
6.1.3	Slitasjehastighet	39
6.2	Avstandsfordeling over ulike sporgeometrier	40

6.2.1	Introduksjon	40
6.2.2	Horisontalgeometrisk betraktning	40
6.2.3	Vertikalgeometrisk betraktning	41
6.2.4	Samlet betraktning	41
6.3	Sporgeometri og hjulenes slitasjetrekk	42
6.3.1	Introduksjon	42
6.3.2	Hjulbaneslitasje	42
6.3.3	Flensslitasje	42
6.4	Sporgeometri og vedlikehold	43
6.4.1	Vedlikeholdsmessig gunstige kurvaturer	43
6.4.2	Vedlikeholdsoptimalisering	43
7	Konklusjon	45
7.1	Trukkede slutninger	45
7.2	Videre arbeid	45
	Bibliografi	47
	Appendiks	51
	A Resultater sporgeometri	51
	B Resultater hjulslitasje	52
	C Polynomer hjulslitasje	54
	D Trasékart	56
	E Hjulsatsliste	61
	F Benyttede MATLAB-funksjoner	65

Figurer

1	Reprofilering av et hjul på en hjulsatsdreiemaskin	1
2	Flåmsbana	2
3	Hjultverrsnitt med definisjon av målartene slik som beskrevet i trykk 741.1.2 (Norges Statsbaner BA, 1998)	5
4	Berøringspunktvandring på hjul og skinnprofil i avhengighet av hjulsatsens tverrforskyvning (P8 på 60E1, skinnehelling 1:20, sporvidde 1435 mm)	9
5	Linjekart over det norske jernbanenettet med unntak av Nord-Norge.	12
6	Dovrebanens trasé med vertikalprofil	13
7	Utsnitt av liste over hjulmålinger	15
8	Utsnitt av første del av punktlisten for horisontalgeometri på rute 1	15
9	Utsnitt av første del av objektlisten for horisontalgeometri på rute 1	16
10	Utskrift fra struktur i MATLAB	17
11	Intervallinndelingen av horisontalkurvatur etter kurveradius	18
12	Intervallinndelingen av vertikalgeometri etter stigning	19
13	Hjulprofil P8A	22
14	Skinneprofiler	23
15	Togsett av type 73	24
16	Kumulativ fordeling for andelen hjul som er tatt inn til reprofilering over økende tilbakelagt kjørelengde.	29
17	Andel av hver rute innenfor de ulike horisontalkurveradiusintervaller i prosent.	31
18	Andel av hver rute innenfor de ulike stigningsintervaller i prosent.	33
19	Måledata på flenshøyde sett i forhold til grenseverdiene i <i>Trykk 741.1.2</i>	34
20	Måledata på hjuldiameterendring fra forrige reprofilering.	34
21	Måledata på flenstykkeleggelse sett i forhold til grenseverdiene i <i>Trykk 741.1.2</i>	35
22	Måledata på tverrmål sett i forhold til grenseverdien i <i>Trykk 741.1.2</i>	35
23	Reprofilering ved lav (venstre) og høy (høyre) grad av flensslitasje.	43
24	Gjennomsnittlig tilbakelagte horisontalkurveavstander mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.	51
25	Gjennomsnittlig tilbakelagt avstand med stigning mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.	51
26	Måledata på flenshøyde med forstørrelse av de estimerte polynomene.	52
27	Måledata på hjuldiameterendring med forstørrelse av de estimerte polynomene.	52
28	Måledata på flenstykkeleggelse med forstørrelse av de estimerte polynomene.	53
29	Måledata på tverrmål med forstørrelse av de estimerte polynomene.	53
30	Trasékart for Oslogryta. Fra Oslo S i senter er Sørlandsbanen tilsluttet vestover, Dovrebanen østover og Østfoldbanen mot sør.	56

31	Trasékart for Østlandet med Oslogryta markert. Kartet dekker Sørlandsbanen ned til Gjerstad, Dovrebanen opp til Fåberg og Østfoldbaneruten helt til endestoppet Halden.	57
32	Trasékart for Sørlandsbanen	58
33	Trasékart for Dovrebanens nordre del (Lillehammer - Trondheim S)	59
34	Trasékart for Norges samlede jernbanenett	60

Tabeller

1	Grenseverdier for hver av hjulprofilets målarter i hht. trykk 741.1.2.	5
2	Rutespesifikasjoner	14
3	Oversikt over mengden tilgjengelig måledata på hjul.	21
4	Oversikt over materiellets dempere med toleranseverdier.	24
5	Oversikt over hvilke hjul som er involvert i de ulike bremsesystemene til et type-73-togsett.	25
6	Samlet oversikt over omstendigheter for hver rute.	27
7	Statistiske nøkkelverdier for vedlikeholdsintervall	29
8	Andel av hver rute innenfor de ulike horisontalkurveavstandsintervaller i prosent. . .	30
9	Gjennomsnittlig tilbakelagte horisontalkurveavstander mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.	30
10	Andel av hver rute innenfor de ulike stigningsintervaller i prosent.	32
11	Gjennomsnittlig tilbakelagt avstand med stigning mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.	32
12	Oversikt over mengdene av målinger som utgjør estimeringsgrunnlaget for polynomene i tabell 13.	33
13	Matematisk beskrivelse av målartenes verdi som funksjon av kjørelengde, der x er antall tusen kilometer siden forrige hjuldreining.	33
14	Gjennomsnittlig bilde av den momentane endringen i måltverdi per millionte tilbakelagte kilometer for nyprofiler.	40

1 Innledning

1.1 Vedlikehold av hjul og skinner

For rullende jernbanemateriell vil den komplekse dynamikken i kontaktflaten mellom hjul og skinne spille en nøkkelrolle i føringen av materiellet på sporet. Ikke bare i kurver, men også ved sinusgang på rettere avsnitt vil hjul-skinne-geometrien være bestemmende for et vognsetts lateraldynamiske oppførsel. (Zacher mfl., 2015, s.691–692) Selv mindre geometriske avvik i kontaktflaten vil følgelig ha betydelig innvirkning på kjøredynamikken, og slitasje i hjul-skinne-systemet vil derfor, i tillegg til å medføre redusert sikkerhet mot avsporing, øve en uønsket påvirkning på sporføringen. (Janicki og Horst, 2008, s.31) Av disse årsaker er det begrenset hvor mye slitasje som kan aksepteres, og omstendigheter hvor utslitingen forløper særlig effektivt vil følgelig medføre et hyppigere behov for vedlikehold. (Knothe og Stichel, 2003, s.35)

Det aktuelle vedlikehold av hjul og skinner vil typisk være en nedsliping (se figur 1), slik at opprinnelige kontaktflater gjenopprettes i henhold til gitte overflatemål for standardprofiler. (Schelle, 2014, s.6) Det vil imidlertid være begrenset hvor mange ganger kontaktflaten kan slipes ned før rulleradien blir for liten i hjulets tilfelle, eller materialet som utgjør skinnen er spist opp. Komponenten som helhet vil da måtte skiftes ut. Vedlikehold grunnet slitasje er imidlertid ressurskrevende, både for eier av det rullende materiellet og for infrastrukturforvalter. Kostnader som påløper for vedlikehold av hjul og skinner er releatert til arbeidskraft og utstyr, nye komponenter ved utskiftning samt det økonomiske tapet som må medregnes som følge av at rullende materiell eller infrastruktur ikke kan disponeres under vedlikeholdet. Rent økonomisk sett er det derfor mye å hente på en reduksjon av vedlikeholdsbehovet. (Schöch, 2005, s.7)



Figur 1: Reprofilering av et hjul på en hjulsatsdreiemaskin

Kilde: Mayfran, 2016

Slitte hjul som ikke lenger innehar sin opprinnelige profil vil også slite mer på skinnene og vice versa, som følge av en mindre gunstig kontaktmekanikk. (Jörg, 2017) En lavere grad av hjulslitasje vil dermed i seg selv være et forebyggede tiltak mot utsliting av infrastrukturen, og forbeholdt at hjulenes vedlikeholdsintervall forblir konstant vil tiltak som begrenser hjulslitasje nødvendigvis også redusere skinnenslitasjen. Av denne grunn vil det være hensiktsmessig å se gevinsten av redusert slitasje i en større sammenheng ved analyse av vedlikeholdsbehovet for den enkelte komponent.

1.2 Norsk jernbane i endring

Grunnet landets topografi har norsk jernbane tradisjonelt vært kjennetegnet ved kurvete traséer med små kurveradier (se figur 2), hvilket innebærer en begrenset hastighet for det rullende materiellet. (Jernbaneverket, 2004, Kap.3, s.5) Dette har igjen hatt betydning for valg av skinne- og hjulprofiler. En høy hjulkonisitet medfører særlig høye styringskrefter i kurver som følge av den store rulleradiusforskjellen mellom hjulene, og vil være gunstig for føring av materiellet gjennom kurvete traséer. På bakgrunn av dette og at det norske nettet har en skinnehelning på 1:20, så har høykonisetsprofilen P8A har lenge vært anvendt i Norge. (Norges Statsbaner, 1983, s.20 — Norges Statsbaner, 1982, s.16) En høy ekvivalent konisitet fører imidlertid raskere til ustabil gange på rette partier med høye hastigheter, da kritisk hastighet for instabilitet synker med økende konisitet. (Zacher mfl., 2015, s.692) Dette har alikevel ikke spilt noen avgjørende rolle ved profilvalg i Norge, hvor hastighetene har vært jevnt lave.



Figur 2: Flåmsbana

Kilde: Gunvaldsen, 1941

En annen ulempe med høykonisitetsgange er det betydelige vedlikeholdsbehovet. Til sammenligning med det norske nettet så er mye av det europeiske jernbanenettet bygget med en skinnehelning på 1:40, og slitasjeprofilen S 1002 er her utbredt. I samspill med skinneprofilen 60E2 vil slitasjen for den slitasjetilpassede hjulprofilen foregå svært jevnt over profilet og systemets ekvivalente konisitet vil forbli nærmest uforandret mens slitasjen skrider frem. Slike hjul opererer derfor med lengre vedlikeholdsintervaller og under lavere vedlikeholdsomkostninger. (Knothe og Stichel, 2003, s.35) For jernbanenett med skinnehelning 1:20, som det franske, britiske og norske nettet, er disse hjulene imidlertid uegnet da de ikke er slitasjetilpasset denne infrastrukturen. P8A-profilen med sin forminskede flensstykkelse skal derimot være å betrakte som slitasjetilpasset for systemer med skinnehelning 1:20. Det har imidlertid vist seg at et hjulprofil som er slitasjetilpasset for et banesystem ikke nødvendigvis er tilstrekkelig slitasjetilpasset andre banesystemer, selv når skinnehelningen er den samme. Dette er blitt observert i Sveits, som i likhet med Tyskland opererer med skinnehelning 1:40. Slitasjeprofilen S 2002 som fungerte utmerket i Tyskland opplevde i Sveits en betydelig slitasje i nærheten av hulkilen og en forminskning av ekvivalent konisitet etter rundt 20 000 km. Dette forklares med at det sveitsiske nettet er betydelig mer kurverikt enn det tyske. (Norges Statsbaner, 1983, s.20) P8A-profilen som anvendes i Norge er utviklet i Storbritannia, som er et land med betydelig slakere jernbanekurvatur enn Norge. For det norske banesystemet som utsetter sine hjul for mer flenskontakt enn det britiske er det derfor ikke sikkert at det modifiserte P8A-profilen kan betegnes å være tilstrekkelig slitasjetilpasset. (Norges Statsbaner, 1983, s.20)

Etterhvert som ikke-slitasjetilpassede hjulprofiler slites endres deres fasong i kontaktflaten med skinn, hvilket spiller inn på hjulets konisitet. (Norges Statsbaner, 1983, s.19–20) Slitasjens innvirkning på hjulkonisiteten vil være sammensatt, da slitasje i hjulbanen kan føre til hulslitasje og økende konisitet, mens flensslitasje kan føre til økt spormål som har motsatt virkning. (Zacher mfl., 2015, s.692) Tendensen er likevel at hjulsettets konisitet øker med tilbakelagt distanse. Dessuten vil skinnens kjøreflate slites mer på rette partier, som bidrar til ytterligere økt konisitet på disse strekningsavsnittene. (Zacher mfl., 2015, s.692, 706) Dersom konisiteten overskrider en kritisk maksimumsgrense vil instabilitet på rette partier kunne inntreffe selv ved lavere hastigheter, og hjulene må dreies slik at de gjenopptar opprinnelig form. I prinsippet er det derfor ønskelig med lavest mulig konisitet i nyttilstand, slik at hjulet kan tilbakelegge størst mulig avstand før det må reprofileres. Det tilstrebes imidlertid en balanse mellom et akseptabelt vedlikeholdsbehov og gode gangeegenskaper på det aktuelle banesystemet.

I de senere år har Norge oppgradert deler av sitt opprinnelige jernbanenett til også å omfatte relativt rette avsnitt med mulighet for høyere hastigheter. (Grobe, 2000, s.22) Som følge av dette har det oppstått utfordringer med det rullende materiellet på flere norske togruter, som nå trafikkerer både nye, rettere strekninger med høyere hastigheter og det gamle, kurverike nettet. På de gamle linjene er det ingen problemer med ustabil gange, mens på de nye avsnittene kan den høye konisiteten kombinert med høy hastighet resultere i instabilitet. Dette har gjort det nødvendig med uheldige hastighetsbegrensninger for rullende materiell også på de rettere partiene, som i Holmestrandporten på Vestfoldbanen. (Solberg, 2017) Strekningenes kapasitet blir da ikke utnyttet til det fulle. For å unngå dette vil maksimal opptredende ekvivalent konisitet måtte reduseres, som vil kunne oppnås igjennom en enda hyppigere reprofilerings av hjulene slik at et kritisk nivå aldri nås. Temaet er allerede kommet for dagen i Sverige, der instabilitet og hastighetsbegrensninger i Hallandsåstunnelen har resultert i en utredning av om vedlikeholdsintervallene for reprofilerings av hjul på strekningen bør reduseres. (Nohrstedt, 2016) Det har dessuten oppstått problemer i Romeriksporten for enkelte togsett, formodentlig knyttet til ustabil gange. Problemet forsvant ved dreining av hjul. (A. H. Løhren, personlig kommunikasjon, 13. juni 2022) Masteroppgavens problemstilling knyttet til sammenhengen mellom slitasjeutviklingen til hjul og sporgeometri er med andre ord et særdeles aktuelt tema for norsk jernbane.

1.3 Begrensing av masterarbeidet

1.3.1 Slitasjebidrag

Det er allerede kjent at en rekke ulike forhold i større eller mindre grad vil ha betydning for slitasjeutviklingen til et jernbanehjul. (Jendel og Berg, 2002a, s.503) En universell empirisk modell som beskriver slitasjen ved enhver rådende omstendighet ville imidlertid bli for kompleks. Modellen ville ha like mange dimensjoner som det finnes parametere som påvirker slitasjen, og av hensyn til den begrensede mengden disponibel tid og tilgjengelig rådata er en slik analyse ikke gjennomførbar. Mitt bidrag til feltet hjulslitasje vil derfor måtte være av betydelig mer beskjeden art, og jeg begrenser meg i masterarbeidet til å studere én av de mange parametere som hjulslitasje kan kobles mot, nemlig traséens geometriske utforming.

I undersøkelse av sporgeometriens innvirkning vil alle de øvrige tenkelige parametere med innvirkning på slitasjen måtte forbli konstante mens sporgeometrien endres, slik at eventuelle slitasjeforskjeller kan knyttes direkte til variasjon i sporgeometri. Dette er ikke mulig i den virkelige verden, og særlig ikke med de rådataene som foreligger, fra reell nyttetraffikk på det eksisterende nettet. Gjennom en møysommelig utvelgelse av måledata som sikrer at øvrige parametere forblir mest mulig konstante er målet at oppgaven alikvellt skal kunne avdekke større slitasjemessige trekk relatert til sporgeometri.

Som beskrevet vil forsøket foregå under en rekke øvrige omstendigheter, eller parametere, som også har innvirkning på slitasjen. Resultatet av arbeidet er ikke nødvendigvis representativt for hjulslitasjen ved andre omstendigheter enn disse, da en endring i en av de øvrige slitasjerelaterte parametere godt kan tenkes å påvirke sporgeometriens bidrag på slitasjen. Resultatene av denne analysen tegner altså bare noen punkter, eller i beste fall en strek, i det mangedimensjonale rommet

som representerer den universelle løsningen for hjulslitasje. Arbeidet vil allikevel kunne bidra til økt innsikt og forståelse innen fenomenet hjulslitasje også på et generelt nivå.

1.3.2 Vedlikehold

Slitasje defineres i *Aschehoug og Gyldendals store norske leksikon. 13 : Sau-Su*, 2006 som ”nedsliting av materiale fra en overflate pga. friksjon”. Nedsliting er imidlertid ikke eneste mulige årsak til at et hjul må reprofileres. For bestemmelse av det nødvendige hjulvedlikeholdsintervall på en strekning spiller også overflatefeil som sprekker, hjulslag og knusingsutmatting inn. Forekomsten og omfanget av disse kan også tenkes å avhenge av omstendigheter som sporegeometri, men fenomenet overflatefeil omfattes altså ikke av bergrepet ”hjulslitasje”.

På samme måte som det eksisterer grenseverdier for hjulslitasje, finnes også grenseverdier for overflatefeil. (Norges Statsbaner BA, 1998) Arbeidet begrenses likevel til kun å undersøke nedslitingen, og hensiktsmessige vedlikeholdsintervaller for rutene kan ikke fastsettes på bakgrunn av kun dette. Arbeidet kan altså kun avdekke om slitasjeverdiene etter dagens praksis har overskredet sine grenser på det tidspunkt som vedlikehold normalt finner sted.

1.3.3 Hjuloverflaten

Når det kommer til slitasjeobservasjoner er det grunnet begrenset tilgang på rådata gjort betydelige forenklinger også her. Det ønskede ville være å sammenligne tverrsnitt av hjulene som fullkomment beskriver deres kontaktflate med skinnen, slik at man fikk et komplett bilde av slitasjeforløpet over tid. Dette ville også muliggjøre undersøkelse av hvordan ekvivalent konisitet endrer seg med økt tilbakelagt avstand, hvilket kan ha betydning ved fastsettelse av det mest hensiktsmessige vedlikeholdsintervall. Beklageligvis er større mengder av slik rådata fremdeles vanskelig å oppdrive, og undersøkelsen vil i sin helhet måtte bygge på observasjon av en håndfull enkeltmål av hjulprofilen. Disse definerte målene blir videre omtalt som målarter, og de fire målartene som blir analysert gjennom arbeidet er flenstykkelse, flenshøyde, tverrmål og hjuldiameter.

1.4 Arbeidets oppbygning

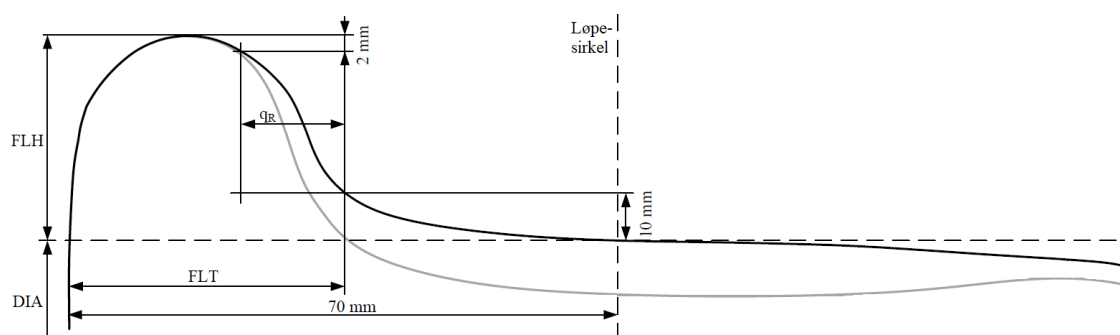
I første del av oppgaven fremlegges relevant teori som skal gi grunnleggende forståelse av hjulets geometri og utviklingen av hjulslitasje. Deretter presenteres metoden, som er en beskrivelse av den benyttede fremgangsmåten lagt til grunn for oppnåelse av masteroppgavens målsetning. I kapittel 4 evalueres anskaffede data for verifisering av dens egnethet. Påbegynnelse av en analyse av uegnede data er meningsløst, da resultatet av analysen uansett ikke ville avdekke det som i første omgang skulle undersøkes. I kapittel 5 presenteres resultatene av analysen i form av tekst, tabeller og diagrammer. Videre i kapittel 6 følger en diskusjon av resultatene før oppgaven avsluttes med en endelig konklusjon i kapittel 7.

En viktig del av arbeidet vil dessuten være å beskrive de rådende omstendighetene ved dette forsøket mest mulig presist, for fastsettelse av resultatets gyldighetsområde. Dette er avgjørende for at resultatet av oppgaven senere skal kunne bidra til økt forståelse ved reelle, sammenlignbare slitasjetilfeller. Samtidig vil det være nødvendig for trekking av linjer til andre undersøkelser av hjulslitasje, slik at arbeidet skal kunne inngå som en brikke i et større bilde.

2 Teori

2.1 Hjulmål

I kontaktområdet mellom hjul og skinne foregår som tidligere beskrevet en uønsket nedsliping av legemenes overflate med gradvis bortfall av materiale. Ettersom noen steder på hjulet vil være mer utsatt for slik slitasje enn andre, endrer hjulets overflategeometri seg kontinuerlig mens hjulet beveger seg langs traséen. Figur 3 illustrerer tverrsnittet av den delen av jernbanehjulet som utsettes for skinnekontakt. Det flattere området av profilverflaten omkring løpesirkelen benevnes hjulbanen, og det er dette området som har skinnekontakt når det rullende materiellet beveger seg på relativt rette partier. I kurver derimot vil berøringspunktet til det ytre hjulet bevege seg over på flensen, som er forhøyningen i venstre del av figuren. Jo mindre kurveradien er desto høyere opp på flensen vil berøringspunktet søke. Overgangsområdet i mellom hjulbane og flens betegnes hulkilen. Den sorte konturen viser et hjulprofil i nyttilstand, mens den grå er et typisk tverrsnitt av et hjul utsatt for slitasje. De fire målartene i tabell 1 er også definert av figuren.



Figur 3: Hjulverrsnitt med definisjon av målartene slik som beskrevet i trykk 741.1.2 (Norges Statsbaner BA, 1998)

Kilde: Schelle, 2014

Hjulets diameter måles alltid i løpesirkelen, 70 mm fra hjulets innside. Diameteren definerer også flensens bunnlinje, og flenshøyden vil være den vertikale avstanden fra denne og opp til flensens toppunkt. En linje som befinner seg 10 mm ut fra hjuldiameternivå vil skjære flensens ytre styreflate i et punkt som brukes til definisjon av flenstykkelse og tverrmål. Flenstykkelseren er den horisontale avstanden fra dette punktet til hjulskivens innside, mens tverrmålet er definert som den horisontale avstanden fra punktet til et punkt på flensens overflate 2 mm lavere enn flensens toppunkt. (Norges Statsbaner BA, 1998, s.4)

Slitasje på hjulbanen vil innebære at diameter minker og flenshøyde øker. Dette fremkommer for øvrig ved sammenligning av nyprofil og slitt profil i figur 3. Flensslitasje vil derimot best kunne detekteres ut i fra en reduksjon i flenstykkelseren og tverrmålet.

Fork.	Målart	Nytilstand (P8A-profil)	Min. grensemål	Maks. grensemål
DIA	Diameter	870 mm	800 mm	870 mm
FLH	Flenshøyde	30 mm	27,5 mm	36 mm
FLT	Flenstykkelseren	30 mm	22 mm	33 mm
q_R	Tverrmål	12,204 mm	6,5 mm	

Tabell 1: Grenseverdier for hver av hjulprofilets målarter i hht. trykk 741.1.2.

Kilde: Norske Tog AS, 2022 — Norges Statsbaner BA, 1998, s.29

2.2 Beregning av slitasje

I følge Knothe og Stichel, 2003, s.273 er det vanlig å gå ut i fra at mengden materiale som slites bort på et sted er proporsjonal med friksjonsarbeidet som gjøres på det aktuelle stedet. Mengden materiale som slites bort, Z , vil altså kunne uttrykkes $\mathbf{Z} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{W}$, der W er friksjonsarbeidet og k er en konstant som avhenger av bl.a. kvalitet på hjul- og skinnestål. Knothe og Stichel, 2003 formidler videre at den vanlige måten å beskrive friksjonsarbeidet på er ved hjelp av følgende uttrykk.

$$W = T_{\xi}s_{\xi} + T_{\eta}s_{\eta} + M_{\zeta}\phi_{\zeta} \quad [Nm]$$

der W er friksjonsarbeidet i kontaktflaten mellom hjul og skinne, T_{ξ} , T_{η} og M_{ζ} er hhv. krypkrefter og -moment, mens s_{ξ} , s_{η} og ϕ_{ζ} er respektive glideavstander.

Uttrykket over beskriver altså samlet friksjonsarbeid etter en gitt glideavstand. Ved å dividere på avstanden oppnås et mål for friksjonsarbeidet per lengdeenhet, som vil være summen av produktene krypkraft og kryp. Følgende uttrykk vil da oppnås. (Knothe og Stichel, 2003)

$$\frac{W}{l} = T_{\xi}\nu_{\xi} + T_{\eta}\nu_{\eta} + M_{\zeta}\nu_{\zeta} \quad [Nm/m]$$

der W/l er friksjonsarbeidet i kontaktflaten mellom hjul og skinne per tilbakelagte meter, T_{ξ} , T_{η} og M_{ζ} er hhv. krypkrefter og -moment, mens ν_{ξ} , ν_{η} og ν_{ζ} er sammenhørende kryp og spinn.

Ettersom W er proporsjonal med Z må følgelig også W/l være det. Jo større de opptredende kryp og krypkrefter er, desto større er altså mengden materiale som blir slitt bort fra hjulet per tilbakelagte meter og desto større geometrisk endring er å forvente på hjultverrsnittet. (Knothe og Stichel, 2003, s.256)

2.3 Sporgeometriens teoretiske innvirkning på slitasjen

2.3.1 Introduksjon

Høye sporføringskrefter som oppstår ved svært trange kurver eller ved høy fremdriftskraft grunnet stigninger vil føre til sterk slitasje på hjulene og en forkortet levetid. (Schelle, 2014, s.131) Det vil ellers ha betydning for slitasjeutviklingen hvilke av disse kreftene som virker, og en streknings geometriske utforming kan derfor påvirke et hjuls slitasjefordeling signifikant. For hjulsett på strekninger med en lav horisontalkurveandel vil slitasjen på hjulbane gjerne være den dominerende, mens hjulsett som trafikkerer kurverike strekninger ofte opplever betydelig flensslitasje. Når det kommer til vertikalgeometriens innvirkning, så vil kraftoverføring grunnet fremdrift og bremsing stå sentralt. (Janicki og Horst, 2008, s.31) For hjulsett som ofte yter høy fremdrift grunnet for eksempel bratte stigninger vil slitasje på hjulbanen gjerne være dominerende. Trafikkerer hjulsettene heller flate traséer vil fremdriftsyttelsen og dermed slitasjen på hjulbanen være mindre. (Schelle, 2014, s.6)

2.3.2 Flensslitasje

Horisontalkurver er særlig kritisk for hjulslitasje, og forventet slitasje grunnet kjøring i kurver er derfor en viktig faktor ved utforming av rullende materiell. (Halland mfl., 2005, s.8 — Knothe og Stichel, 2003, s.272–274) Ettersom hjulets rulleretning i kurver ikke lenger vil være parallell med skinnenes tangent i berøringspunktet vil det oppstå en anløpsvinkel mellom hjul og skinne som øker med minkende kurveradius. Dette resulterer i en ugunstig topunksberøring i det flensen glir mot skinnens styrekant, og betydelig slitasje vil oppstå. (Halland mfl., 2005, s.9) Friksjonsarbeidet avhenger sterkt av kurveradien, og krappe kurver vil medføre betydelig mer slitasje enn de slakere. I følge Schöch, 2005, s.4 vil den opptredende flenskontakten når kurveradien underskrider 400 - 500

meter fører til et vesentlig materialtap på flens. Beskrivelsen omhandler riktignok slitasjeprofiler, men fenomenet vil ha relevans også ved høyere konisitet. I følge Halland mfl., 2005, s.10, 16–17 er kurveradier under 300 - 350 meter kritisk for slitasjen da de nødvendige krefter til å sette i gang selvstyring av hjulsatsen ikke produseres. Det er ellers beskrevet at selv ved løpeverk som i hovedsak utnytter ettpunktsberøring, så vil topunktsberøring likevell oppstå når kurveradien underskrider ca 350 meter. Den oppredende anløpsvinkelen innebærer samtidig at gliding må bidra som en komponent for at akslingen skal følge skinnene. Jo mindre kurveradien er desto større kryp vil måtte opptre og desto større blir slitasjen.

Stivheten til den longditunale akselkassefjæringen vil imidlertid også påvirke flensslitasjen ettersom fjæringen gir hjulakslingen rom for å delvis dreie seg med skinnen for å redusere anløpsvinkelens størrelse. Akslinger med myk langs fjæring vil følgelig ha en lavere kurveradiusgrense for topunktsberøring og betydelig redusert slitasje. (Knothe og Stichel, 2003, s.260–266, 272–273 — Halland mfl., 2005, s.17) Friksjonstallet mellom hjul og skinne vil dessuten ha betydning for krypkreftene og dermed slitasjen. Høy fuktighet eller praktisering av flenssmøring gir eksempelvis lavere friksjon og mindre slitasje.

Generelt antas en kvadratisk avhengighet mellom kurveradius og mengden materiale som blir slitt bort. (P. Schneider, personlig kommunikasjon, 2. mai 2022). En modellering av friksjonsarbeid mot kurveradius gjennomført av Stichel, 1996 impliserer det samme, da friksjonsarbeidet her øker fra omlag 150 Nm/m til 600 Nm/m når kurveradien reduseres fra 600 m til 300 m. En halvering av kurveradien medfører altså i denne modelleringen en firedobling av slitasjen.

2.3.3 Hjulbaneslitasje

Ved fri rulling er hastigheten til hjulet og hastigheten til underlaget lik, og relativhastigheten lik null. Dermed vil kryp også være lik null, og ingen slitasje vil foregå. Ytes derimot fremdrift gjennom akslingen, eller hvis akslingen bremses, så vil dette endre seg. Hjul og underlag vil da ha ulike hastigheter og det oppstår kryp. (Knothe og Stichel, 2003, s.60–62) For øvrig kan det av denne årsak forventes en høyere slitasje av hjulbanen på drivhjulsatser enn på løpehjulsatser. Ved fall vil det imidlertid slites ekstra på begge hjulsatstyper, da samtlige hjulsatser er utstyrt med bremses.

For at toget skal kunne opprettholde konstant hastighet må fremdriftskraften som overføres til skinner gjennom hjulene, Fz , til enhver tid svare til summen av kjøremotstandskrefter, W . Dette fremstilles matematisk ved ligning 1. (Nießen, 2020, 12-1 til 12-4)

$$Fz = W = (m_{lok} + m_{vogn}) \cdot g \cdot (w_R + w_L + w_S + w_K) \quad (1)$$

der w_R er rullestand, w_L er luftmotstand, w_S er stigningsmotstand og w_K er krumningsmotstand.

For små vinkler, som stigningen til en jernbanelinje, vil verdien w_S være tilnærmet lik stigningsgraden i promille. Ved konstante øvrige parameterverdier vil altså nødvendig fremdriftskraft øke proporsjonalt med økende stigning. Det er verdt å merke seg at fremdriftskraften selv på vannrette partier vil være større en null, grunnet de øvrige motstandene. Fremdriftskraften vil overføres fra hjul til skinner i form av lengskrypkraft. (Knothe og Stichel, 2003, s.61)

I følge Kalkers teori vil krypkraft øke med økt kryp. Da friksjonsarbeidet er produktet av de to vil også dette øke med økt krypkraft. Jo brattere vertikalprofil, desto mer fremdriftskraft må dermed ytes i stigninger og desto hardere må det bremses i fall. Altså vil teorien tilsi at kryp og krypkraft vil øke med økt bratthet, og at slitasjen per meter vil gjøre det samme.

2.4 Slitasje og kjøredynamikk

Mens den oppredende kjøredynamikken vil være et resultat av tidligere slitasje, så vil kjøredynamikken, som tidligere beskrevet, være førende for det til enhver tid pågående slitasjearbeidet. (Zacher mfl.,

2015, s.691) De to fenomenenes utvikling vil derfor gjensidig påvirke hverandre mens hjulsatsen beveger seg på skinnene. Det vil videre være stor forskjell på fartøyets kjøredynamikk på rettere partier der hjulsatsen følger en sinusbevegelse, og i kurver der den vil innstille seg kvasistatisk.

2.4.1 Sinusgange og ekvivalent konisitet

På rettstrekker og partier med tilstrekkelig høye kurveradier vil en hjulsats ikke bevege seg med traseen på en helt rett linje, men følge en sinusbevegelse. For hjulsatser med ikke-koniske hjul, så vil det være mulig å finne den hjulsatsen med koniske hjul som har likest mulig kinematisk oppførsel med den ikke-koniske hjulsatsen. Tangensen til denne hjulsatsens konusvinkel er den ekvivalente konisiteten. (C. Schindler, forelesning Spurführungstechnik, 25. november 2019) Videre i oppgaven brukes for ekvivalent konisitet forkortelsen λ_e , som matematisk defineres som $\lambda_e = \tan(\gamma_e)$ der γ_e er konusvinkelen til det koniske hjulet med lik oppførsel. Dette målet vil for ikke-koniske hjul tjene som en fullgod erstatning for konusvinkelen i Klingels formel, som beskriver hjulsatsens sinusgang på rettere strekningsavsnitt (Knothe og Stichel, 2003, s.165) Ekvivalent konisitet har med andre ord stor innvirkning på lateraldynamikken til en hjulsats.

Som for konusvinkelen til en konisk profil avhenger også ekvivalent konisitet av den geometriske avhengigheten mellom hjulsatsens tverrforskyvning, u_y , og rulleradiusforskjellen mellom hjulene ved denne tverrforskyvningen, $\Delta r(u_y)$. For en konusprofil vil imidlertid forholdet $\Delta r/u_y$ inneha en konstant verdi uavhengig av hjulsatsens lateralforskyvning. For et ikke-konisk hjul vil dette forholdet derimot variere med u_y , og λ_e vil da tjene som en referanseverdi. Referanseverdien tar ikke hensyn til $\Delta r/u_y$ -forholdet over hele hjulprofilen, men kun det området som har skinnkontakt under sinusgangen. Tverrforskyvningsamplituden, u_{y0} , som er det maksimale utslaget av u_y i sinusgangen, vil derfor også være en parameter som påvirker ekvivalent konisitet. Forhold som fører til at amplituden endrer seg vil følgelig påvirke den ekvivalente konisiteten. (Knothe og Stichel, 2003, s.43–46)

2.4.2 Kurvegange

I en kurve vil det ytre hjulet til en fritt rullende hjulsats måtte tilbakelegge større avstand enn det indre, ettersom kurveradien vil avvike noe mellom de to skinnene. Ettersom vinkelhastigheten for de to hjulene er lik vil hjulsatsen lateralt innstille seg slik at rulleradien for det ytre hjulet er større enn rulleradien for det indre. Problemet er da løst ved at det ytre hjulet vil tilbakelegge en større avstand per omdreining enn det indre. Forholdet mellom de to rulleradiene vil måtte svare til forholdet mellom kurveradiene de to hjulene beveger seg på, slik som beskrevet ved ligning 2.

$$\frac{r_a}{r_i} = \frac{R + e_0}{R - e_0} \quad (2)$$

der R er kurveradien, e_0 er halvparten av avstanden mellom berøringspunktene når hjulsatsen er i senterposisjon, mens r_a og r_i er rulleradien til det ytre og indre hjulet.

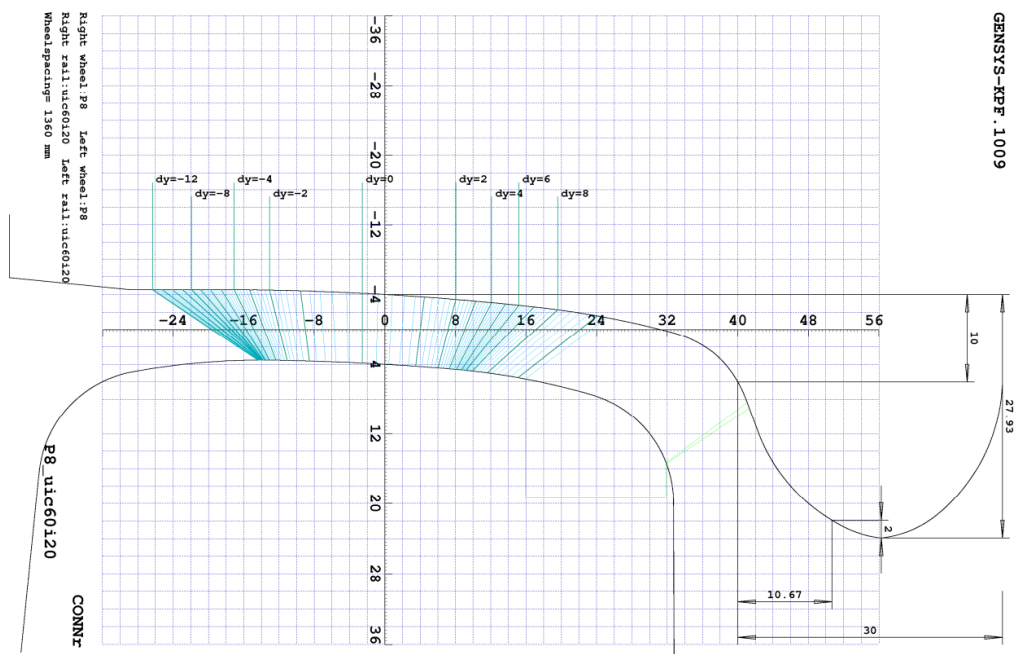
Hjulsatsens lateralforskyvning i en kurve, u_y , er dermed avhengig av kurveradius, og kan for koniske hjul uttrykkes ved ligning 3. Prinsippet er det samme for ikke-koniske hjul. Jo trangere kurver hjulsatsen opererer i desto større blir tverrforskyvningen, og desto lenger inn på flens og ut på kanten av hjulet vil det foregå slitasje. (Knothe og Stichel, 2003, s.258) For en hjulsats festet til en boggi på et vognsett vil hjulsatsen riktignok innstille seg noe annerledes enn en fritt rullende hjulsats, og uttrykkene vil da ikke gjelde helt eksakt.

$$u_y = \frac{r_0 \cdot e_0}{\delta_0 \cdot R} \quad (3)$$

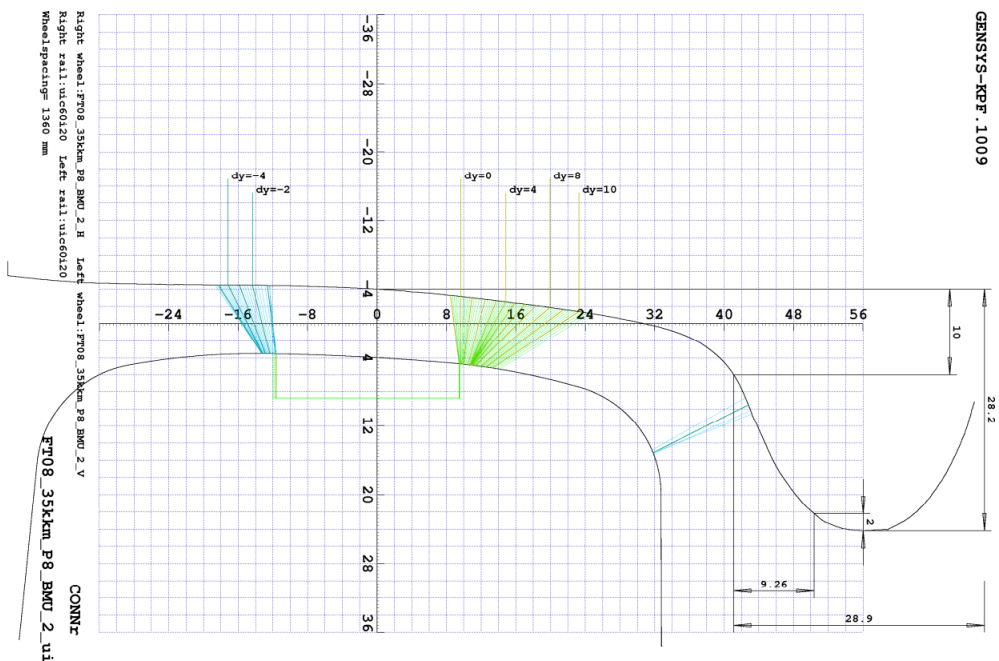
der r_0 er rulleradius når hjulsatsen er i senterposisjon og δ_0 er tangenthelningen i hjulkontakt-punktet når hjulsatsen er i senterposisjon

2.4.3 Hjul-skinne-parring

Som allerede belyst vil funksjonen $\Delta r(u_y)$ være bestemmende for kjøredynamikken og dermed slitasjeutviklingen, både på rett strekke og i kurver. Denne funksjonen vil avhenge av sporvidden, skinnehelningen og den aktuelle hjul-skinne-parringen. Hvilken hjul- og skinneprofil som anvendes vil altså ha stor betydning, og dersom profilene er blitt utsatt for slitasje slår det direkte inn på $\Delta r(u_y)$.



(a) P8 i nyttilstand på 60E1 i nyttilstand



(b) Moderat slitt P8 på 60E1 i nyttilstand

Figur 4: Berøringspunktvandring på hjul og skinneprofil i avhengighet av hjulsatsens tverrforskyvning (P8 på 60E1, skinnehelning 1:20, sporvidde 1435 mm)

Kilde: Jönsson, 2011

Et eksempel på en hjul-skinne-parring finnes i figur 4, som viser en P8 hjulprofil på en 60E1 skinneprofil både når hjulet er i nytilstand og i slitt tilstand. Berøringspunktene på hjulet er merket med dy-verdier, som beskriver hjulsatsens tverrforskyvning, u_y , fra senterposisjon. Strekene linker berøringspunktet på hjulet til sammenhørende berøringspunkt på skinnen. For nyprofilen vandrer berøringspunktet jevnt over hele hjulet ved laterale forskyving av hjulsatsen, med unntak av helt ytterst når flenskontakt oppnås. For den slitte profilen derimot oppstår også et område i senter hvor berøring aldri finner sted. (Knothe og Stichel, 2003, s.44–45) Slike berøringspunktsprang fører til ikke-eliptiske kontaktflater mellom hjul og skinne, såkalte "bjørnepoter". Dette fenomenet kan slå ugunstig ut på kontaktmeknikken med større kraftoverføringer og økt slitasje. (Knothe og Stichel, 2003, s.35)

Det slitte P8-profilet i figuren representerer tilstanden etter 35 000 km på skinneprofil 60E1 på Gardermobanen og Askerbanen sine svært rette kurvaturer. I tilfelle (a), der hjulprofilet innehar standardgeometri, kan λ_e måles til ca 0,23. I tilfelle (b), der hjulprofilet er slitt, er λ_e målt til 0,33. (Jönsson, 2011, s.20, 22) Slitasjens utvikling under de rådende omstendigheter bidrar med andre ord til en økning i ekvivalent konisitet, noe som har betydning for sinusgangen, berøringspunktets vandring og det videre slitasjeforløpet.

3 Metode

3.1 Introduksjon

Analysen må legges opp slik analyseresultatene muliggjør en drøfting av hvorvidt traséens utforming påvirker hjulslitasjen. Grunnet den komplekse dynamikken mellom hjul og skinne tas det i masterarbeidet utgangspunkt i en empirisk modell. Metodikken går da ut på å bestemme slitasjeutviklingen på en hjulprofil ut i fra observasjoner av reelle hjul. Man er dermed avhengig av en mengde målinger som danner grunnlaget for beregning av den forventede eller ”typiske” slitasjen. Problemet dekomponeres i første omgang ved at trasé og hjulslitasje analyseres enkeltvis, og et representativt bilde av de faktiske forhold fastsettes. For hver rute bestemmes det gjennomsnittlige antall kilometer tilbakelagt før et hjul tas inn til reprofiling, hvilket muliggjør en grundigere analyse av de sporgeometriske påkjenninger hjulet har vært utsatt for når kritisk tilstand nås. Videre i analysen modelleres utviklingen til hjulslitasjen over tilbakelagt avstand. Etter at geometriske data på traséens kurvatur og geometriske overflatedata på hjul fra strekningen er bearbeidet separat, vil videre undersøkelse bestå i å for hver enkelt rute stille trasédata opp mot hjuldata. I en avsluttende drøfting vil rutene sammenlignes, og eventuelle sammenhenger mellom sporgeometri og slitasje diskuteres på bakgrunn av analyseresultatene.

3.2 Betingelser til analysegrunnlag

Oppnåelse av et vellykket sluttresultat vil avhenge av en hensiktsmessig utvelgelsen av data, som bidrar til lavest mulig usikkerhet ved at øvrige parameteres innflytelse på resultatet minimeres. Anskaffelsen av data gjøres derfor på bakgrunn av en drøfting av hvilke betingelser som bør stilles.

3.2.1 Trasébetingelser

I dette arbeidet er skillet mellom begrepene *bane* og *rute* av essensiell art. Med en **bane** menes her en navngitt banestrekning definert av infrastruktureier, som banene Hovedbanen og Raumbanen. En oversikt over de norske banene, med unntak av de lengst nordliggende, sees i figur 5, og et komplett kart finnes i appendiks D. En **rute** defineres derimot i utstrekning som en reisevei trafikkert av et jernbanetransportselskap, og en rute er gjerne en kombinasjon av flere baner eller banestykker. Begge begrepene betegner en sammenhengende del av jernbaneinfrastrukturen mellom to gitte endepunkter.

For undersøkelse av hvorvidt en trasés utforming har betydning for slitasjen på de hjul som trafikerer den, behøves data på både trasé og på hjul slitt ut på den respektive traséen. Traséen som velges må med andre ord utgjøre en rute med rullende materiell som utelukkende har trafikkert denne ruten i forsøksperioden. Det vil dessuten være nødvendig å samle inn data fra flere ulike ruter for å ha et sammenligningsgrunnlag. Kun da vil det kunne undersøkes om en annen sporgeometri gir et annet hjulslitasjeforløp. Ruter med særdeles ulik sporgeometri er å foretrekke for lettest mulig å kunne detektere eventuelle forskjeller og for å la innflytelsen fra andre parametre bli minst mulig relativt sett. Dette gjelder både horisontal- og vertikalgeometri, som i arbeidet vil bli behandlet adskilt. Det bør tilstrebes å velge baner med lik skinneprofil og skinneståltype, da dette er typiske parametere som kan påvirke hjulslitasjen og virke forstyrrende på resultatet.

3.2.2 Hjulbetingelser

Hjulene som sammenlignes bør på tvers av rutene ha likest mulige egenskaper, slik at eventuelle ulikheter i hjulslitasje i størst mulig grad kan relateres til den avvikende strekningsgeometrien. Ideelt sett ville hjulene som sammenlignes være påmontert tilsvarende aksling på rullende materiell av samme modell. Hjulprofilene bør være av samme type, slik at utgangsgeometrien før bruk er identisk. Samtidig bør hjulene bestå av samme materiale, og aller helst komme fra samme produsent slik at de har gjennomgått samme herdingsprosess ved produksjon.



Figur 5: Linjekart over det norske jernbanenettet med unntak av Nord-Norge.

Kilde: Fevang, 2019

3.3 Anskaffelse av rådata

3.3.1 Datautvelgelse

For tilfredsstillende av tidligere drøftede betingelser til data er norske ruter som trafikkeres av like togsett blitt detektert. Norske tog sine Type73-togsett har de siste årene vært benyttet som fjerntog på Dovrebanen og Sørlandsbanen, og som regionekspresstog på Østfoldbanens vestre linje. Det dreier seg om følgende ruter:

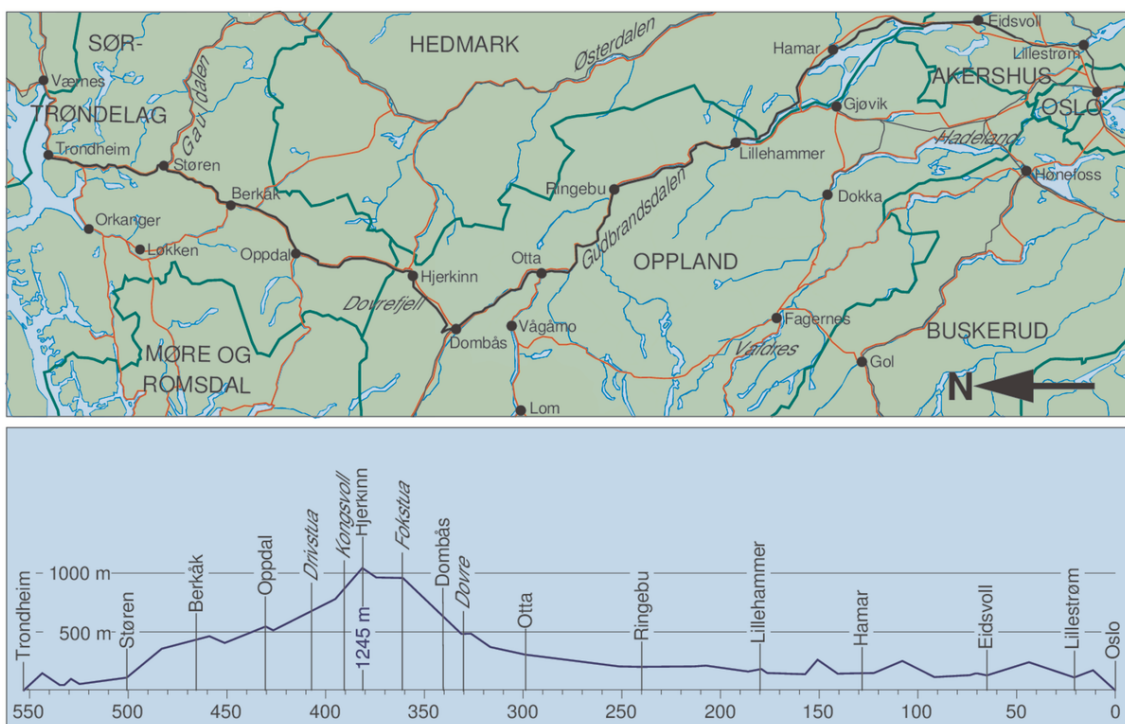
1. **Sørlandsbanen:** Oslo S - Stavanger S
2. **Dovrebanen:** Oslo S - Trondheim S
3. **Østfoldbanen:** Oslo S – Halden (– Gøteborg C)

Fire av de tjue daglige avgangene på Østfoldbanen snur normalt ikke i Halden, men er forlenget til Gøteborg C. (*Persontog til utlandet*, 2021 — NSB, 2014 — Vy, 2020) Dette innebærer at akslingene i 20 % av tilfellene ikke trafikkerer kun Oslo - Halden, men Oslo - Halden - Gøteborg. I perioden fra mars 2020 til 18. oktober 2021 snudde togsettene imidlertid alltid i Halden, og trafikkerte utelukkende ruten Oslo S - Halden. (Svingheim, 2021b) Flesteparten av de tilgjengelige hjulsettningene fra rute 3 er gjort i dette tidsrommet, og en rute 3A defineres derfor som ruten

Oslo S - Halden med alle rute-3-hjulmålinger gjennomført f.o.m. 1. mars 2020 som tilhørende hjuldatagrunnlag.

Trasékart over de delene av jernbanenettet som omfattes av de tre aktuelle rutene finnes i appendiks D. Ruten Sørlandsbanen begynner på Oslo S, der den følger Drammenbanen til Drammen med Askerbanen innskutt i første del. Derifra følger ruten Sørlandsbanen over Kongsberg, Bø i Telemark og gjennom Indre Agder frem til Kristiansand. Videre slynger den seg opp og ned over heiene mot Egersund før den følger nordover til Stavanger gjennom Jæren. Fjerntogene på Sørlandsbanen befordrer i overkant av én million reisende årlig. (Svingheim, 2021c) Sørlandsbanen er kjent for sin ujevne horisontal- og vertikalkurvatur som mange steder er lagt på grenseverdiene til det som er sorgeometrisk tillatt. Ruten Sørlandsbanen omtales videre i oppgaven som rute 1.

Ruten Dovrebanen utgjøres av Gardermobanen fra Oslo S til Eidsvoll, og følger videre Dovrebanen langs Mjøsas østbrekke til Lillehammer. (se figur 6) Herifra følger ruten Gudbrandsdalen opp til Dombås, hvor den så klatrer over Dovrefjell og forsetter ned til Oppdal. Deretter følger siste stykket til Trondheim via Støren. (Svingheim, 2021a) I motsetning til Sørlandsbanen som går mye på tvers av dalførene så følger Dovrebanen i hovedsak langsmed dalene nede i dalbunnen. Det meste av stigningen på Dovrebanen finner vi derfor på partiet mellom Otta og Støren, og da særlig mellom Dovre og Oppdal over Hjerkin. (Store norske leksikon, 2009) Dette partiet trekker rutens kurve- og stigningsandel vesentlig opp, men rutens både horisontalgeometri og vertikale geometri er fremdeles hakket mildere enn Sørlandsbanen sin. Årlig blir omkring 800 000 passasjerer befordret med fjerntogene på Dovrebanen. (Svingheim, 2021a) Dovrebanen omtales videre i oppgaven som rute 2.



Figur 6: Dovrebanens trasé med vertikalprofil

Kilde: Store norske leksikon, 2009

Ruten Østfoldbanen følger Østfoldbanens vestre linje fra Oslo S langs østsiden av Oslofjorden til Fredrikstad via Moss. Herifra følger den et kortere parti oppover Glomma til Sarpsborg, der den på ny bøyer av mot sørøst og fortsetter ned til Halden. (Svingheim, 2018) Østfoldregionen er i sin helhet et flatt landskap beskrevet som et jevnt platå, særlig i vest og i senter der Østfoldbanen er trasert. (Kiær, 1885, s.8) Av denne årsak er banens linjeføring relativt god, noe som kommer særlig til uttrykk gjennom den slake vertikale geometrien. (Bane NOR, 2012) Østfoldbanen omtales videre i oppgaven som rute 3A.

Spesifikasjoner for de tre rutene er sammenfattet i tabell 2. For like togsett med identiske hjul er alle betingelser til hjul tilfredsstilt. Videre er det kontrollert at strekningene i grove trekk utviser ulik strekningsgeometri. Også krav til traséutvelgelse er dermed tilfredsstilt for rutene 1, 2 og 3A.

Rute	Rutenavn	Endestopp 1	Endestopp 2	Rutelengde
1	Sørlandsbanen	Oslo S	Stavanger S	591 km
2	Dovrebanen	Oslo S	Trondheim S	549 km
3A	Østfoldbanen	Oslo S	Halden	137 km

Tabell 2: Rutespesifikasjoner

3.3.2 Hjulslitasjedataanskaffelse

Anskaffet måledata omfatter regelmessige målinger av flenstykke, flenshøyde, tverrmål og hjuldiameter for omlag 250 hjulsett tilhørende Type73-togsett. Hjuldataen kommer fra selskapet Mantena, og målingene er gjennomført over en periode på nærmere tre år (20.06.2019 - 04.02.2022). Totalt omfatter datagrunnlaget 22 239 enkeltmålinger, der samtlige er fra hjulsett som i måleperioden har operert utelukkende på én rute. Antallet målinger per hjulsett varierer sterkt, men med omtrent 2500 hjulsettkontroller totalt, så er hvert hjulsett i gjennomsnitt tatt inn til kontrollmåling ti ganger. Når et hjulsett tas inn til kontroll undersøkes som regel alle målarter på begge hjul. Det forekommer likevel at kun et eller noen av målarterne er undersøkt på en hjulsats inne til kontroll. Tabell 3 gir en oversikt over den totale mengden tilgjengelig hjuldata for hver rute, mens en oversikt over antallet kontroller gjennomført på den enkelte hjulsats finnes i appendiks E.

3.3.3 Trasédataanskaffelse

Data som beskriver de tre rutenes sporgeometri og skinner er i sin helhet anskaffet fra Bane NOR. Dataen omfatter excelfiler for horiontargeometri, vertikargeometri og skinnedata for alle de baner som enten helt eller delvis inngår i de utvalgte rutene. Det er i tillegg mottatt excelfiler som beskriver kjedebrudd på enkelte baner, slik at hopp i kilometreringen har kunne blitt korrigert for. I alt er det mottatt 20 excelfiler. Det er mottatt data på banene Askerbanen, Dovrebanen, Drammenbanen, Gardermobanen, Sørlandsbanen og Østfoldbanen (vestre linje).

3.4 Forberedende databehandling for analyse

I den forberedende databehandlingsprosessen blir rådataene sammenstilt, rensket og omformet til et standardisert format egnet for videre analyse med programvaren MATLAB.

3.4.1 Hjulslitasjedatabehandling

Rådataen på hjulslitasje består av en liste over samtlige gjennomførte enkeltmålinger på hjul. Et utsnitt med tolv av de i alt 22 239 målingene i denne listen finnes i figur 7. For hver måling beskriver kolonnen "meternavn" den målararten det er tatt mål på. De ulike forkortelsene er listet opp med betydning i tabell 1. I rådataen er i tillegg H eller V lagt til forkortelsen, som betegner hvilket hjul på hjulsettet som er målt. Det skilles imidlertid ikke mellom høyre og venstre hjul i videre analyse. For FLT finnes dessuten en mindre andel enkeltmålinger betegnet FLTS, som beskriver summen av FLTH og FLTV for en hjulsats tatt inn til kontroll. Dette målet inngår ikke i videre analyse. Kolonnen "assetnum" inneholder hjulsatsens individnummer, og ved hjelp av dette kan hjulsett som kommer inn til flere kontroller gjenkjennes. Ellers beskrives for listeelementene måleverdi, dato for måling og til slutt kundenr., som angir hvilken rute hjulsatsen har trafikkert. Denne rådataen behøver ingen forberedende bearbeiding før analysen i MATLAB.

assetnum	measurementid	metername	measurementvalue	Måledato	Dagnr.	Materiell	Kunde
37079	3902	FLHH	30	20.06.2019	1631	TP73	10662
37079	3903	FLHV	30	20.06.2019	1631	TP73	10662
37079	3904	FLTH	30	20.06.2019	1631	TP73	10662
37079	3905	FLTS	60	20.06.2019	1631	TP73	10662
37079	3906	FLTV	30	20.06.2019	1631	TP73	10662
37079	3907	QRH	12,2	20.06.2019	1631	TP73	10662
37079	3908	QRV	12,2	20.06.2019	1631	TP73	10662
38320	425	DAH	868,4	20.06.2019	1631	TP73	10662
38320	426	DAV	868,2	20.06.2019	1631	TP73	10662
38320	428	FLHH	30,8	20.06.2019	1631	TP73	10662
38320	429	FLHV	30,9	20.06.2019	1631	TP73	10662
38320	430	FLTH	28,6	20.06.2019	1631	TP73	10662

Figur 7: Utsnitt av liste over hjulmålinger

3.4.2 Trasédatabelhandling

I arbeidet skilles mellom det som herved benevnes punktliste og objektliste. En punktliste betegner en liste over alle tversnitt av traseen der to baneelementer møtes, og elementene i en punktliste har derfor ingen utstrekning. Med baneelementer menes for horisontalkurvatur rettlinjer, sirkelkurver og overgangskurver, mens for vertikalkurvatur utgjør brekkpunktene skillet mellom baneelementene. Listen tar for seg alle slike grensesnitt fra traseens begynnelse til slutt. En punktliste over horisontalkurvatur beskriver radius i hvert grensesnitt, mens en liste over vertikalkurvatur beskriver stigningen på hver side av snittet. Et utsnitt av de fire første punktene i punktlisten for rute 1 finnes i figur 8.

For en objektliste representerer hvert element i listen et eget baneelement. Objektene i listen har dermed en utstrekning, og objektets lengde vil tilsvare den dellengden av traseen som det respektive baneelementet utgjør. All rådataen fra Bane NOR er på punktform, og i databearbeidingsprosessen omformes dette til objektform. Første steg i databehandlingen er derfor å sammenstille tilgjengelige punktliste for de ulike banene til punktliste for de tre aktuelle rutene. Der ruten har overgang fra en bane til en annen må den aktuelle banens punktliste brytes, og punkter fra neste bane må bygge videre på listen. På enkelte baner mangler noe data i excelfilen, og denne er tilført manuelt med informasjon fra dokumentet Bane NOR, 2018. Det dreier seg her om horisontaltraseen for de første 2,196 km av Oslotunnelen samt hele Bærums-, Tanum- og Skaugumtunnelen. Stykket i Oslotunnelen er imidlertid av ubetydelig lengde og er derfor neglisjert bort.

Punkt	Beskrivelse	Navn/Nr	Rute km	Trasépunkt	Kurveradius (m)
1	Horisontal trase, OB, Oslo S - Skøyen	OB	0,0000	OB	0
2	Horisontal trase, OB, Oslo S - Skøyen	OB	2,2400	OB	0
3	Horisontal trase, OE, Oslo S - Skøyen	OE	2,3200	OE	-900
4	Horisontal trase, OE, Oslo S - Skøyen	OE	2,4150	OE	-900

Figur 8: Utsnitt av første del av punktlisten for horisontalgeometri på rute 1

Når fullstendige punktliste for de tre rutene foreligger kan omformingen fra punktliste til objektliste påbegynnes. Hvert punkt i punktlisten har kilometrering som en parameter (kalt "Rute km" i figur 8), og differensen mellom punktenes kilometrering utgjør dermed lengden på mellomliggende baneelement. Objektlisten for en rute skal inneholde alle traséstykkene på den aktuelle ruten, slik at man ved å summere lengden av hvert element i listen vil finne strekningens totale lengde. På Asker- og Drammensbanen finnes det kjedebrudd med sprang i km-tellingen. Ved hjelp av oversikter fra Bane NOR over posisjon og størrelse på kjedebrudd så er disse utlignet, slik at kilometreringen i punktlistene representerer den faktiske avstanden i kilometer fra Oslo S.

Objektlisten utformes med kolonner for objektets start- og sluttradius, som vil være lik radiene i de to punktene som avgrensner objektet. Objektlisten som bygger på punktene i figur 8 sees i figur 9. Baneelementer begrenset av to punkter med ulik radius vil nødvendigvis være overgangskurver. Mellom to punkter med lik radius befinner det seg en sirkelkurve, med mindre verdiene er satt til null, som indikerer rettlinje med $R = \infty$. I figur 9 representerer dermed objekt nummer 1 en rettlinje, objekt nummer 2 en overgangskurve og objekt nummer 3 en sirkelkurve. Objekt-

listene som beskriver horisontalkrurvatur for rute 1, 2 og 3A består av henholdvis 4464, 3894 og 995 objekter. Med samme fremgangsmåte som for horisontalkrurvatur utformes objektlister også for vertikalkrurvatur. For disse vil hvert element inneha en verdi for elementets stigning. Objektlistene som beskriver vertikalkrurvatur for rute 1, 2 og 3A består av henholdvis 2141, 1594 og 655 objekter. De i alt seks objektlistene med tilsammen 13 743 objekter danner utgangspunktet for videre traséanalyse i MATLAB.

				0 betyr: R = INF	
Objekt			Lengde [km]	[Radius]	
Obj.nr.	Fra pkt.	Til pkt.		Start	Slutt
1	1	2	2,24	0	0
2	2	3	0,08	0	900
3	3	4	0,095	900	900

Figur 9: Utsnitt av første del av objektlisten for horisontalgeometri på rute 1

3.5 Analyse av hjulslitasje

Analysen av hjuldata gjøres ved hjelp av MATLAB, og funksjonen utformet for analysen er å finne som første funksjon i appendiks F. I først steg oppretter funksjonen en struktur, som er et nettverk der beslektet data kan grupperes sammen i felter. Funksjonen innordner enkeltmålingene fra rådatalisten i felter etter rute, og grupperer dem så videre i underfelter etter hjulsats. Innenfor hver hjulsats grupperes målingene i nye underfelter etter hjulsatskontroll, som defineres ved datoen målingen er gjennomført. Innenfor hver kontroll finnes igjen et underfelt for hver av målantene, der den enkelte måling finner sin endelige plass i strukturen. På denne måten bygges et komplekst struktursystem, der alle målinger er systematisert og ønskede måleverdier enkelt kan fremhentes ved behov under videre analyse. En strukturutskrift av de tre første av de 154 hjulsatsene på rute 1 finnes i figur 10.

På enkelte av kontrollene ble hjulene reprofilerert, altså dreid slik at hjuloverflaten igjen svarte til en nyprofil. Alle målantene utenom diameter gjenopptar da standardmål for P8A-profil. Diameter vil derimot reduseres markant ved en reprofilerings, ettersom hjulet under reprofileringsen slipes ned. Neste steg i fastsettelse av vedlikeholdsintervaller er dermed å fastsette ved hvilke av kontrollene det ble gjennomført en reprofilerings. På hjulkontroller der det foregår dreining så gjennomføres målingene alltid etter at reprofileringsen har funnet sted. Tre kriterier er satt for detektering av kontroller der det foregikk hjuldreining, og enhver kontroll som tilfredsstiller minst ett av de tre kravene blir i analysen registrert som en kontroll med hjuldreining. Kravene lyder som følger:

1. Reduksjon i DIAH på minst 3 mm/måned fra en måling til en annen og forskjellen fra foregående måling er minst 4 mm
2. Økning i DIAH på minst 10 mm fra foregående måling
3. Målantene for en kontroll, *DIAH-DIAV-FLHH-FLHV-FLTH-FLTV-QRH-QRV*, registrert med verdiene *30,0-30,0-30,0-30,0-12,0-12,0* eller *30,0-30,0-30,0-30,0-12,2-12,2*

Krav 1 bygger på antagelsen om at slitasjen i løpesirkelen ikke kan komme opp i 3 millimeter i løpet av en måned, og at dette ville tyde på at hjulet må være dreid. Slitasjeverdien sammenlignes derfor med foregående målings verdi, og ved hjelp av antallet dager mellom målingene bestemmes gjennomsnittlig slitasjehastighet. Dersom to målinger av et hjulsett skulle bli gjennomført med bare få dagers mellomrom ville det imidlertid være fare for at måleusikkerhet spiller inn og gir en momentan registrert hastighet på mer enn 3 mm/måned disse dagene. Derfor er det satt som tilleggskriterium at forskjellen fra forrige måling skal være på minst 4 mm, da det alltid går med minst 4 mm ved dreining av disse hjulene. Krav 2 skal avdekke utskiftinger av hjul, da diameteren plutselig vil gjøre et sprang og øke markant. Krav 3 undersøker ikke diametermål for avdekking av hjuldreining, men stiller i stede krav til de øvrige målantene. Ved en reprofilerings gjenopprettes mål i henhold til standardprofil P8A, og de øvrige målene er dermed definert. Dersom samtlige resterende målarter plutselig skulle inneha disse verdiene er det svært sannsynlig at hjulet er dreid.

En del dreide hjul er registrert med tverrmål lik 12,2 millimeter, og denne kombinasjonen registreres derfor også som hjuldreiring.

	Kontroll nr.	Måledagnr.	Dato	DIAH	DIAM	FLHH	FLHV	FLTH	FLTV	QRH	QRV
Hjulsats: 1 (Individnr.: 22008)	1	0	11.09.2019	807,0	807,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	2	174	03.03.2020	871,0	871,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,2	12,2
	3	189	18.03.2020	871,9	870,9	29,5	30,0	29,2	29,2	11,3	11,4
	4	239	07.05.2020	860,0	860,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	5	371	16.09.2020	848,0	848,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	6	449	03.12.2020	848,0	848,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	7	450	04.12.2020	840,0	840,0						
	8	485	08.01.2021	830,0	830,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	9	652	24.06.2021	810,0	810,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	10	697	08.08.2021	870,0	870,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,2	12,2
	11	827	16.12.2021	860,0	859,5	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
Hjulsats: 2 (Individnr.: 22009)	1	0	20.06.2019	836,6	837,2	31,2	30,9	29,0	28,6	11,1	10,4
	2	174	11.12.2019	809,0	809,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	3	276	22.03.2020	806,8	807,4	31,1	30,8	28,5	28,1	10,4	10,1
	4	343	28.05.2020	871,0	871,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,2	12,2
	5	486	18.10.2020	852,0	852,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	6	553	24.12.2020	844,0	844,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	7	615	24.02.2021	834,0	834,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	8	802	30.08.2021	813,0	813,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	9	841	08.10.2021	871,0	871,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,2	12,2
Hjulsats: 3 (Individnr.: 22018)	1	0	30.10.2019	838,8	838,4	31,1	31,3	28,9	29,1	11,0	11,3
	2	119	26.02.2020	808,0	808,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	3	128	06.03.2020	871,0	871,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,2	12,2
	4	139	17.03.2020	871,0	871,0	30,0	30,0	29,3	29,5	11,6	11,8
	5	330	24.09.2020	870,5	869,9	30,2	30,5	27,6	28,0	9,6	9,9
	6	362	26.10.2020	869,7	869,3	30,6	30,8	27,7	28,1	9,8	10,1
	7	375	08.11.2020	860,0	860,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	8	398	01.12.2020	859,8	860,0	30,1	30,0	28,8	29,0	11,1	11,1
	9	440	12.01.2021	859,5	859,8	30,2	30,1	28,4	28,7	10,7	10,7
	10	497	10.03.2021	859,3	859,4	30,3	30,3	27,3	27,8	9,6	9,8
	11	528	10.04.2021	843,0	843,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,0	12,0
	12	550	02.05.2021	843,2	843,4	29,9	29,8	29,4	29,4	10,6	10,8
	13	579	31.05.2021	870,0	870,0	30,0	30,0	30,0	30,0	12,2	12,2
	14	735	03.11.2021	857,9	857,9	29,5	29,6	29,8	29,5	11,6	11,5
	15	817	24.01.2022	846,5	846,5	30,0	29,9	30,0	30,0	12,0	11,9

Figur 10: Utskrift fra struktur i MATLAB

I en avsluttende fase av analysen undersøkes hjulsatsene etter tur, og alle etterfølgende kontroller etter en kontroll med dreiring gjennomgås. For kontrollene fastsettes antall dager siden forrige dreiring, og ettersom gjennomsnittlig daglig kjørelengde for de ulike rutene er kjent så kan antall kilometer siden forrige dreiring også fastsettes. Samtidig fastsettes endringen i diameter siden forrige dreiring. Måltartverdiene for hver kontroll er allerede kjent. Denne informasjonen brukes til å plote de ulike måltartenes verdier mot kjørelengden ved måling for hver av rutene. Funksjonen *polyfit* tar så utgangspunkt i disse punktene ved utførelse av en polynomregresjon av tredje grad. Regresjonen utføres da med minste kvadraters metode som utgangspunkt for beregning av polynomene som beskriver måltartenes utvikling. (MathWorks, 2022) I tillegg regnes statistiske nøkkelverdier ut ved hjelp av data i strukturen. En sentral nøkkelverdi er det gjennomsnittlige vedlikeholdsintervallet for hver rute, som blir benyttet videre i traséanalysen. Avslutningsvis plottes også en kumulativ fordeling for vedlikeholdsavstandsintervall.

3.6 Analyse av trasé

Traséanalysen går ut på å dele inn horisontal og vertikal geometri i intervaller etter horisontalkurve-radius og stigning, og deretter bestemme strekningsandelen av hver rute innenfor disse intervallene ut i fra dataen i objektlistene. Også analysen av trasédata gjøres ved hjelp av MATLAB, og MATLAB-funksjonene utformet for analysen finnes i appendiks F.

3.6.1 Horisontalkurvatur

Inndeling av parameteren horisontalkurveradius i hensiktsmessige størrelsesintervaller er nødvendig for videre analyse. Som tidligere beskrevet kan omfanget av flensslitasje være veldig sensitivt for små endringer i allerede trange kurver. Mindre forskjeller i kurveradien her kan derfor ha vesentlig større innvirkning på slitasjebildet enn større forskjeller i kurveradien til slake kurver. Intervallene for horisontalkurveradius er derfor lagt med mindre avstand mellom intervallgrensene i det minste radiusområdet enn for større radier. Dette for å avdekke små nyanser i trange kurveradier sitt mulige utslag på slitasjebildet. Intervallene er fremstilt i figur 11



Figur 11: Intervallinndelingen av horisontalkurvatur etter kurveradius

Hvert element i de utarbeidede objektlistene blir i analysen tilordnet riktig intervall, og lengden av alle elementer innenfor samme intervall summeres sammen. Dermed oppnås et bilde av den totale avstanden innenfor hver rute som hører inn under intervallet. Summen av alle elementene på ruten utgjør rutens totale lengde, og ut i fra det bestemmes hvor stor andel av hver rute som henhører under de ulike intervallene. Dette beskriver hvilke omstendigheter hjulsatsene på ruten har operert under. Ettersom en hjulsats kun opererer på den samme ruten så må rutens kurveradiusfordeling nødvendigvis også beskrive andelen av hjulsatsens tilbakelagte strekning som de ulike kurvestørrelser utgjør. Her antas at hjulslitasjen kontrolleres rett etter et helt antall omløp fra forrige måling eller at antall omløp går mot uendelig eller er forholdsvis høyt.

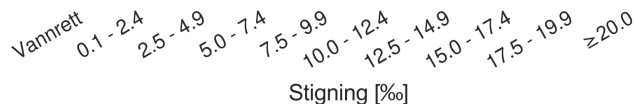
For elementer som utgjør rett strekke og sirkelkurve vil summeringen foreløpe rett frem, ettersom hele elementet innehar den samme radien og inngår i samme intervall. I overgangskurver derimot varierer radien innenfor samme element, og elementets lengde må deles opp slik at hvert av elementets radiusintervaller blir riktig representert i summeringen. Krumningen, κ , er en funksjon av radien ($\kappa=1/R$), og hvert radiusintervall har dermed et samsvarende krumningsintervall. I overgangskurvene er endringen i krumning per lengdeenhet konstant, og hvis man kjenner overgangskurvens lengde samt start- og sluttkrumning kan man ved hjelp av forholdstallet fastslå hvor stor del som henhører under hvert krumningsintervall. Hvis endringen i krumning innenfor det forhåndsdefinerte krumningsintervallet for eksempel utgjør én femtedel av overgangskurvens totale krumningsendring så må også én femtedel av overgangskurvens total lengde tillegges dette intervallet i summeringen.

Ruteandeler innenfor de ulike intervallene fremstilles i resultatkapittelet i form av søylediagram, der hvert intervall utgjør en søyle og der søylens høyde beskriver andelen av ruten med radiusverdi innenfor intervallet. Diagrammet for en rute er et bilde av en hjulsats sin tilbakelagte sporgeometri, da det over tid fremstiller hvor stor andel av den samlede kjørelengden som ulike kurvestørrelser har utgjort. Ved å multiplisere andelen med totalt antall tilbakelagte kilometer ved dreining for en aktuell hjulsats har man umiddelbart et bilde av antall km tilbakelagt på de ulike kurveradiene for denne hjulsatsen. Som referanseverdi på tilbakelagte kilometer for en aktuell hjulsats benyttes gjennomsnittsverdien estimert i hjulslitasjeanalysen. Kjørelengden på de ulike kurveradiene ved reprofiling fremstilles i eget søylediagram.

3.6.2 Vertikalkurvatur

Vertikalgeometrien deles på samme måte som horisontalgeometrien inn i hensiktsmessige størrelsesintervaller. Intervallene for stigning er fremstilt i figur 12, og grensene er jevnt fordelt slik at intervallene har lik størrelse. Det kan godt tenkes at stigning og fall har ulikt bidrag på slitasjen, og at stigningsintervallene for å gi videst mulig forståelse av fenomenet hjulslitasje burde dekke området $[-s, s]$. Den tilgjengelige rådataen bygger imidlertid på akslinger som har opplevde like mye positiv som negativ stigning, ettersom de har reist frem og tilbake langs den samme traséen.

Det vil derfor ikke være mulig å skille positiv og negativ stigning i dette arbeidet, og dermed mest hensiktsmessig å sette stigning i absoluttverdi og undersøke stigningsintervallet $[0, s]$. Både stigning og fall omtales derfor heretter som stigning. Med unntak av Flåmsbanen så er største stigning på det norske nettet 27 ‰. (Jernbaneverket, 2004, Kap.3, s.6) Stigninger på mer enn 20 ‰ forekommer imidlertid sjeldent på de fleste baner, så stigninger brattere enn 20 ‰ er definert inn under samme intervall. Vanrette partier har også fått sitt eget intervall, ettersom det utgjør et spesialtilfelle der stigningsmotstandens bidrag til kjøremotstanden er fraværende.



Figur 12: Intervallinndelingen av vertikalgeometri etter stigning

Innordningen av rutens vertikalkurvatur i de definerte stigningsintervallene forenkles noe, ved at traséen deles inn i lengdelementer fra brekkpunkt til brekkpunkt, og stigningen for hele denne avstanden settes lik den konstante stigningen mellom brekkpunktene tilhørende vertikalkurver. Dette innebærer at modellen får noe avvik omkring brekkpunktene, men for vertikalkurver med enten positiv eller negativ stigning på begge sider vil modellen samlet sett i stor grad gjenspeile stigningen hjulene utsettes for. Modellens noe lavere stigningstall i første del av kurven oppveies da av modellens noe høyere stigningen i siste del, og vica versa ved negativ stigning.

I vertikalkurver som binder sammen to stigninger med ulikt fortegn vil modellen derimot gi mer stigning enn den faktiske traséen, ettersom begge sider av brekkpunktet i modellen vil gi et for stort stigningsbidrag. Dette har sin bakgrunn i at modellens høyeste punkt vil ligge høyere i tyngdefeltet enn den faktiske kurvens høyeste punkt ved høybrekk, og lavere i tyngdefeltet ved lavbrekk. Den modellerte vertikalkurvaturen har dermed noe større høydespenn enn den faktiske ruten. Dette vil imidlertid være likt for alle de tre rutene, og selv om andelen vertikalkurver på ruten og deres beskaffenhet vil ha en viss innvirkning, så skulle modellen fremdeles gi et brukbart overordnet bilde av rutenes vertikalkurvatur sett opp mot hverandre. Ruteandeler innenfor de ulike intervallene fremstilles i resultatkapittelet i form av søylediagram, der hvert intervall utgjør en søyle og der søylens høyde beskriver andelen av ruten med stigningsgrad innenfor intervallet. På samme vis som for horisontalgeometrien bestemmes også kjørelengden tilbakelagt på de ulike stigningsgradene ved reprofiling, før dette fremstilles i eget søylediagram.

3.7 Sammenligning

Når analyseresultatene foreligger består siste del av arbeidet i gransking av disse for detektering av sammenhenger mellom slitasjetrekk og sporgeometriske trekk. Først undersøkes resultatene med mål om å avdekke feil eller svakheter i analysen. Deretter betraktes resultatene på detaljnivå med mål om å hente ut mest mulig relevant informasjon som kan bidra til økt forståelse. Videre består analysen i tre faser:

- Sammenligne rutens avstandsfordeling over ulike geometriintervaller ved hjuldreieing
- Undersøke trekk ved hjulslitasjen ved hjelp av modelleringen av målartenes utvikling med avstand og knytte det til rutenes geometriske fordeling.
- Drøfting av hvilke betydning de ulike sporgeometrier har på vedlikehold og hjulenes levetid med bakgrunn i analyseresultatene

4 Evaluering av inndata

Kvaliteten på dataen vil avhenge av mengden målinger i samspill med nøyaktigheten på selve målingene, altså hvor nært den enkelte måling kan forventes å beskrive virkeligheten. Sistnevnte dekkes i delkapittelet om måleusikkerhet. Uansett hvor nøyaktig målingene måtte være vil feilkilder dessuten kunne gjøre det utfordrende å knytte et utslag i målingene mot sin årsak. Det er derfor vel så viktig at dataen ikke er forstyrret av irrelevante påvirkninger av ukjent omfang som kan gi betydelige utslag på analyseresultatet. Dette dekkes av delkapittelet om like og avvikende omstendigheter. Her belyses både omstendigheter som er nærmest identiske for rutene og omstendigheter som varierer mellom rutene og dermed bidrar til en usikkerhet.

4.1 Trasédata

Alle toleransegrenser for sporgeometri er på millimeternivå, og jernbanens linjeføring er følgelig prosjektert svært presist med kurvepunkter beskrevet på millimeteren. Det er disse målene som ligger til grunn for rådatagrunnlaget mottatt fra Bane NOR. For å si noe om hvor godt samsvar som er å forvente mellom tallmaterialet og de omstendigheter hjulene opplever, vil spørsmålet da være hvor nøyaktig tegningene ble realisert ved bygging. Dette skal i følge Bane NOR i alle fall være på centimeternivå. Rådataen mottatt på sporgeometri gjenspeiler altså med en høy nøyaktighet den faktiske kurvaturen som hjulene har vært utsatt for.

4.2 Slitasjedatamengde

Mengden tilgjengelig hjuldata fra de enkelte ruter er fremstilt i tabell 3. For rute 1 og 2 foreligger en vid mengde hjuldata som kan danne grunnlag for en mer omfattende analyse med stor grad av sikkerhet. For rute 3A foreligger en svært beskjeden mengde data, og analysen vil avdekke om det nødvendige målingsgrunnlaget for beregning av vedlikeholdsintervaller foreligger.

	Rute 1	Rute 2	Rute 3A	Totalt
Antall unike hjulsett	154	96	2	252
Antall hjulsettkontroller	1 550	957	17	2 524
Antall enkeltmålinger	13 899	8 188	152	22 239
Måletidsrom start	20.06.2019	20.06.2019	27.07.2020	
Måletidsrom slutt	02.02.2022	04.02.2022	02.12.2021	

Tabell 3: Oversikt over mengden tilgjengelig måledata på hjul.

4.3 Måleusikkerhet

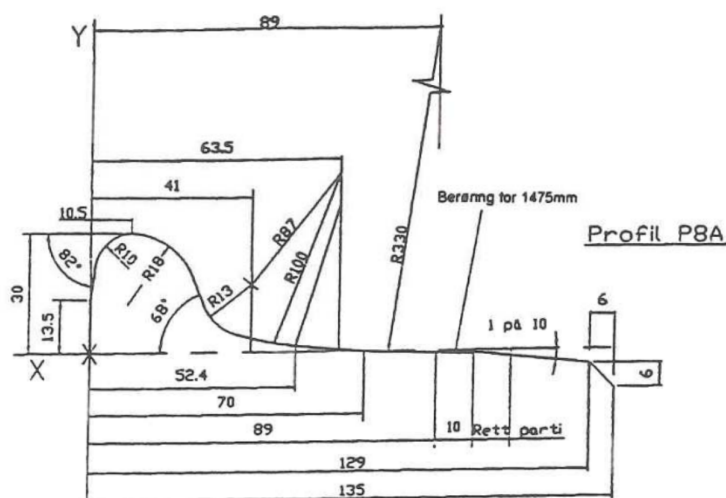
Hjulprofilmålingene er gjennomført delvis med manuell lære og delvis med digitale måleapparater. De to digitale måleapparater som er benyttet er Greenwood MiniProf og Calipri Nextsense. Mens Calipri angivelig skal måle med en feilmargin på inntil $\pm 80 \mu\text{m}$ for enkeltmålinger, så opplyser Greenwood at deres MiniProf har en nøyaktighet på $\pm 9,0 \mu\text{m}$. Unntaket er for mål av hjuldiameter, der Calipri skal ha en feilmargin på inntil $200 \mu\text{m}$ og MiniProf på inntil $30 \mu\text{m}$. (Greenwood Engineering, 2021 — Nextsense, 2022b — Nextsense, 2022a) Den målte verdien blir imidlertid rundet av til millimeter med én eller to desimaler når den overføres fra apparatet til registeret. Dette vil si at verdiene fra apparatene rundes av til nærmeste tiende eller hundrede mikrometer. Med unntak av diametermål er dermed samtlige av de registrerte MiniProf-verdiene innenfor usikkerhetsmarginen og 100 prosent korrekte, og det samme gjelder samtlige Calipri-verdier med én oppgitt desimal. For eventuelle Calipri-verdier registrert med to oppgitte desimaler må det medregnes en liten usikkerhet i rådataene. Det eksisterer ingen informasjon om hvilket måleapparat som er brukt for den enkelte måling.

Den manuelle læra har en ukjent nøyaktighet, men det skal være vanskelig å lese av mer nøyaktig enn 0,5 millimeter. Målinger gjort med denne er derfor gjerne rundet av til nærmeste halve millimeter ved loggføring. Verdiene funnet med læra har dermed større unøyaktighet enn de som er funnet med de digitale apparatene.

4.4 Like og avvikende omstendigheter

4.4.1 Hjul

På materiell som fortrinnsvis kjøres i Norge kreves i følge infrastruktureier P8-profiler, og Mantena oppgir at hjulprofilen P8A benyttes på aktuelt materiell på samtlige tre ruter. Profilen er utviklet i Storbritannia, som i likhet med Norge opererer med nominell skinnehelning 1:20. (Norges Statsbaner, 1983, s.20 — Jernbaneverket, 2004, kap. 3 s. 6, 13) Profilens geometri er skissert i figur 13. Mantena opplyser videre at samtlige hjul består av stålet *ER8 / Excellent* fra *Bochumer Verein Verkehrstechnik*.

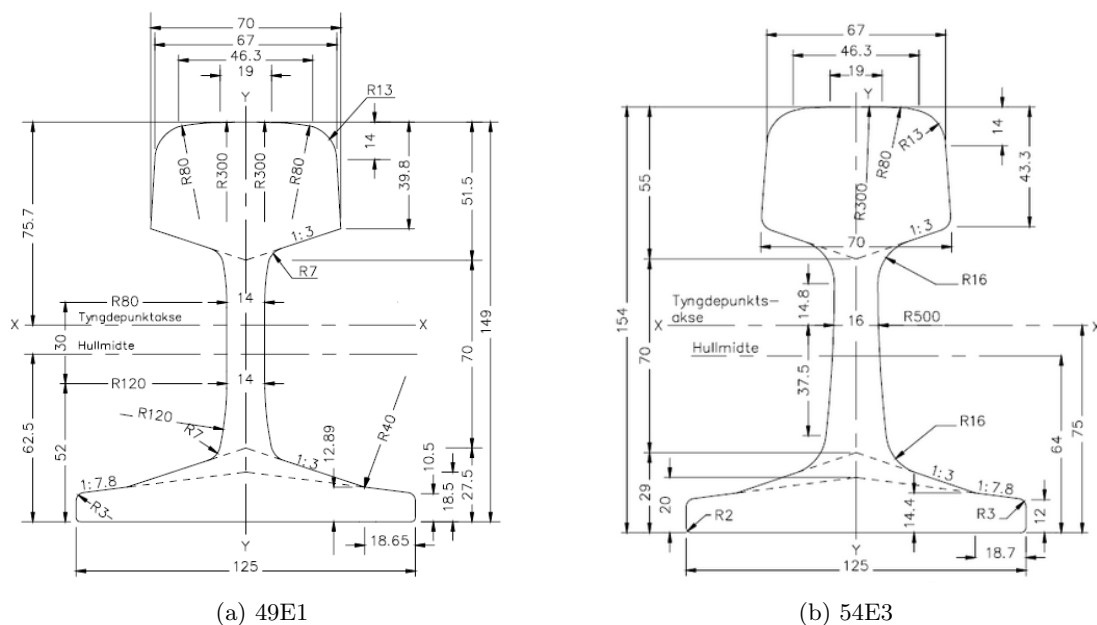


Figur 13: Hjulprofil P8A

Kilde: Jernbaneverket, 2012

4.4.2 Skinner

Nominell sporvidde er på det norske nettet 1435 mm. Jernbaneverket, 2004, kap. 3 s. 5) Ved hjelp av tilsendt detaljdata fra Bane NOR på norsk jernbaneinfrastruktur er skinneprofil og -stålkvalitet på de tre rutene undersøkt nærmere. For rute 1 og rute 2 er skinneprofilen 49E1 den dominerende (figur 14a), utviklet i Tyskland i 1920. Sekundært på kortere delavsnitt av strekningene er hhv. 54E3 og 60E1 benyttet. Rute 3A består i sin helhet av skinnetyper 54E3 (figur 14b) fra 1963. (Zacher mfl., 2015, s.692) Samme undersøkelse av detaljdata som ble gjort for skinneprofil er gjennomført for skinnestålkvalitet. Skinnene på rute 1 og 2 består primært av ståltypen R269Mn med mindre avsnitt av ståltypen R260Mn. Rute 3A sine skinner består i sin helhet av ståltypen R260Mn.



Figur 14: Skinneprofiler

Kilde: Bane NOR, 2022

4.4.3 Berøringsflate hjul-skinne

Som beskrevet i teorikapittelet vil funksjonen $\Delta r(u_y)$ være bestemmende for kjøredynamikken og dermed slitasjeutviklingen. Skinnehelning og sporvidde er like for alle rutene. Ettersom anvendte hjul- og skinneprofiler også har stor betydning for funksjonens utseende er de valgte rutenes profiler nærmere undersøkt. Da hjulprofil er lik i nyttilstand for de tre rutene er det kun skinneprofilenes overflate som må inspiseres nærmere. De to skinneprofilene som benyttes på rutene er i hovedsak 49E1 (rute 1 og 2) og 54E3 (rute 3A og sekundært på rute 1). Av figur 14 fremkommer det at begge skinneprofilene er konstruert med en radius på 300 mm over en bredde på 19 mm i senter. Deretter følger en 80 mm radius inntil en bredde på 46,3 mm der den er tilsluttet en 13 mm radius som følger ut til profilens totale bredde på 67 mm i en høyde på 14 mm. De to skinneprofilenes geometri er dermed identisk i hjulkontaktområdet. Følgelig vil den ulike representasjonen av skinneprofil på rutene ikke innebære ulikhet i funksjonen $\Delta r(u_y)$, og hjul-skinne-berøringen vil i utgangspunktet være lik for alle rutene. Skinnene vil imidlertid gradvis slites ned på samme måte som hjulene, før de vedlikeholdes og gjenopptar standardmål. Det er ikke tatt hensyn til hvilke tilstand de ulike delene av jernbanenettet til enhver tid er i. Analysen bygger på ideen om at målingene går over et såpass langt tidsrom at alle delene av nettet vil ha vært i ulike tilstander til ulike tider, og at dette derfor vil jevne seg ut. En viss forskjell må alikvell medregnes mellom rutene, og denne utgjør en usikkerhetsfaktor.

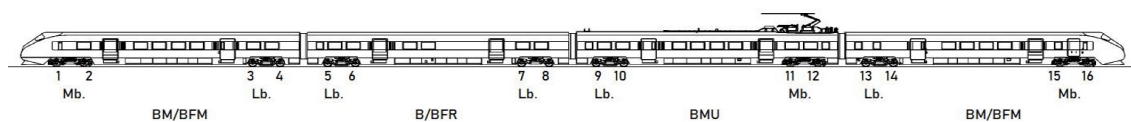
Som tidligere beskrevet vil λ_e og materiellets sinusgang på rettere partier i tillegg til å avhenge av $\Delta r(u_y)$ avhenge av det maksimale tverrutslaget, u_{y0} . Denne tverrforskyvningsamplituden vil igjen avhenge av andre faktorer, som materiellets primær- og sekundærfjæring. (P. Schneider, personlig kommunikasjon, 2. mai 2022) Hastigheten skal imidlertid ha mindre å si for amplituden, så lenge den ikke overskrider grensen for ustabil gange. (Zacher mfl., 2015, s.706) Togsettype og dempere beskrives i senere avsnitt, og på bakgrunn av også deres likhet er det grunn til å tro at amplitude og ekvivalent konisitet vil være mer eller mindre lik mellom rutene.

4.4.4 Togsettserie

På rute 1 og 2 har Type73 serie A vært benyttet, mens rute 3A har vært trafikkert av serie B. (Norske Tog AS, 2020a — Norske Tog AS, 2020b) Det er imidlertid ikke mye som skiller de to

seriene. Både serie A og serie B-togsettene utviser den samme ytelsen, både når det kommer til maksimal trekkraft (117 kN), motoreffekt ($2\ 646\text{ W}$), kjøremotstandsfaktor Strahl ($2,5\text{ N/kN}$) og faktor for roterende masse ($1,05$). Togsettene er ellers like i oppbyggingen, og består av fire vogner som hver har to boggi. Hver boggi har igjen to akslinger, også omtalt som hjulsatser. Hvert togsett har dermed i alt 16 hjulsatser, derav ti løpehjulsatser uten trekkraft og seks drivhjulsatser med trekkraft. Også plasseringen av drivhjulsatserne er identisk, og utgjør for begge togtyper hjulsatsene 1, 2, 11, 12, 15 og 16 forfra. (se figur 15)

Begge togtypenes topphastighet er $210,0\text{ km/h}$ med en egenvekt på $234\ 000\text{ tonn}$ og med maksimal aksellast lik $16,215\text{ tonn}$. Det er alikvell en liten forskjell på bruttovekt (med full last), der type A har $250,160\text{ tonn}$ mens type B er oppe i $253,920\text{ tonn}$. Det er imidlertid ikke slik at togene alltid er fulle, og her vil rutens faktiske personbefordring mot antall oppsatte avganger nok spille en vel så avgjørende rolle for variasjoner i egenvekt. Denne bruttovektforskjellen på $1,5\%$ kan derfor neglisjeres. Togsettene er krengetog med samme bredde, lengde og høyde. Minste tillatte kurveradius er for begge typer 120 meter og hjuldiameteren for nye hjul er lik 870 mm . (Norske Tog AS, 2020a, Norske Tog AS, 2020b) Hjul fra serie A-togsett bør derfor kunne sammenlignes med hjul fra serie B-togsett uten at togsettene avvikende egenskaper burde medføre en vesentlig forskjell for hjulsitasjen.



Figur 15: Togsett av type 73

Kilde: Mantena

4.4.5 Dempere

Det opereres med samme stivhet på støtdemperene for alle rutene. De er overhalt av Mantena på Grorud, og stivhet testes etter overhaling. Spesifikasjoner og toleransegrenser finnes i tabell 4. Dreiehemningsdemperen er den med særlig betydning for anløpsvinkelen i kurver samt instabilitet i sinusgangen. (Grobe, 2000, s.22)

Beskrivelse	Demping [N] Trykk, strekk	Ved bev. hast. [m/s]	Toleranse kraft	Byttes/ overhales
Støtdemper lateral	4000/2000 ¹	0,1	±15%	Byttes
Dreiehemningsdemper	8000	0,025	±10%	Overhales
Støtdemper vertikal	4000/1000 ¹	0,1	±15%	Byttes
Støtdemper f/primærfjæring ²	9000	0,15	±15%	Byttes

1: Demping varierer med slaglengde iht. eget diagram, 2: Akselkassedemper

Tabell 4: Oversikt over materiellets dempere med toleranseverdier.

Kilde: Mantena

4.4.6 Bremses

Alle togene er utstyrt med de samme bremsesystemene. En oversikt over disse samt hvilke hjul de ulike systemene er tilknyttet finnes i tabell 5, mens fordelingen mellom løpehjul (Lb.) og drivhjul (Mb.) fremkommer av figur 15. Av de ulike bremsene er det kun pussebremsen som bremses med klosser på selve skinnkontaktflaten. Disse virker kun på drivhjulene, og ved anvendelse opptrer en ekstra kontaktflate mot drivhjulsets løpebane hvor materialbortfall kan foregå, hvilket ville påvirke slitasjebildet. Mastearbeidets mål er ikke å undersøke slitasjeeffekten for ulike bremsklosser, men snarere å undersøke materialbortfallet grunnet alminnelig hjul-skinne-kontaktmekanikk.

Pussebremsenes innvirkning representerer derfor en usikkerhet i undersøkelse av sporgeometriens betydning for ”naturlig” hjulslitasje. Ruter med mye stigning og fall, altså ruter som det i utgangspunktet kan forventes en høyere hjulbaneslitasje på som følge av hjul-skinne-kontakten, er også de rutene som man i så fall kan forvente økt slitasje samme sted grunnet pussebremskontakt. Det eventuelle pussebremsbidraget ville dermed gjøre forskjellen i hjulbaneslitasje desto mer fremtredende ved sammenligning av drivhjul fra ulike ruter.

Pussebremsene utgjør kun én av drivhjulenes flere bremsemekanismer, og den yter dessuten svak kraftoverføring da hovedformålet med bremsen kun er å pusse overflaten på hjulene. Det er derfor svært begrenset hvor mye en eventuell slitasje fra pussebremsene kan påvirke hjulbaneslitasjen. Ved hastigheter under 40 km/h er pussebremsen satt til kontinuerlig når det brukes elektrisk brems, mens den ved innbremsing i hastigheter over 40 km/h automatisk settes til i periodiske intervaller: 5 sekunder på og 30 sekunder av. Den kan utenom settes til via en fotpedal som føreren kan aktivere. (Fagekspert hos Mantena, personlig kommunikasjon, 7. juni 2022)

Bremsetype	Løpehjul	Drivhjul
Magnetskinnebremse	X (4 av 5 bogger)	
Nettbremse (gjennom akslingen)		X (alle)
Skivebremse, hjulmontert		X (alle)
Skivebremse, akselmontert	X (alle)	
Pussebremse med klosser på løpebanen		X (alle)

Tabell 5: Oversikt over hvilke hjul som er involvert i de ulike bremsesystemene til et type-73-togsett.

Kilde: Mantena

4.4.7 Hyppighet av full nedbremsing

Teoridelen beskriver hvordan økt hyppighet av stansing fører til et ugunstig behov for positiv som vel som negativ akselerasjon, som begge deler bidrar til ekstra slitasje. To parametere som gir en pekepinn på hyppighet av stopping for rullende materiell er andelen enkeltspor på ruten samt hyppigheten av stasjoner og holdeplasser med ekspedisjon av reisende. Dersom disse forholdene er vesentlig ulike mellom rutene kan de tenkes å utgjøre en forstyrrelse for knytting av slitasje opp mot rutenes sporgeometri.

Ved ekspedisjon av passasjerer er nødvendigheten av full nedbremsing åpnebar. Fjerntogene stopper imidlertid på relativt få stasjoner, og den type stopp har trolig liten betydning for den samlede slitasjen. Ved ferdsel på enkeltspor benytter medgående og motgående materiell felles spor, og der møtene ikke kan legges inn ved en stasjon må et av togene stoppe i et møtespor. Verdier for andel enkeltspor samt antall rutestopp per 100 km for de aktuelle rutene er fremstilt i tabell 6 på bakgrunn av data fra Jernbanedirektoratet (Jernbaneverket, 2016 — Jernbanedirektoratet, 2016 — Jernbanedirektoratet, 2019b — Jernbanedirektoratet, 2019a).

4.4.8 Hastighet

Gjennomsnittlig observert hastighet langs strekningene er en uforutsigbar slitasjeparametere, da hastighetens slitasjepåvirkning ikke nødvendigvis øker proporsjonalt med økende hastighet. Dessuten er kurvene bygget med overhøyde, som også vil være en avgjørende parameter for ukompensert sideakselerasjon i kurver og hjulsatsens tverrforskyvning. En fullgod analyse ville imidlertid være for omfattende og inngår ikke i dette arbeidet. For hver rute undersøkes gjennomsnittlig observert hastighet over traseens lengde for å gi et overordnet inntrykk av ruten og en viss ide om størrelsen på de krefter som overføres. Fremgangsmåten er lik som ved undersøkelse av horisontal- og vertikalkurvatur og gjøres med utgangspunkt i trasédata fra Bane NOR. Verdiene er presentert i tabell 6.

4.4.9 Friksjonsforhold

Som tidligere nevnt har friksjonen mellom hjul og skinne betydning for slitasjen. Friksjonen påvirkes både av *naturlig* og *aktivt besørget* smøring. Naturlig smøring skyldes fuktige værforhold som senker friksjonstallet, mens aktivt besørget smøring vil typiske være skinnesmøring eller flenssmøring. (Jendel og Berg, 2002b, s.234)

Hjulene er avhengig av tilstrekkelig friksjon i kontaktflaten mellom hjulbane og skinnens kjøreflate for overføring av nødvendig trekk- og bremsekraft. I kontaktområdet mellom hjulflens og skinnens styrekant finnes imidlertid ikke dette behovet, og smøring er her et effektivt virkemiddel for reduksjon av den kritiske flensslitasjen. Flenssmøring har derfor en spesielt stor verdi i de krappeste kurvene. Smøringen kan foregå ved skinnesmøring, der et stasjonært system installert i infrastrukturen påfører skinnehodets styrekant et smøremiddel. Per i dag er det imidlertid kun et punkt på det norske nettet der dette praktiseres, hvilket utgjør minimal forskjell mellom de tre rutene. Et alternativ til skinnesmøring er flenssmøring, der smøringsapparatet er påmontert hjulsettets fremste hjulsats. Forstøvet fett som med jevne tidsintervaller sprøytes på hjulflensene vil da løpende overføres til skinnehodets styrekant, slik at også påfølgende aksler opplever en redusert flensfriksjon. (Halland mfl., 2005, s.8, 12, 14–17) Flenssmøring er montert og i bruk på aktuelle togsett på alle tre rutene. Funksjonen sjekkes på et lavt intervall i vedlikeholdsprogrammet, og det må antas at flenssmøring ikke er en avvikende omstendighet mellom rutene.

Det er kjent at værmessige forhold som regn og snøfall også vil bidra til å senke friksjonstallet. (Chen mfl., 2011, s.32) En forsøksstudie av adhesjon mellom hjul og skinne under våte forhold indikerer dessuten at den maksimale friksjonskoeffisientens verdi synker med sykende vanntemperatur. I forsøket reduseres friksjonstallet med omlag 0,015 når vanntemperaturen synker fra 20°C til 5°C, hvilket utgjør en reduksjon på nærmere 40 prosent ved en rullehastighet på 100 km/h. (Chen mfl., 2011, s.34) Både nedbørs- og temperaturforhold er dermed omstendigheter som i større eller mindre grad påvirker friksjonen, og meteorologiske variasjoner mellom rutene vil følgelig kunne utgjøre en forstyrrelse for analysen. Særlig vil dette kunne utgjøre en forskjell for hjulbanen som ikke omfattes av flenssmøringen, og påvirke nødvendig rullehastighet for opprettholdelse av ønsket trekkraft.

Det er store geografiske variasjoner i de årlige nedbørsmengdene. Mens det i kystnære strøk i vest ofte faller en årsnedbør på mer enn 2000 mm, opplever innenlandsstrøkene på Østlandet mindre total nedbørsmengde og dessuten høyere nedbørsintensitet. Også når det kommer til snømengde og varighet av perioden med snødekke er det store geografiske variasjoner. Mens det i kystnære områder i sør og vest sjeldent ligger snø sammenhengende igjennom hele vinteren, så opplever innlandsstrøk moderate snømengder og en lang periode med sammenhengende snødekke. Norge er også et land med relativt store geografiske temperaturvariasjoner. På jernbanestrekninger langs kysten finnes et maritimt klima med milde vintre og begrenset sommerhete. Innenlandsstrøk utsettes for betydelig lavere temperaturer om vinteren og kraftigere varmebølger om sommeren. Ellers vil variasjoner i vind kunne virke inn på slitasjen, men riktignok ikke gjennom påvirkning av friksjonstallet. En vindlast på materiellet kan påvirke nødvendig fremdriftkraft eller hjulsettets tverrforskyvning på sporet og dermed slitasjen. Vindlaster er mest fremtredende nær havet og på høyfjellstrekningene, mens innlandet er betydelig mindre berørt. (Jernbaneverket, 2004, Kap.2 s.3-4) Geografiske meteorologiske variasjoner mellom rutene kan altså virke inn på slitasjen, men det er ukjent i hvilket omfang. Dette bidrar til økt usikkerhet.

4.4.10 Sammendrag av omstendigheter

Omstendigheter ved rutene er sammenlignet i tabell 6. Rutene utviser i stor grad like omstendigheter, særlig på de mest slitasjeinnvirkende områdene, som hjul- og skinnparametere, togsettype og demperstivhet. De aktuelle rutene skulle dermed danne et akseptabelt utgangspunkt for undersøkelsen av sporgeometriens betydning for slitasjen.

	Rute 1	Rute 2	Rute 3A
Hjulprofil	P8A	P8A	P8A
Hjulstål	ER8 ¹	ER8 ¹	ER8 ¹
Sporvidde	1435 mm	1435 mm	1435 mm
Skinnehelning	1:20	1:20	1:20
Skinneprofil	49E1 (54E3)	49E1 (60E1)	54E3
Skinnestål	R269Mn (R260Mn)	R269Mn (R260Mn)	R260Mn
$\Delta r(u_y)$ -funksjonen ²	P8A-49E1 ³	P8A-49E1 ³	P8A-49E1 ³
Type73-serie	A	A	B
Dreiehemningsdemperstivhet [N]	8000 ± 10%	8000 ± 10%	8000 ± 10%
Andel enkeltspor	90 %	90 %	54 %
Antall rutestopp⁴ per 100 km	4,9	3,2	5,8
Gjennomsnittlig hastighet⁵	92 km/h	104 km/h	93 km/h

1: Excellent fra Bochumer Verein Verkehrstechnik, **2:** ved nytilstand for både hjul og skinne, **3:** tilsvarer hjul-skinneparringen P8A-49E1 med skinnehelning 1:20, **4:** Stasjoner/holdeplasser hvor toget ekspederer reisende, **5:** Beskriver den gjennomsnittlige hastigheten man ville måle på et tog på ruten hvis målepunktene var fordelt jevnt over traséen

Tabell 6: Samlet oversikt over omstendigheter for hver rute.

5 Resultater

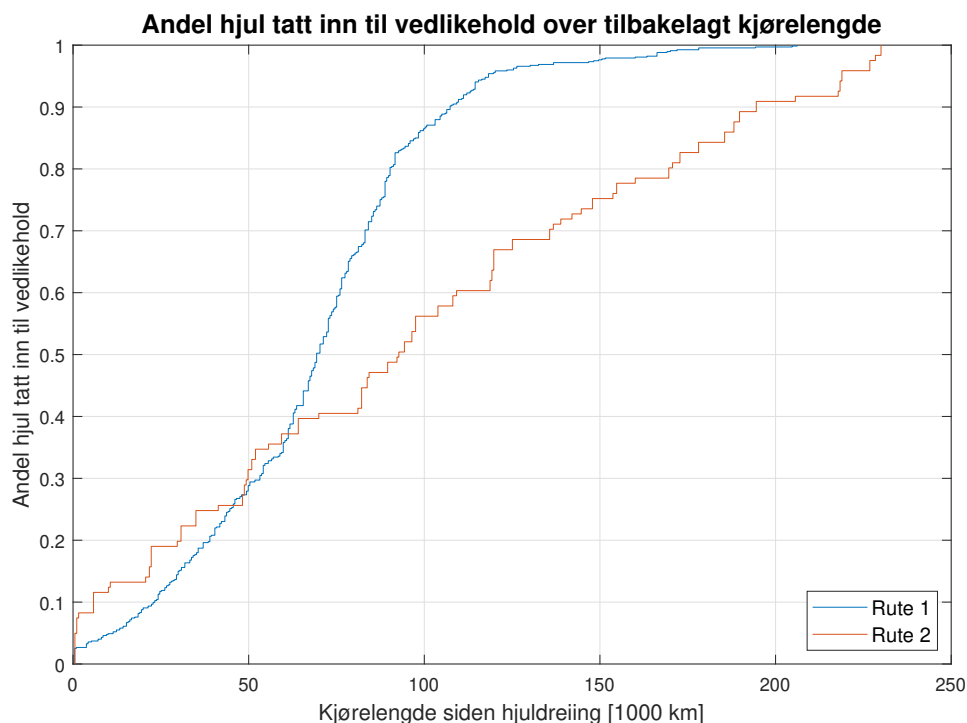
5.1 Vedlikeholdsintervaller

Tabell 7 viser resultatene av MATLAB-analysen av vedlikeholdsintervaller for rutene. Verdiene i kursiv er beregnet ut i fra rådatagrunnlaget, mens øvrige verdier er oppgitt fra Mantena. Opplysninger om daglig kjørelengde er av konkurransehensyn ikke oppgitt eksakt i tabellen, men rundet av til nærmeste hele tjuedefemte kilometer. For rute 3A er kun tre vedlikeholdsintervaller detektert gjennom analysen, og grunnlaget for et troverdig vedlikeholdsavstandsestimat mangler. I stede er verdien 140 000 km brukt, som i likhet med verdiene på daglig kjørelengde bygger på ekstern loggføring. En troverdig fremstilling av slitasjeutviklingen til de ulike målarter er heller ikke mulig for rute 3A, da analysen avdekker at datagrunnlaget er for magert.

	Rute 1	Rute 2	Rute 3A
Gj. daglig kjørelengde	ca 475 km	ca 525 km	ca 525 km
Antall detekterte vedl.int. i rådata	673	121	3
Gj. vedlikeholdstidsintervall	ca 145 dg.	ca 185 dg.	-
Gj. vedlikeholdsavstandsintervall	68 026 km	97 660 km	140 000 km
Standardavvik	34 063 km	68 568 km	-
1. kvartil, $x_{25\%}$	44 650 km	39 750 km	-

Tabell 7: Statistiske nøkkelverdier for vedlikeholdsintervall

Med et gjennomsnitt på omlag 140 000 tilbakelagte kilometer går hjulene på rute 3A omtrent dobbelt så langt som hjulene på rute 1 før de tas inn til reprofilerings. Samtidig går rute-3A-hjulene i snitt mer enn 40 % lenger enn hjulene på rute 2.



Figur 16: Kumulativ fordeling for andelen hjul som er tatt inn til reprofilerings over økende tilbakelagt kjørelengde.

Figur 16 gir et mer detaljert bilde av kjørelengden hjulene på rute 1 og rute 2 har tilbakelagt når de tas inn til vedlikehold. Det er påfallende at rute 2 har en lineær trend, der gradvis flere hjul tas inn til vedlikehold etter hvert som kjørelengden øker gjennom hele intervallet. På rute 1 derimot tas brått en større andel hjulsatser inn til vedlikehold etter omkring 68 000 kilometer, som er det gjennomsnittlige vedlikeholdsintervallet. Dette fremkommer også ved betraktning av standardavviket, som for rute 2 er nærmere 69 000 km, mens det for rute 1 er nede på knapt 34 000 km.

5.2 Horisontalgeometri

Rutenes horisontalkurvefordeling er presentert på tallform i tabell 8 og visuelt i figur 17. Kjørelengden et hjul på ruten tilbakelegger på ulike kurveradier før reprofilerings er fremstilt i tabell 9, mens en visuell fremstilling av dette er å finne i appendiks A.

Rutenes horisontalkurvefordeling

<i>Radius</i>	Rute 1	Rute 2	Rute 3A
< 200m	0,0	0,0	0,0
200 - 299m	2,1	4,2	4,0
300 - 399m	13,3	5,5	7,0
400 - 499m	7,2	4,8	4,8
500 - 599m	6,1	4,2	2,6
600 - 799m	6,9	6,3	7,2
800 - 999m	5,1	4,1	4,4
1000 - 1499m	8,2	11,2	7,9
≥ 1500m	22,5	34,1	33,9
Rettlinje	28,6	25,6	28,1

Tabell 8: Andel av hver rute innenfor de ulike horisontalkurve-radiusintervaller i prosent.

Kjørelengde før reprofilerings fordelt over horisontalkurvatur

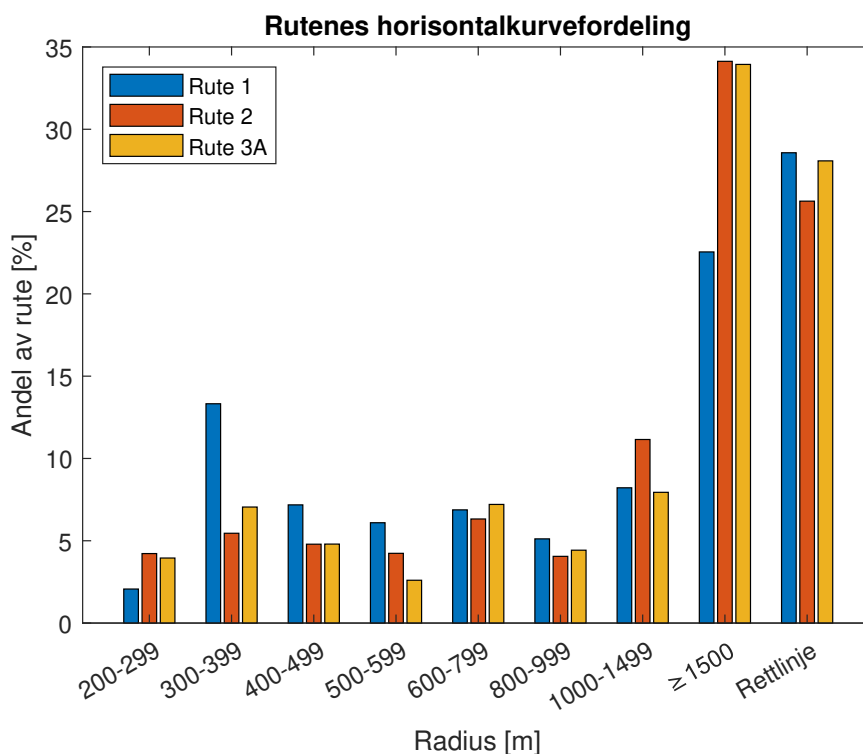
<i>Radius</i>	Rute 1	Rute 2	Rute 3A
< 200m	0,00	0,01	0,01
200 - 299m	1,41	4,12	5,53
300 - 399m	9,06	5,33	9,87
400 - 499m	4,88	4,68	6,72
500 - 599m	4,15	4,14	3,64
600 - 799m	4,68	6,18	10,09
800 - 999m	3,48	3,96	6,20
1000 - 1499m	5,59	10,89	11,12
≥ 1500m	15,34	33,34	47,52
Rettlinje	19,44	25,04	39,32
Totalt	68,02	97,68	140,0

Tabell 9: Gjennomsnittlig tilbakelagte horisontalkurveavstander mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.

Det er påfallende at rute 1 utviser en betydelig høyere andel kurver med radius 300-399m enn de andre rutene. Mens rute 1 sin andel innenfor intervallet er på 13,3 %, så ligger andelen på henholdsvis 5,5 % og 7,0 % for rutene 2 og 3A. Også innenfor intervallet 400-499m har rute 1 størst ruteandel. Mens rutene 2 og 3A her er jevnstore på 4,8 %, så er rute 1 sin andel 1,5 ganger så stor. En undersøkelse av neste kurveradiusintervall, med kurveradius 500-599m, bekrefter at rute 1 med sine 6,1 % er størst også her. Deretter følger rute 2 med 4,2 % mens rute 3A kun har 2,6 % av sin rute innenfor intervallet. I det aller minste kurvesegmentet, med kurveradius lavere

enn 300m, så har rute 1 imidlertid en lavere representasjon, tilsvarende 2,1 % av egen rute. Rutene 2 og 3A er her jevnstore med hhv. 4,2 % og 4,0 %.

Ved sammenslåing av flere intervaller til større enheter vil det være mulig å oppnå et mer overordnet bilde av horisontalkurvefordelingen. Hele 29 % av rute 1 faller da inn under kategorien små kurver ($R < 600m$), sammenlignet med 19 % av rute 2 og 18 % av rute 3A. Innenfor mellomstore kurver ($600m \leq R < 1000m$) henhører 12 % av rute 1, 10 % av rute 2 og 12 % av rute 3. Her er rutene altså ganske jevnstore. Inn under store kurver eller rettlinje ($R \geq 1000m$) henhører henholdsvis 71 % og 70 % av rutene 2 og 3A, mens kun 59 % av rute 1 ligger i dette området.



Figur 17: Andel av hver rute innenfor de ulike horisontalkurve radiusintervaller i prosent.

Betraktes kjørelengde tilbakelagt ved reprofiling er det hjulene på rute 3A som har tilbakelagt størst distanse på små kurveradier, med sine 25 800 km. Deretter følger rute 1 sine hjul med 19 500 km etterfulgt av rute 2 med 14 200 km. Også på mellomstore kurveradier er det rute 3A sine hjul, med 16 300 km, som har kjørt lengst ved reprofiling. Deretter følger rute 2 med 10 100 km og rute 1 med 8 200 km. På de større kurveradiene følger rutene samme rekkefølge, med 98 000 km på rute 3A, 69 300 km på rute 2 og 40 400 km på rute 1.

5.3 Vertikalgeometri

Rutenes vertikalgeometriske fordeling er presentert på tallform i tabell 10 og visuelt i figur 18. Kjørelengden et hjul på ruten tilbakelegger på ulike stigningsgrader før reprofiling er fremstilt i tabell 11, mens en visuell fremstilling er å finne i appendiks A.

Det er påfallende at rute 3A har en svært lav representasjon av brattere stigninger. I den bratteste kategorien, med stigninger høyere enn 20 ‰, er rute 1 dominant med 7,5 % av ruten. Deretter følger rute 3A med 2,2 % og rute 2 med 0,3 %. Innenfor intervallene 15,0-17,4 og 17,5-19,9 promille er rute 3A sin representasjon nærmest fraværende, med 0,1 % av ruten i hvert av dem. Representasjonen for de to øvrige rutene er her rundt 10 % for det slakeste av de to intervallene, og 6 % for det bratteste. Ved samling av alle de bratteste intervallene i en større gruppe som beskriver ruteandelen med høyere stigning enn 12,5 promille kommer forskjellene enda tydeligere frem. $\frac{1}{4}$ av rute 2 vil

falle inn under denne kategorien og mer enn $\frac{1}{3}$ av rute 1. For rute 3A sitt vedkommende faller imidlertid bare 4,4 % av ruten inn under samlekategorien.

Når det kommer til kjørelengde tilbakelagt ved reprofilerings er tendensen at rute 3A vokser til å bli den dominante ruten i mellomstore stigninger. Mens hjulene på rute 3A tilbakelegger 43 000 km med stigning 7,5-9,9 promille, så tilbakelegger rute-2-hjulene 8 000 km og rute 1 sine hjul i snitt 6 000 km.

Rutenes vertikalgeometriske fordeling

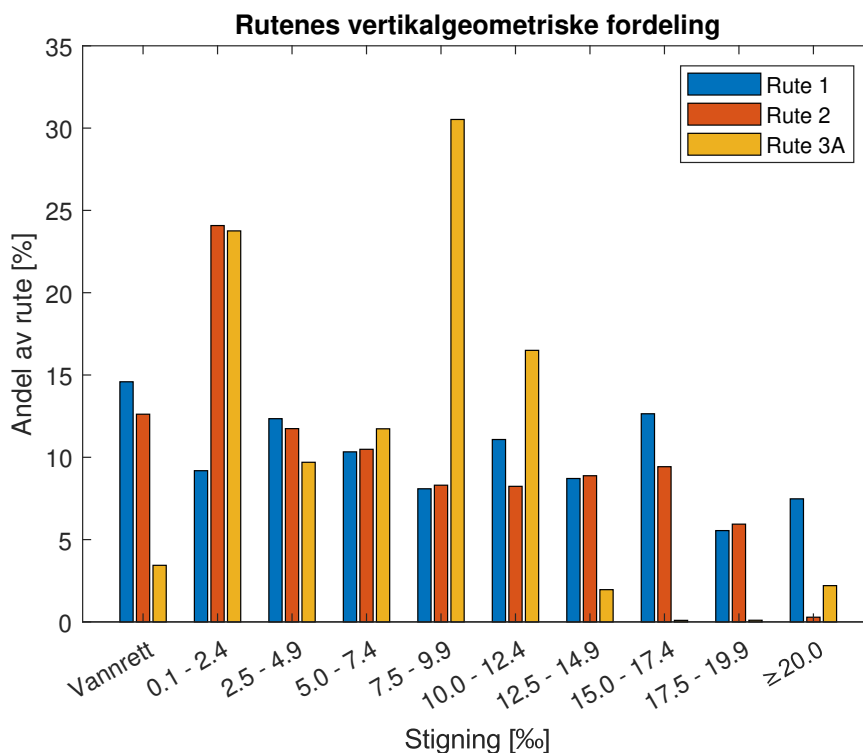
<i>Stigning</i>	Rute 1	Rute 2	Rute 3A
Vannrett	14,6	12,6	3,4
0,1 - 2,4 ‰	9,2	24,1	23,8
2,5 - 4,9 ‰	12,3	11,7	9,7
5,0 - 7,4 ‰	10,3	10,5	11,7
7,5 - 9,9 ‰	8,1	8,3	30,5
10 - 12,4 ‰	11,1	8,2	16,5
12,5 - 14,9 ‰	8,7	8,9	2,0
15,0 - 17,4 ‰	12,6	9,4	0,1
17,5 - 19,9 ‰	5,5	5,9	0,1
≥ 20 ‰	7,5	0,3	2,2

Tabell 10: Andel av hver rute innenfor de ulike stigningsintervaller i prosent.

Kjørelengde før reprofilerings fordelt over vertikalgeometri

<i>Stigning</i>	Rute 1	Rute 2	Rute 3A
Vannrett	9,92	12,33	4,81
0,1 - 2,4 ‰	6,25	23,52	33,26
2,5 - 4,9 ‰	8,40	11,47	13,58
5,0 - 7,4 ‰	7,03	10,24	16,43
7,5 - 9,9 ‰	5,50	8,11	42,74
10 - 12,4 ‰	7,54	8,05	23,10
12,5 - 14,9 ‰	5,93	8,67	2,74
15,0 - 17,4 ‰	8,60	9,21	0,13
17,5 - 19,9 ‰	3,77	5,80	0,14
≥ 20 ‰	5,09	0,28	3,08
Totalt	68,02	97,68	140,0

Tabell 11: Gjennomsnittlig tilbakelagt avstand med stigning mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.



Figur 18: Andel av hver rute innenfor de ulike stigningsintervaller i prosent.

5.4 Hjulslitasje

Oversikt over rutenes analysegrunnlag for den enkelte mållart finnes i tabell 12. På bakgrunn av disse er hjulslitasjens utvikling beskrevet ved interpolasjon i form av et tredjegradspolynom for hver mållart. Polynomene er fremstilt i tabell 13 med fire desimalers nøyaktighet, og i appendiks C med ti desimalers nøyaktighet. I figurene 19 - 22 og i appendiks B er polynomene fremstilt grafisk.

Antall målinger i analysegrunnlag

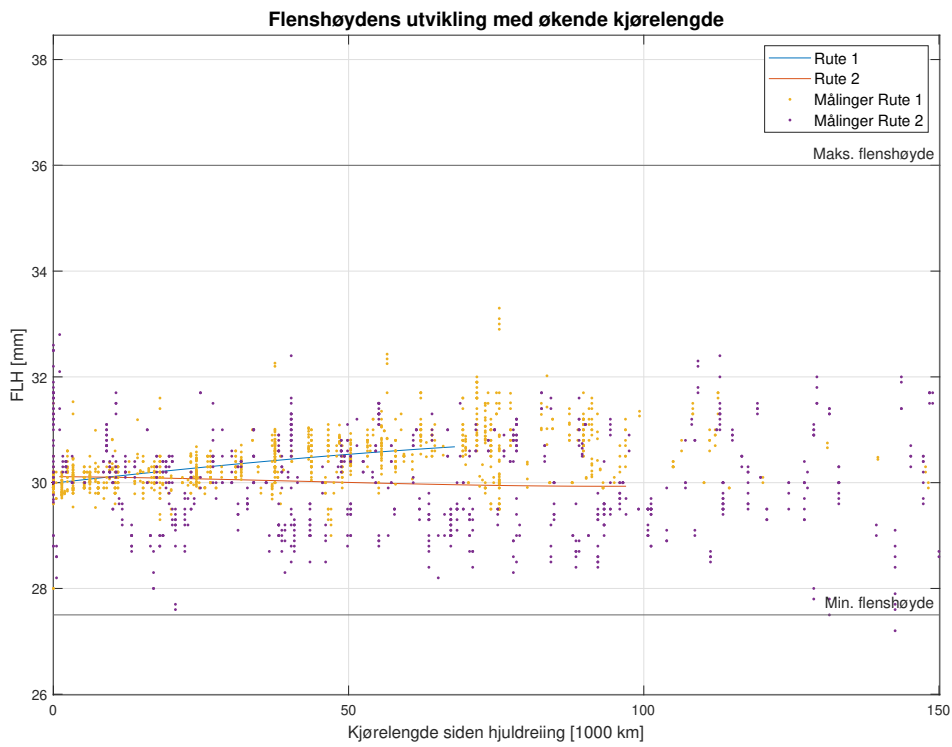
Målltype	Rute 1	Rute 2
FLT	2 633	1 322
FLH	2 634	1 322
QR	2 633	1 292
ΔDIA	1 928	1 155

Tabell 12: Oversikt over mengdene av målinger som utgjør estimeringsgrunnlaget for polynomene i tabell 13.

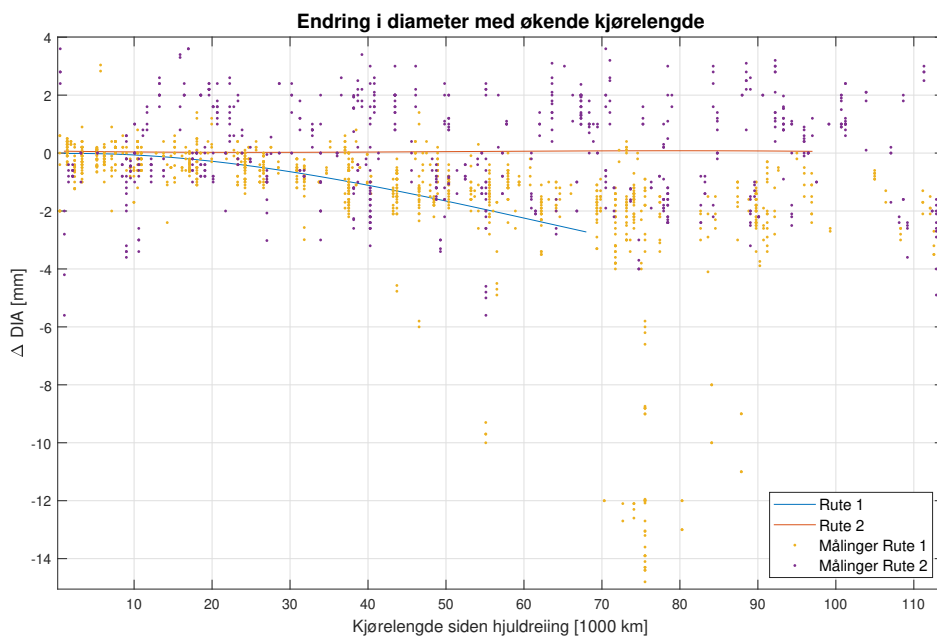
Estimat på slitasjeutvikling på polynomform

Mållart	Rute 1	Rute 2
FLT [mm]	$FLT_1(x) = 0,0007x^2 - 0,0667x + 29,94$	$FLT_2(x) = 0,0001x^2 - 0,0089x + 29,85$
FLH [mm]	$FLH_1(x) = 0,0126x + 29,99$	$FLH_2(x) = -0,0008x + 30,11$
QR [mm]	$QR_1(x) = 0,0008x^2 - 0,0752x + 11,99$	$QR_2(x) = 0,0002x^2 - 0,0273x + 11,81$
ΔDIA [mm]	$\Delta DIA_1(x) = -0,0010x^2 + 0,0053x - 0,020$	$\Delta DIA_2(x) = 0,0001x - 0,0040x + 0,069$
Definisjons- område	$x \in [0, 68, 0]$	$x \in [0, 97, 7]$

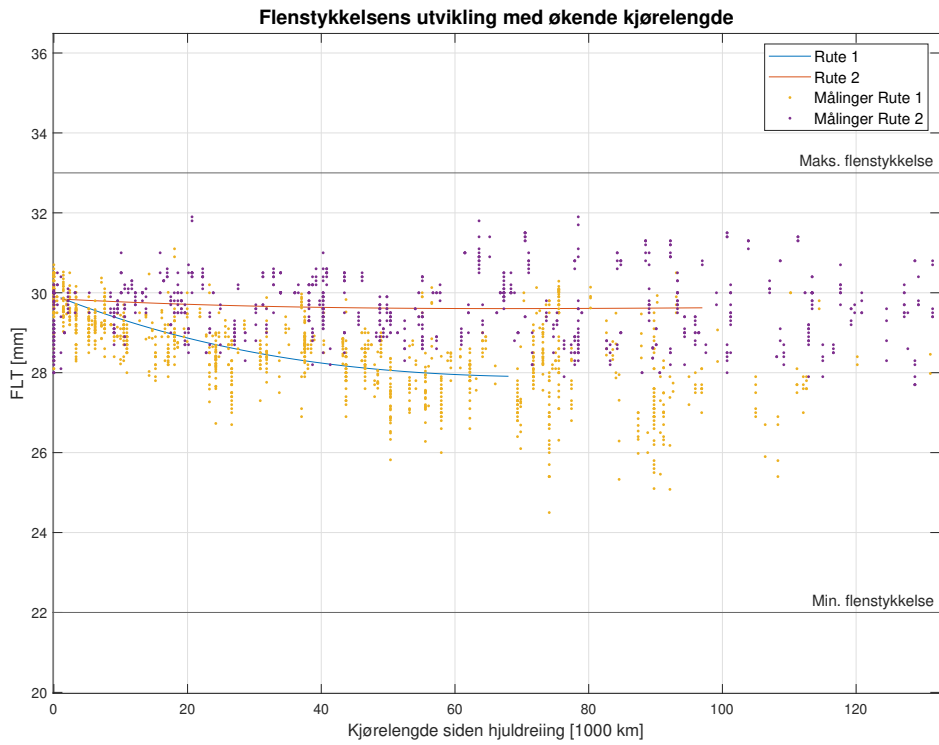
Tabell 13: Matematisk beskrivelse av mållartenes verdi som funksjon av kjørelengde, der x er antall tusen kilometer siden forrige hjuldreining.



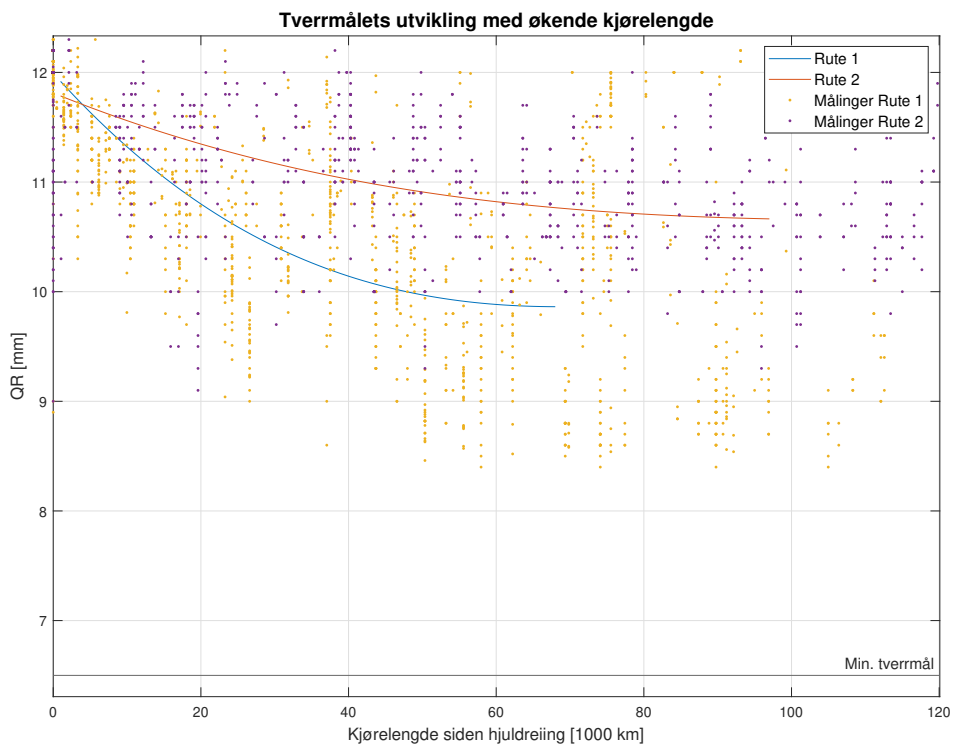
Figur 19: Måledata på flenshøyde sett i forhold til grenseverdiene i *Trykk 741.1.2*.



Figur 20: Måledata på hjuldiameterendring fra forrige reprofiling.



Figur 21: Måledata på flenstykkelsett i forhold til grenseverdiene i *Trykk 741.1.2*.



Figur 22: Måledata på tverrmål sett i forhold til grenseverdien i *Trykk 741.1.2*.

6 Diskusjon

6.1 Kommentarer til målinger og usikkerhet

6.1.1 Spredning i hjuldata

Ved inspeksjon av analyseresultatene registreres en stor spredning i måleverdier. Gjennomsnittlig vedlikeholdsintervall har for rute 1 og 2 et standardavvik på hhv. 34 000 km og 69 000 km, og visuell undersøkelse av slitasjegrafene bekrefter stor spredning også i slitasjeverdier. Faktorer som bidrar til stor spredning også innenfor samme rute kan være:

- drivhjul/løpehjul
- hjulposisjon på vogn og togsett
- forskjell i starthjuldiameter, D_0
- måleusikkerhet
- feilregistrering av reprofilerings
- avvik i daglig kjørelengde
- sesong- og årsvariasjoner i værforhold
- infrastrukturens varierende slitasjetilstand

I tillegg til at drivhjul har høyere relativhastighet mot skinnen ved fremdrift, så har drivhjul og løpehjul også ulike bremsesystemer som yter ulik bremskraft til ulike tider. Andelen undersøkte drivhjul og løpehjul antas imidlertid å være lik for begge rutene, ettersom andelen drivhjul og løpehjul som trafikkerer de to rutene er lik. Det samme gjelder for hjulets posisjon på vogn og togsett. Dermed vil fremdeles gjennomsnittsverdien og interpolasjonen for hver av rutene skape et representativt bilde, og et godt sammenligningsgrunnlag for å sette rutene opp mot hverandre.

Etttersom et hjul starter nytt målingsintervall ved reprofilerings så vil startverdien på hjuldiameter, D_0 , variere for hvert vedlikeholdsintervall, og dermed for hvert målepunkt i den grafiske fremstillingen. Dette vil kunne påvirke slitasjeutviklingen, både fordi det har innvirkning på kontaktmekanikken og opptredende krefter, men også fordi et hjul med større hjuldiameter vil ha en større flate å fordele slitasjen på og dermed slites ned tregere. Ettersom D_0 ved nyutskriftet hjulprofil er 870 mm for de to rutene og begge rutene har samme grenseverdier for reprofilerings så antas allikevel at fordelingen av startdiametere blir tilnærmet lik for de to rutene når antall målinger går mot uendelig eller blir tilstrekkelig høyt. Antallet detekterte vedlikeholdsintervaller som inngår i beregningen er fremstilt i tabell 7. Antallene 673 for rute 1 og 121 for rute 2 antas å være tilstrekkelig høyt for at vedlikeholdsintervallene og de interpolerte polynomene for de to rutene er representative.

Når det kommer til måleusikkerhet antas at de målte verdiene er normalfordelt om den faktiske verdien og at det dermed er like stort bidrag til for høye målinger som til for lave målinger når antallet målinger går mot uendelig. Også hvis dette ikke skulle være tilfellet vil rutene fremdeles være høvelig sammenlignbare med hverandre, hvis man antar at målingene gjennomføres likt for begge ruter slik at feilmålingenes skjeve bidrag påvirker begge ruter i lik retning. Verdt å bemerke er også at en måleusikkerhet på mindre enn 0,1 mm og 0,01 mm som de digitale målapparatene skilter med knapt vil være synlig ved betraktning av enkeltpunktene i diagrammene (figur 19 - 22), og ikke merkbart i det hele tatt når verdier er avrundet. For målinger gjort med den manuelle læra med avlesning på 0,5 millimeter vil unøyaktigheten derimot ha utslag på diagrammene. Det er imidlertid vanskelig å detektere noen utpreget bord av målinger på y-verdiene for halve millimeter, og det antas at målinger gjort med læra ikke er av en overveldene mengde.

Som beskrevet er tilgjengelige målinger opprinnelig ikke merket med noe tidspunkt siden forrige reprofilerings, og avstandsberegningen bygger på detektering av sist reprofilerings gjennom en analyse.

Dersom en kontroll feilaktig er blitt registrert som en kontroll med hjuldreiing, men det aldri fant sted noen hjuldreiing da vil dette ha direkte utslag på kilometerverdien ved senere målinger for denne hjulsatsen. Det samme gjelder dersom det gjennomføres hjuldreiing på en kontroll, men dette ikke fanges opp og registreres. Kontrollene for alle rutene har gjennomgått samme utvelgelseskriterier ved registrering av hjuldreiing. Et annet forhold som vil gi lokale avvik på kilometerverdiene til en hjulsats er dessuten antagelsen om en konstant daglig kjørelengde for en rutes hjulsatser. Dersom en hjulsats for eksempel skulle bli tatt ut av drift en uke vil den fremdeles få tillagt kjøreavstand for denne uken i analysen, hvilket vil gi et avvik i resultatene.

Avslutningsvis kan det være verdt å bemerke at grunnet avrunding så vil trolig en del punkter i diagrammene havne oppå hverandre, slik at bare det ytterste av dem er synlig. Et punkt forteller altså bare at minst ett mål er registrert med den angitte måleverdi på angitt avstand, men ikke noe om hvor mange. Sånn sett er diagrammene mangelfulle da de kan gi et feilinntrykk av hvor den store vekten av målinger er sentrert, og det kan dessuten oppfattes som at spredningen er større enn det den er. Polynomene tar imidlertid hensyn til samtlige måleverdier, også de "skjulte", og polynomene kan derfor gi en riktigere beskrivelse av hvor tyngdepunktet av målingene ligger. At det foreligger en betydelig spredning i måleverdier kommer man likvel ikke bort i fra. Til tross for stor spredning i data ansees det slitasjebilde som polynomene beskriver å være troverdig, ettersom spredningen kan forklares i avvikende omstendigheter og det totale antallet målinger er såpass høyt og gjort over et såpass langt tidsrom for begge ruter.

6.1.2 Polynomenes avbøying

Hjulslitasjefrafene finnes forstørret i appendiks B. I det videre betegnes de strekningsderiverte av mållartene som slitasjehastigheter, selv om disse ikke nødvendigvis gjenspeiler hvor mye materiale som blir fjernet fra det aktuelle området på hjulet per lengdeenhet. En interessant bemerkning er hvordan mållartene knyttet til flensslitasje bøyer av. Mens diameterendring og flenshøyde utvikler seg nokså lineært, så utviser polynomene for flenstykkelse og tverrmål krumming helt ut til gjennomsnittsverdi for dreining. Mulige årsaker kan være en form for geometrisk likevekt, at observasjonsområdet for undersøkelsen er flytende eller forklaringen kan være en kombinasjon av disse eller andre årsaker.

Flytende observasjonsområde: I forsøket observeres ikke en konstant mengde hjul. Området som undersøkes er derimot flytende, og antallet hjulsett minker med økende kjørelengde som illustrert i figur 16. Dette innebærer at en endring i gjennomsnittsverdien kan finne sted selv når verdiene av hver enkelt måling holdes konstant, ettersom målinger gradvis forsvinner ut av forsøket. En mulig forklaring på at grafene tenderer til å bøye av med vannrett kan derfor være at de særlig slitasjeutsatte eller "svake" hjulene tas ut av forsøket etter hvert som krav ikke lenger tilfredsstilles. Mange hjul reprofileres grunnet overflatefeil, men dersom både slitasjebredelsen og utbredelsen av overflatefeil avhenger av sporgeometrien, eller avhenger av en hvilken som helst annen parameter som fører til en korrelasjon mellom de to, så vil gjennomsnittet av hjul som tas ut av forsøket være mer slitt enn et gjennomsnittshjul i forsøket på tidspunktet hjulet tas ut.

Med økende kjørelengde sitter man da igjen med en større og større andel av de "sterkeste" hjulene. I et reelt forsøk ville de dårlige hjulene ikke bli fjernet fra forsøket underveis, men bidratt med flere, enda dårligere målinger senere. Dersom disse tas ut blir forsøket gradvis manipulert etter hvert som flere og flere særlig slitasjeutsatte hjul tas ut. Av nevnt årsak er grafene kuttet der rutene når sin gjennomsnittsverdi for dreining, i fare for at hjulene etter dette i liten grad representerer et gjennomsnittshjul på ruten.

Geometrisk likevekt: Grafene gir inntrykk av at slitasjehastighetene til flenstykkelse og tverrmål avtar med økende kjørelengde og går mot null samtidig som de to mållartene går mot en konstant verdi. Grafene for flenstykkelse later til å ha en horisontal asymptote omkring $FLT_1 = 27,8$ mm for rute 1 og $FLT_2 = 29,6$ mm for rute 2. Grafene for tverrmål later på sin side til å ha en horisontal asymptote omkring $QR_1 = 9,8$ mm for rute 1 og $QR_2 = 10,6$ mm for rute 2. Dette kan tyde på at hjulprofilene blir slitt ned mot en slags geometrisk likevekt. En tolkning vil dermed være at profilene etter en tilstrekkelig kjørelengde vil nå en tilstand der slitasjen forgår jevnt over profilet, sånn som for en slitasje-tilpasset profil allerede ved nyttilstand. (Norges Statsbaner, 1983, s.19) På

samme vis som for en slitasjeprofil så fortsetter diameteren å minke og flenshøyden å øke med slitasjen, mens kontaktflaten angivelig opprettholder samme overflatefasong.

En vid, multinasjonal undersøkelse gjennomført av Zacher mfl., 2015 styrker antagelsen om en geometrisk likevekt. Etter analyse av mer en 14 millioner hjulprofiler ble det i forsøket fastslått at hjulenes konisitet ikke økte i det uendelige, men nådde en metningsverdi etter et bestemt kilometerløp. Hvilken geometri denne likevekten har later til å avhenge av blant annet sporgeometrien, ettersom rute 1 og rute 2 sine flensslitasjemålarter tilnærmer seg ulike verdier. I så fall kan det se ut som om P8A-profilen er et tilnærmet slitasjeprofil for rute 2, altså at det er slitasje-tilpasset allerede ved nyttilstand. Denne påstanden forklares med bakgrunn i at gjennomsnittet av rutens flenstykkelsen knapt viser noen endring for profilen fra det tas i bruk, og at tverrmålet heller ikke synker voldsomt før det finner sin likevektsverdi. Allerede i 1983 var det konstatert at ekvivalent konisitet etter stort kilometerløp vil stabilisere seg i området 0,2-0,3 og at denne verdien ville avhenge av banesystemets kurvatur. (Norges Statsbaner, 1983, s.19) P8A-profilen er som nevnt i innledningskapittelet utformet i Storbritannia med mål om en lav slitasje ved britiske forhold. Det kunne dermed være interessant å sammenligne sporgeometrien på rute 2 med en typisk britisk sporgeometri for å se om det er noe samsvar, ettersom profilens opptreden tilnærmet er slitasjetilpasset i begge tilfeller.

Konklusjon avbøying: Dersom forklaringen på avbøyingen alene skulle være flytende observasjonsområde er det vanskelig å forklare hvorfor hjulbaneslitasjen fortsetter med samme hastighet mens flensslitasjemålarterne er konstante. Dette måtte i så fall innebære at det kun eksisterer en korrelasjon mellom flensslitasje og mengden overflatefeil men ikke mellom hjulbaneslitasje og overflatefeil. Dette er selvsagt mulig, da materialutfall ofte forekommer på ytre kant av hjulet, som kun er i kontakt med skinne i kurver når motsatt hjul har flenskontakt. En korrelasjon mellom flensslitasje og mengden overflatefeil skal derfor ikke avskrives. En overvekt av hjul med høy flensslitasjhastighet ville da bli tatt ut av forsøket mens hjulbaneslitasjhastigheten på hjulene som fjernes fremdeles kunne gjenspeile gjennomsnittet av de resterende hjul. Det er likevel vanskelig å tenke seg at innvirkningen av denne manipuleringen av observasjonsområdet skulle gi et så ekstremt utslag at kurvene etterhvert beskriver en flensslitasjhastighet lik null. Det antas derfor at polynomenes utvikling i stor grad er reelle for et gjennomsnittshjul på rutene og at de beskriver en slags geometrisk likevekt der slitasjetilpassede egenskaper etterhvert oppnås.

6.1.3 Slitasjhastighet

Det at grunnlaget som observeres i forsøket i praksis er i kontinuerlig ending, som beskrevet i avsnittet om flytende observasjonsområde, gjør bestemmelse av slitasjhastigheter utfordrende. Det kan tenkes at det sikreste estimatet på momentan slitasjhastighet for den enkelte målar, altså endring i målarverdi per endring i kjørelengde, oppnås ved å undersøke grafenes stigningstall i det tidligste området. Det kan antas at polynomene i tilstrekkelig grad beskriver et gjennomsnittshjul på ruten helt frem til de 25 % svakeste hjulene på strekningen er tatt ut av forsøket. Hver rute vil ha en x -verdi, $x_{25\%}$, som beskriver den avstanden der de 25 % svakeste hjulene er fjernet, også kalt 25-persentil eller 1. kvartil. Denne avstanden fremkommer av tabell 7, og utgjør for rute 1: $x_{1,25\%} = 44\,650$ km, og for rute 2: $x_{2,25\%} = 39\,750$ km.

Området $x < x_{25\%}$ vil dessuten ha et høyt antall målinger som bidrar til å begrense usikkerheten, samtidig som området kan antas å være representativt for et gjennomsnittshjul. Dessuten fremkommer av figur 16 at det i starten er ganske få hjul som tas ut per kilometer også på rute 1, hvilket begrenser den mulig effekten av flytende observasjonsområde. For hvert av polynomene innehar den andrederiverte samme fortegn i hele dette intervallet, og på bakgrunn av dette antas at stigningstallet til polynomet midt i intervallet gir en brukbar beskrivelse av slitasjhastigheten i intervallet. Bruker derfor måltypens stigningstall midt i intervallet, altså i verdien $x_{n,25\%/2}$, som et relativt sikkert mål på slitasjhastigheten til nylig reprofilerede hjulprofiler. På bakgrunn av dette er slitasjhastigheter for hver målar på de to rutene beregnet. Beregningene finnes i appendiks C og resultatene er presentert i tabell 14. Verdiene i tabellen burde gi et brukbart bilde av slitasjhastighetene til et gjennomsnittshjul etter ca 20 000 kilometer, men er trolig lite representative for betydelig nedslitte hjulprofiler.

Slitasjehastigheter for nyprofiler

<i>Målar</i>	Rute 1	Rute 2
$d(\text{FLT})/dx$	-39,0 mm/10 ⁶ km	-5,3 mm/10 ⁶ km
$d(\text{FLH})/dx$	11,2 mm/10 ⁶ km	-2,2 mm/10 ⁶ km
$d(\text{QR})/dx$	-42,1 mm/10 ⁶ km	-19,5 mm/10 ⁶ km
$d(\Delta\text{DIA})/dx$	-32,6 mm/10 ⁶ km	-0,6 mm/10 ⁶ km

Tabell 14: Gjennomsnittlig bilde av den momentane endringen i målarverdi per millionte tilbakelagte kilometer for nyprofiler.

6.2 Avstandsfordeling over ulike sporgeometrier

6.2.1 Introduksjon

I dette delkapittelet legges beregningene av tilbakelagt kjørelengde på de ulike geometrier ved reprofileringsgrunn for drøfting av hvorvidt sporgeometriske trekk kan ha innvirkning på vedlikeholdsintervall til et jernbanehjul. Diskusjonen tar utgangspunkt i tabellene 9 og 11, med tilhørende stolpediagram i appendiks A. Både rute 1, 2 og 3A inngår i sammenligningsgrunnlaget. Det som er felles for alle rutenes fordelinger er at de ulike avstandssammensetningene av geometrier akkurat har brakt hjulet i en tilstand der det ikke lenger kan brukes. I hvilken grad dette skyldes slitasje og i hvilken grad det skyldes overflatefeil kan ikke avgjøres ut fra dataen i tabellene, og i dette delkapittelet undersøkes sporgeometrifordelingens helhetlige innvirkning på vedlikeholdsintervall.

En summering av avstandene tilbakelagt på de ulike geometrier forteller at rute 1 sin sammensetting gir et vedlikeholdsintervall på ca 68 000 km, rute 2 sin sammensetning gir ca 98 000 km, mens geometrisammensetningen på rute 3A tillater hjulene å gå 140 000 km før de må tas inn til vedlikehold. Det er dermed et stort spenn mellom rutene, og rute 3A sin hjul tilbakelagte i snitt dobbelt så lang totalavstand som rute 1 sine før de tas inn til reprofileringsgrunn. Noe som kompliserer den videre drøftingen er at både horisontal- og vertikolgeometri varierer mellom alle rutene, hvilket vanskeliggjør bestemmelse av hvilket geometrisk trekk som bidrar med hvilket utslag på vedlikeholdsintervall. Med en helt åpen tilnærming til problemet består dessuten også muligheten for at vedlikeholdsintervallene er uavhengige av sporgeometri, og at forskjellene i vedlikeholdsintervall alene skyldes andre momenter. Dette er vanskeligere å avdekke, da dette kan være tilfellet ved hvilke som helst fordeling av sporgeometri. Et manglende mønster mellom sporgeometri og vedlikeholdsintervall på tvers av rutene ville likvill kunne være en indikasjon på uavhengighet.

6.2.2 Horisontalgeometrisk betraktning

En mulig fremgangsmåte vil være å først ta utgangspunkt i horisontalkurvaturen isolert sett. Her innstiller rutene seg på en relativt lik tilbakelagt avstand i hele området for mindre kurveradier. Den samlede hjulslitasjen fra små og mellomstore kurver må altså antas å være ganske lik for alle rutene. Samtidig observeres en markant forskjell i tilbakelagt avstand på større kurver og rettlinj. Dersom hjulslitasje finner sted på rettere partier, så må det antas at det samlede slitasjebidraget herifra er vesentlig høyere for rute 2 og særlig for rute 3A, enn for rute 1. I så fall ville hjulene på rute 3A være i en dårligere forfatning enn de andre hjulene ved reprofileringsgrunn, og forbeholdt at slitasjen ved reprofileringsgrunn er lik må altså kjøring i større kurver og på rettlinj ha neglisjerbar innvirkning på et hjuls slitasjebilde. Det ville bety at vedlikeholdsintervallene alene innstiller seg etter tilbakelagt avstand i mindre kurveintervaller. Intervallene ville altså instille seg slik at hjulene tilbakelagte en likest mulig avstand på små kurver før reprofileringsgrunn finner sted, nærmest uavhengig av avstandene som følgelig må tilbakelagte på større radier. De større kurvene tjener eventuelt som svake vektlodd der store utslag vil kunne veie opp for små forskjeller i det minste kurveområdet. Det kan imidlertid observeres at rute 3A sin tilbakelagte avstand er en tanke større enn de andre rutenes også i det minste kurveområdet, og rute 3A sitt høye samlede vedlikeholdsintervall kan dermed ikke forklares gjennom horisontalgeometrifordelingen. Det at vedlikeholdsintervallene skulle styres

av horisontalkurvatur alene er derfor vanskelig å se. Mulighetene som gjenstår er dermed enten at både horisontal- og vertikalgeometri spiller inn, eller at vedlikeholdsintervallet kun avhenger av vertikalgeometri. Videre trekkes vertikalgeometri inn i drøftingen, for undersøkelse av om den horisontale skjevfordelingen finner en forklaring i vertikalgeometrien.

6.2.3 Vertikalgeometrisk betraktning

Et utgangspunkt for drøftingen av den vertikalgeometriske fordelingen er at rute 3A nærmest ikke tilbakelegger brattere stigninger enn 12,5 ‰. Den betydelige avstanden tilbakelagt på mellomstore stigninger (7,5-9,9 ‰), som er 35 000 km større enn for rute 2 og 37 000 km større enn for rute 1, er en slående motpol. En mulig forklaring er at slitasjen rute 3A blir utsatt for gjennom alle de ekstra kilometerne med middels bratt stigning vil tilsvare den slitasjen de andre rutene utsettes for i intervallene brattere enn 12,5 ‰, slik at den samlede slitasje blir noenlunde lik for alle hjul. Sammenlignet med rute 3A har rute 1 på strekninger med $s < 12,5 \text{ ‰}$ et avstandsunderskudd på 89 000 km, mens den bare tilbakelegger 17 000 km ekstra på strekninger med $s \geq 12,5 \text{ ‰}$ for å veie opp for dette. Betraktes vertikalgeometri isolert sett indikerer dette at kjøring på bratt stigning har vesentlig større innvirkning på hjulslitasjen enn kjøring på svak stigning, og at avstanden som må tilbakelegges på slakere partier for å oppnå samme slitasje er relativt stor.

Av rutene 1 og 2 så tilbakelegger rute 1 litt kortere avstand innenfor alle intervaller, med unntak av det alle bratteste intervallet med $s \geq 20 \text{ ‰}$ der rute 2 sin representasjon er fraværende. Ved betraktning av vertikalgeometri isolert sett kunne man derfor få inntrykk av at stigninger på mer enn 20 ‰ er svært mye mer kritisk for slitasje enn slakere stigninger. Rute 3A sine mektige avstander på middels bratte stigninger for å kompensere for en relativt kort avstand på de bratteste partiene kan også tyde på at slitasjen når det blir bratt nok vil få en betydelig økning.

6.2.4 Samlet betraktning

Ved sammenligning av oversikten over rutenes horisontalgeometriske fordeling (figur 17) og oversikten over kjørelengde før reprofileringsintervall kan det observeres en utjevning mellom rutene ved betraktning av de mindre kurveintervallene og en økning i forskjell i de største kurveintervallene. Dette kan igjen tyde på at de minste kurveradiene er de mest kritiske for slitasje, og at det derfor er disse som vil innrette seg likt i en vedlikeholdssammenheng på bekostning av at forskjellen i avstand på rettstrekke blir vesentlig større. Ved sammenligning av oversikten over rutenes vertikalgeometriske fordeling (figur 18) og oversikten over kjørelengde før reprofileringsintervall her kan det observeres en utjevning mellom rutene ved betraktning av de bratteste stigningsintervallene og en økning i forskjell for moderate til høye stigninger. Dette kan igjen tyde på at de bratteste stigningene er de mest kritiske for slitasje, og at det derfor er disse som vil innrette seg likt i en vedlikeholdssammenheng på bekostning av at forskjellen i avstand på slakere stigninger blir vesentlig større. Vedlikeholdsintervaller mellom rutene bidrar i så fall til å jevne ut de mest slitasjekritiske geometriene og formodentlig jevne ut slitasjeforskjellene på hjulene. Dette tyder på at sporgeometrien har betydning for et hjuls vedlikeholdsintervall, og de store forskjellene i vedlikeholdsintervall mellom rutene tyder dessuten på at sporgeometriens innvirkning på hjulslitasjen er betydelig.

I forsøket er det rute 1 som har både trangest horisontalgeometri og brattest vertikalgeometri, mens det er rute 3A som har slakest vertikalgeometri og retttest horisontalgeometri (sistnevnte er lik som rute 2). Om den utjevningseffekten skyldes horisontalgeometriens innvirkning på slitasjen, vertikalgeometriens innvirkning på slitasjen eller om begge deler spiller inn er derfor vanskelig å fastslå. Rute 3A sitt høye vedlikeholdsintervall kan enklest forklares ved dens korte tilbakelagte avstand på bratte stigninger, som later til å spille en stor rolle for slitasjen. Det at rute 1 sin intervallfordeling gir kortest avstand i nærmest samtlige intervaller, både når det kommer til horisontalgeometri og vertikalgeometri kan med utgangspunkt i resultatene kun forklares ved at stigninger brattere enn 20 ‰, altså intervallet der rute 1 er dominant, må ha en voldsom virkning på hjulslitasjen. Hvor voldsom denne virkningen egentlig er kan imidlertid ikke sies sikkert.

6.3 Sporgeometri og hjulenes slitasjetrekk

6.3.1 Introduksjon

I dette delkapittelet utføres en granskning av hjulslitasjeutviklingen, med det mål å knytte spesifikke slitasjetrekk på hjulprofilen opp mot trekk ved de respektive sporgeometrier. Funn av konkrete slitasjeforskjeller mellom hjul utsatt for ulike sporgeometriske påkjenninger ville sannsynliggjøre at sporgeometrien påvirker hjulslitasjen, og samtidig fortelle noe om hvilke geometrier som gir den mest kritiske slitasjen. Sammenligningsgrunnlaget for drøftingen er rute 1 og 2.

Diskusjonen gjøres med utgangspunkt i følgende analysereslutater:

- Utviklingen av hjulbaneslitasje på rutene (figurene 19 - 20 og appendiks B)
- Utviklingen av flensslitasje på rutene (figurene 21 - 22 og appendiks B)
- Slitasjehastigheter (tabell 14)
- Rutenes horisontalgeometriske fordeling (tabell 8 og figur 17)
- Rutenes vertikalgeometriske fordeling (tabell 10 og figur 18)

6.3.2 Hjulbaneslitasje

Drøftingen av slitasjens fremskridelse på hjulbanen gjøres med utgangspunkt i mållartene flenshøyde og hjuldiameter. Ved betraktning av hjulene på rute 2 sin slitasje ser både flenshøyde og diameter ut til å forholde seg svært stabilt mens kjørelengden øker. Den målte slitasjen er bemerkelsesverdig liten, og den estimerte, gjennomsnittlige slitasjehastigheten ved ca 20 000 km ligger nært 0 mm/10⁶km for begge mållarter. Til sammenligning observeres en økning i flenshøyden for rute 1 med omkring 10 mm/10⁶km og en reduksjon på mer enn 30 mm/10⁶km for diameter. Forskjellen mellom rutene er med andre ord forbløffende stor.

Et blikk på rutenes vertikalgeometriske fordeling gir informasjon om at den største forskjellen mellom rutene finnes i det bratteste stigningsområdet. Hjulene på rute 1 tilbakelegger per kilometer 25 ganger så stor avstand på stigninger med $s \geq 20$ ‰. Mens rute 1 tilbakelegger 75 meter med denne stigningen tilbakelegger rute 2 sine hjul kun 3 meter for hver tusende rutemeter. Tallene ville sann sett kunne klare å forklare den forbløffende forskjellen i hjulbaneslitasje mellom rutene, hvis disse aller bratteste stigningene skulle tære enormt på hjulene. Det er ikke sikkert at de bratteste stigningene er like kritiske som analyseresultatene impliserer, men det er sannsynlig at i hvertfall en andel av det markante slitasjeavviket finner sin forklaring her.

6.3.3 Flensslitasje

I resultatkapittelet er det under horisontalgeometri beskrevet hvordan hele 29 % av rute 1 faller inn under kategorien små kurver, mens kun 18 % av rute 2. Den særlig store forskjellen i ruteandel med kurveradius 300-399m er videre bemerket, der 13,3 % av rute 1 finner sin plass, men bare 5,5 % av rute 2. Kurvene i dette området er blant de aller trangeste som materielle trafikkerer, og følgelig må disse forventes å spise lengst opp på flensen og lengst ut på kanten av hjulet. I teorikapittelet omtales dessuten litteratur som beskriver hvordan flenskontakt som oppstår når kurveradien underskrider ca 400-350 meter vil føre til et vesentlig materialtap på flens.

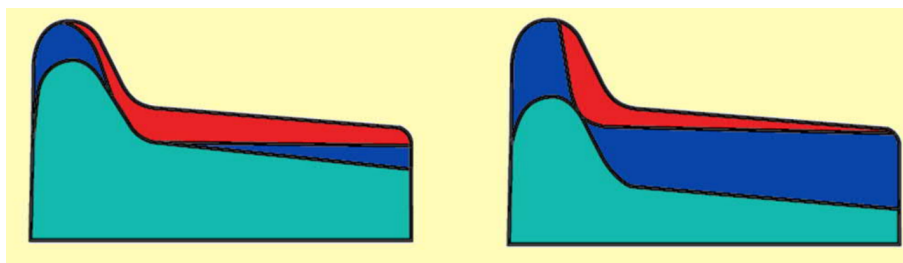
Rute 1 sin andel av kurver med $R < 400$ m er 15,4 % mens rute 2 sin er 9,7 %. Videre er rute 1 sin slitasjehastighet for tverrmål 42 mm/10⁶km mens rute 2 sin er 20 mm/10⁶ km. For hver tilbakelagte kilometer kan man altså anta at rute 1 sine hjul går rundt 1,6 ganger så langt på kurver med kritisk flenskontakt, og disse opplever samtidig en slitasjehastighet i flensområdet som er 2,1 ganger så høy. Dette kan stemme greit med det som er forventet, ettersom den eksakte grensen for flenskontakt under rådende forhold sannsynligvis ikke er nøyaktig 400 m, og forøvrig

vil variere med hjulets slitasjetilstand. Av figur 4 fremkommer hvordan slitasje grunnet flenskontakt gjør utslag på tverrmålet.

6.4 Sporgeometri og vedlikehold

6.4.1 Vedlikeholdsmessig gunstige kurvaturer

Mantena rapportere om at vedlikehold ofte gjennomføres grunnet materialutfall, men også grunnet både for stor og for liten flenstykkelse og grunnet for stor flenshøyde. Hjulene blir ofte dreid allerede en stund før de absolutte grenseverdiene i regelverket overskrides, da en utsettelse uansett bare ville føre til at mer materiale måtte dreies bort og det ikke ville være noen økonomisk gevinst ved dette. Sett fra et kostnadsperspektiv er slitasjefordelingen hjulene kommer inn med av stor betydning. Hjul som kommer inn til dreining med tynne flenser vil måtte gjennomgå et større materialtap under dreining, da mer av diameteren går til spille for gjenopptagelse av korrekt overflategeometri. Dette er illustrert i figur 23, der materialet som er slitt bort på strekningen er skravert rødt, mens materialet som må fjernes under reprofiling for gjenopptagelse av referansemål er markert blått. Det er altså gunstigere at hjulene trafikkerer en rute der de bygger flenser enn en rute der flensen slites ned. En andel av de undersøkte hjulene på rute 2 bygger flenser, og for den resterende andelen slites flensene uansett mindre enn hjulene på rute 1 (se figur 21).



Figur 23: Reprofilering ved lav (venstre) og høy (høyre) grad av flensslitasje.

Kilde: Gleislauftechnik Müller

Hjul som kommer inn til vedlikehold fra rute 2 vil altså være å foretrekke, da flere reprofilingen kan gjennomføres av disse før hele hjulskiven må erstattes. Samtidig observeres en lavere slitasjehastighet på disse hjulene. Som forventet er altså flate traser med en rett horisontalkurvatur det vedlikeholdsmessig gunstige. Dette bekreftes i rute 3A, som har den flateste og rettste geometrien og samtidig et betydelig lavere vedlikeholdsintervall enn de andre rutene.

6.4.2 Vedlikeholdsoptimalisering

I innledningen ble det beskrevet hvordan et hjulprofil som er slitasjetilpasset for et banesystem ikke nødvendig er tilstrekkelig slitasjetilpasset andre banesystemer, og at systemets kurveandel her vil ha vesentlig betydning. Det er også belyst hvordan slitasje i hjulbanen kan føre til økende konsitet, mens flensslitasje og tynnere flens gjerne vil ha motsatt virkning. Videre er det beskrevet at slitasje i hjulbanen gjerne foregår på rettere partier med mye stigning mens flensslitasje ofte forbindes med kurvegange. Hvor jevnt slitasjen foregår over hjulprofilet vil med andre ord kunne avhenge av traseens sammensetningen mellom kurver og rettere partier, og ved den rette komposisjonen vil hjulprofilet kunne betegnes som slitasjetilpasset til banesystemet. Det kan derfor tenkes at en reduksjon i det samlede hjulvedlikeholdsbehovet vil kunne oppnås ved å disponere materiellet over de aktuelle rutene på en slik måte at hjulene ble slitt jevnest mulig.

Eksempelvis så er det store variasjoner i utviklingen av flenstykkelse for rute 1 og rute 2, og hjulene beveger seg mot ulike grenseverdier som utløser behov for vedlikehold. Mens rute 1 har store problemer med at flensen spises opp, så er det ikke uvanlig at hjulene på rute 2 bygger flens, og at de må dreies grunnet for stor flenstykkelse. Disponerer man materiellet på begge rutene

fremfor å låse det til en rute kan det være at disse to problemene delvis ville utlignet hverandre, og at man hadde oppnådd et redusert gjennomsnittlig vedlikeholdsintervall for alle hjul samlet sett. Tynn flens er som beskrevet også en svært uønsket tilstand under reprofileringsprosessen, og selv en delvis begrensningsavflensoppbygging ville ha stor verdi.

7 Konklusjon

7.1 Trukkede slutninger

Det registreres et stort spenn i vedlikeholdsintervallenes størrelse mellom de ulike sporgeometriene, og rute 3A sine hjul tilbakelegger i snitt dobbelt så stor avstand som rute 1 sine før de tas inn til reprofiling. Det registreres dessuten en stor spredning for hjul innad i samme rute, både når det kommer til vedlikeholdsintervaller og målartenes utvikling over tilbakelagt avstand. Det estimerte slitasjebildet på hjulslitasje antas imidlertid å være troverdig, da spredningen kan forklares i avvikende omstendigheter mellom enkelthjul og datagrunnlaget er omfattende. Det er likvell mulig at slitasjeutviklingen avviker noe fra hvordan en kunne forvente at et vilkårlig nytt hjul ville slites ut, da forsøket gradvis blir manipulert ved at enkeltobservasjoner faller bort underveis.

Det kan virke som om hjulene tenderer til å slites ned mot en slags overflategeometrisk likevekt med endelige mål som vil avhenge av sporgeometrien. Mens diameteren utvikler seg med en jevn hastighet hele veien, så bøyer flenstykkelse og tverrmål av etterhvert og går mot en konstant verdi for hver rute. Dette kan skyldes at hjuloverflaten etterhvert som slitasjen skrider frem går mot en likevektsgeometri der videre slitasje foregår relativt jevnt over hele profilet, på samme vis som hos en slitasjeprofil. Dette ville forøvrig samsvare med tidligere observasjoner fra andre undersøkelser, som har vist at konisiten etterhvert går mot en metningsverdi som vil avhengige av sporgeometrien.

Betraktning av rutenes avstandsfordelinger over sporgeometri tyder på at vedlikeholdsintervallet til en rute først og fremst vil påvirkes av avstanden tilbakelagt på små kurver og bratte stigninger. Dette bergunnes med at varierende opptredende vedlikeholdsintervaller mellom undersøkte ruter bidrar til en utjevning av det som formodentlig er de mest slitasjekritiske geometriene, på bekostning av økende avstandsforskjell på andre geometrier. De store forskjellene mellom rutenes vedlikeholdsintervaller tyder dessuten på at sporgeometriens innvirkning på slitasjen er betydelig. Studering av slitasjens fremskridelse over hjulprofilen tyder på at stigninger brattere enn 20 % innebærer en svært kritisk hjulbaneslitasje. Det detekteres ellers en klar sammenheng mellom avstanden tilbakelagt på horisontalkurver med radius mindre enn 400 m og mengden materiale slitt bort på flens.

Sett i en vedlikeholdssammenheng vil rutene med stor kurveandel ikke bare være ugunstig grunnet den økte slitasjehastigheten, men analysen viser at slitasjen også fordeler seg mer ugunstig og resulterer i tynn flens som er kostbart å utbedre. Analysen viser samtidig at hjul slitt ut på rettete sporgeometrier bygger flens, og det kan derfor tenkes at en reduksjon i det totale vedlikeholdsbehovet vil kunne oppnås ved å disponere materiellet jevnere over de aktuelle rutene. Hjulprofilene vil på den måten bli slitt jevnere og det er sannsynlig at omfanget av både flensbygging og tynn flens vil kunne reduseres.

7.2 Videre arbeid

Utvidelse av målartene

Denne analysen er ufullstendig på den måte at ekvivalent konisitet, som også gir et verdifult bilde av slitasjeutviklingen og av gangegenskapene forøvrig, ikke er behandlet. Målinger av slitasjefordeling over hele profilet er nå påbegynt i videre utstrekning enn tidligere, og det er sannsynlig at en slik analyse vil være gjennomførbar innen uoverskuelig fremtid. I en utvidet analyse kunne derfor ekvivalent konisitet innføres som en femte målart.

Utvidelse av antall ruter

Arbeidet er mangefult i den forstand at få ruter inngår i analysen, hvilket gir et forholdsvis tynt grunnlag for å fastslå noe med høy sikkerhet. Et videre arbeid kunne dermed innebefatte å undersøke data fra flere sporgeometrier ved ellers like øvrige omstendigheter som i dette arbeidet.

Analyse av overflatefeil

Mange av hjulene reprofileres grunnet overflatefeil, og sett fra et vedlikeholdsperspektiv er dette et vel så stort problem som slitasje. Dette arbeidet omhandler i hovedsak slitasjefenomenet, men det

kunne også være verdifullt å undersøke fenomenet overflatefeil nærmere i lys av sporgeometri.

Vedlikeholdsoptimalisering

Mantena som har overoppsyn med hjul på både rute 1, 2 og 3A bekrefter at vedlikeholdsbehovet har økt etter oppstart av trafikkpakkene, da materiellet gikk fra fri trafikkering over nettet til å bli låst til én rute. Det kunne være interessant å utvide analysen i denne masteroppgaven til å også omfatte en rute 4, som representerer horisontal- og vertikalgeometrifordelingen til et hjulsett som beveger seg fritt over rute 1, 2 og 3A i samme mønster som før trafikkpakkene. Tilhørende hjul-datagrunnlag ville være målinger fra tiden før trafikkpakkene ble etablert. En tenkt analysen ville da kunne sammenligne situasjonen før og etter trafikkpakkene, og da særlig vedlikeholdsbehovet til et gjennomsnittshjul på nettet før og etter innføringen.

Bibliografi

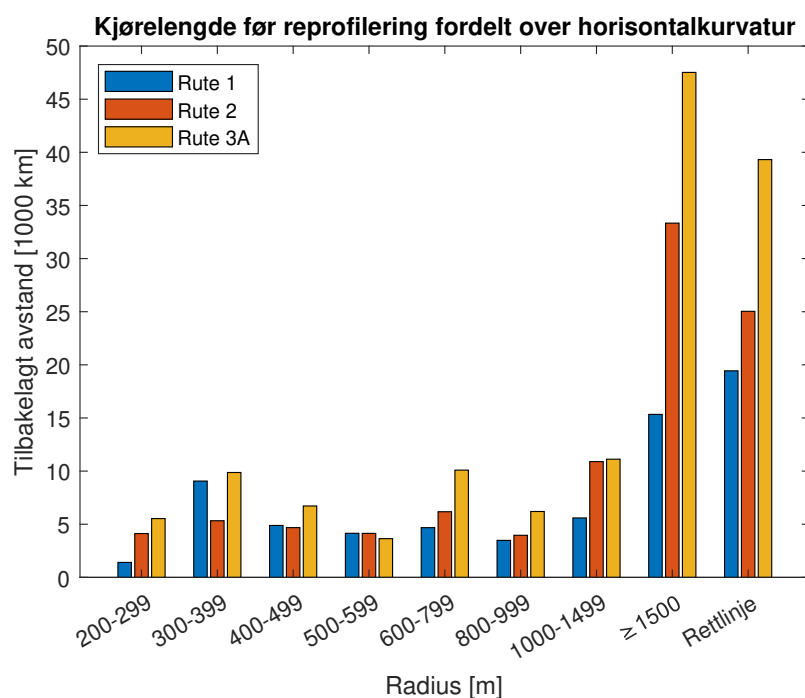
- Aschehoug og Gyldendals store norske leksikon. 13 : Sau-Su*, (2006). Oslo: Kunnskapsforlaget.
- Bane NOR, (2012). *Østfoldbanen*. Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/reisende/Banene/Ostfoldbanen/> (Hentet: 17. jun. 2022).
- Bane NOR, (2018). *Tunneler Drammenbanen og Askerbanen*. (Teknisk rapport 2018/12/19 22:05). Oslo.
- Bane NOR, (2022). *Teknisk regelverk*. Versjon av 10.02.2022. Tilgjengelig fra: <https://trv.banenor.no/w/index.php?title=Overbygning/Prosjektering/Sporkonstruksjoner/Vedlegg/Skinneprofiler&oldid=29940> (Hentet: 5. jun. 2022).
- Chen, H., Ishida, M., Namura, A., Baek, K.-S., Nakahara, T., Leban, B. og Pau, M., (2011). Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area. *Wear*, 271(1). Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail / Wheel Systems, Florence, 2009, s.32–39. Tilgjengelig fra: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.022>.
- Fevang, P.A., (2017). *Strekningsskart*. Bane NOR Network Statement. Tilgjengelig fra: <https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=vedlegg:strekningsskart> (Hentet: 6. apr. 2022).
- Fevang, P.A., (2019). *Strekningsskart*. Bane NOR Network Statement. Tilgjengelig fra: <https://networkstatement.banenor.no/doku.php?id=vedlegg:strekningsskart> (Hentet: 6. apr. 2022).
- Greenwood Engineering, (2021). *MiniProf Wheel*. Product Data Sheet. Tilgjengelig fra: <https://q9n2g8h4.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2021/08/GE-MiniProf-Wheel-BT-Product-Sheet-2021-1.pdf> (Hentet: 6. jun. 2022).
- Grobe, O., (2000). *Kjøreveien*, Nummer 9 Oktober 2000. Jernbaneverket.
- Gunvaldsen, O., (1941). *Flåmsbana - nylagt spor*. (Fotografi JMF090120-02). Hamar: Norsk Jernbanemuseum.
- Halland, E., Ly, J.N., Lundgren, S.O., Moss, G., Skjoldli, N., Løhren, A.H., Røer, G., Johansen, P.A., Schancke, E., Fjeld, T. og Christensson, S., (2005). *Skinnesmøring og flenssmøring på det statlige jernbanenettet*. (Teknisk rapport Versjon: endelig 01.01.05). Oslo: Jernbaneverket.
- Janicki, J. og Horst, R., (2008). *Schienenfahrzeugtechnik*. Heidelberg-Mainz: Bahn Fachverlag GmbH.
- Jendel, T. og Berg, M., (2002a). Prediction of Wheel Profile Wear. *Vehicle System Dynamics*, 37(sup1), s.502–513. eprint: <https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666258>. Tilgjengelig fra: <https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666258>.
- Jendel, T. og Berg, M., (2002b). Prediction of Wheel Wear for Rail Vehicles — Methodology and Verification. *Contact Mechanics*. Dordrecht: Springer Netherlands, s.229–236.
- Jernbanedirektoratet, (2016). *Trafikkavtale Trafikkpakke 1*. (Kontrakt inngått 20.10.2018 mellom Jernbanedirektoratet og Go-Ahead Norge AS). Oslo:
- Jernbanedirektoratet, (2019a). *R2022 Østfold*. (Dok.nr. 201800408-2). Rutemodeller etter Follobanen.
- Jernbanedirektoratet, (2019b). *Trafikkavtale Trafikkpakke 2 Nord*. (Kontrakt inngått 28.06.2019 mellom Jernbanedirektoratet og SJ Norge AS Kontraktsnr. 19/00665). Oslo:
- Jernbaneverket, (2004). *Infrastrukturens egenskaper*. (JD 590).
- Jernbaneverket, (2012). *Gardermobanen-equivalent conicity*. Presentasjon på Nordic Seminar av Hallstein Gåsemyr basert på rapport av Lars-Ove Jönsson. Tilgjengelig fra: https://www.railwaygroup.kth.se/polopoly_fs/1.347119.1550156547!/Menu/general/column-content/attachment/Hallstein%20G%C3%A5semyr%20et%20al.pdf (Hentet: 17. jun. 2022).
- Jernbaneverket, (2016). *Jernbanestatistikk 2015*. Oslo: Jernbaneverket, Seksjon for samfunnsøkonomi og statistikk.
- Jönsson, L.-O., (2011). *Equivalent Conicity on Norwegian Tracks: Gardermo Line*. (Rapport forespurt av Jernbaneverket TS4034-0000-3-RES). Solna Strandväg 74, Solna: Interfleet Technology AB.
- Jörg, A., (2017). *Der Einfluss von Schiene und Stahlsorte auf das Gesamtsystem Fahrweg*. (ÖVG Seminar "Zur Entwicklung von Schienenschädigungen" Graz, September 2017). voestalpine Schienen GmbH.

-
- Kiær, A.N., (1885). *Norges land og folk, statistisk og topografisk beskrevet. - I. Smaalenenes Amt*. Kristiania: H. Aschehoug Co.
- Knothe, K. og Stichel, S., (2003). *Schienenfahrzeugdynamik*. Berlin-Heidelberg, Tyskland: Springer-Verlag.
- MathWorks, (2022). *polyfit*. Tilgjengelig fra: <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html> (Hentet: 19. jun. 2022).
- Mayfran, (2016). *MM Maschinenmarkt*. Fotografi. Tilgjengelig fra: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/damit-alles-rund-laeuft-spaene-sicher-entsorgen-a-552602/> (Hentet: 14. jun. 2022).
- Nextsense, (2022a). *Measurement module "wheel diameter"*. Data Sheet. Tilgjengelig fra: https://www.nextsense-worldwide.com/files/content/branchen/bahnindustrie/raddurchmesserbewertung/CMM1005-WheelDiameterExtension%28allsizes%29_DataSheet_EN.pdf (Hentet: 6. jun. 2022).
- Nextsense, (2022b). *Measurement module "wheel profile"*. Data Sheet. Tilgjengelig fra: https://www.nextsense-worldwide.com/files/content/branchen/bahnindustrie/radprofilmessung/CMM1001-WheelProfile_DataSheet_EN.pdf (Hentet: 6. jun. 2022).
- Nießen, N., (2020). *Eisenbahnwesen I*. Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen: Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, RWTH.
- Nohrstedt, L., (2016). *Mysteriet med skakningar i Hallandsås-tunneln är löst*. Tilgjengelig fra: <https://www.nyteknik.se/tekniknyheter/mysteriet-med-skakningar-i-hallandsas-tunneln-ar-lost-6579466>.
- Norges Statsbaner, (1982). *VedlikeholdsForskrifter for rullende materiell*. (Tekniske forskrifter Trykk 741.1.2).
- Norges Statsbaner, (1983). *NSB teknikk*, Nummer 1, årgang 9.
- Norges Statsbaner BA, (1998). *VedlikeholdsForskrifter for rullende materiell*. (Tekniske forskrifter Trykk 741.1.2).
- Norske Tog AS, (2020a). *Type73 – Serie A*. Tilgjengelig fra: <https://www.norsketog.no/tog/type73a> (Hentet: 24. mar. 2022).
- Norske Tog AS, (2020b). *Type73 – Serie B*. Tilgjengelig fra: <https://www.norsketog.no/tog/type73b> (Hentet: 24. mar. 2022).
- Norske Tog AS, (2022). *Dokumentnummer: T-70-GEN-741.1.2*. (Revisjon 25, 04.03.2022).
- NSB, (2014). *R20 Oslo S–Halden–Göteborg*. Tilgjengelig fra: https://www.dalsed.se/media/245971/r20-01-pdf-oslo-halden-14-12-14_13-6-2015.pdf (Hentet: 1. apr. 2022).
- Persontog til utlandet*, (2021). (Teknisk rapport 210036). Oslo: Jernbanedirektoratet.
- Schelle, H., (2014). *Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung*. Ph.d.-avhandling. Technische Universität Berlin.
- Schöch, D.-I.W., (2005). *Regelmaßnahme asymmetrisches Schleifen*. (129). Berlin: ZEVrail – Glasers Annalen.
- Solberg, M.G., (2017). *Bane Nors eksperter har brukt en måned på finne ut av togristingen på Vestfoldbanen. Nå er årsaken klar*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/bane-nors-eksperter-har-brukt-en-maned-pa-finne-ut-av-togristingen-pa-vestfoldbanen-na-er-arsaken-klar/382001>.
- Stichel, S., (1996). *Betriebsfestigkeitsberechnung bei Schienenfahrzeugen anhand von Simulationsrechnungen*, Fortschritt-Berichte VDI.: Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik. VDI-Verlag.
- Store norske leksikon, (2009). *Dovrebanen*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Dovrebanen> (Hentet: 17. jun. 2022).
- Svingheim, N., (2018). *Østfoldbanen*. Jernbanedirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.jernbanedirektoratet.no/no/jernbanesektoren/jernbanenettet-i-norge/banestrekningene/ostfoldbanen/> (Hentet: 17. jun. 2022).
- Svingheim, N., (2021a). *Dovrebanen*. Jernbanedirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.jernbanedirektoratet.no/no/jernbanesektoren/jernbanenettet-i-norge/banestrekningene/dovrebanen/> (Hentet: 17. jun. 2022).
- Svingheim, N., (2021b). *Første tog over grensen 18.oktober*. Tilgjengelig fra: <https://www.jernbanedirektoratet.no/no/aktualiteter/2021/forste-tog-over-grensen-18.oktober/> (Hentet: 1. apr. 2022).
-

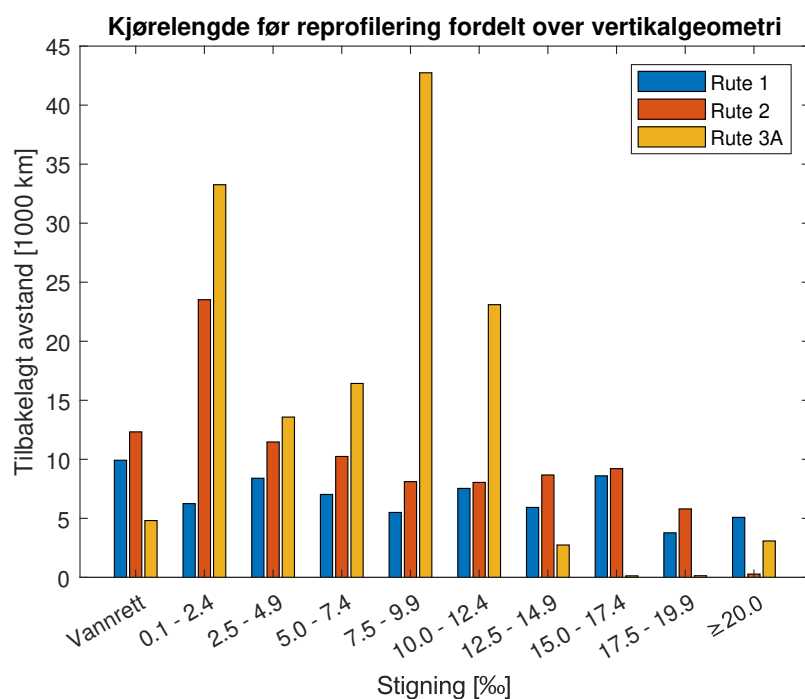
-
- Svingheim, N., (2021c). *Sørlandsbanen*. Jernbanedirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://www.jernbanedirektoratet.no/no/jernbanesektoren/jernbanenettet-i-norge/banestrekningene/sorlandsbanen/> (Hentet: 17. jun. 2022).
- Vy, (2020). *R20 Oslo S–Halden–Göteborg*. Tilgjengelig fra: https://www.vy.no/globalassets/vy.no/filer-no/rutetabeller-tog/r21-rutetabeller/r20-vy-pdf-oslo-halden-goteborg-13-12-20_11-12-2021.pdf (Hentet: 1. apr. 2022).
- Zacher, M., Nicklisch, D., Grabner, G., Polach, O. og Eickhoff, B., (2015). A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229, aug., s.691–709. Tilgjengelig fra: <https://doi.org/10.1177/0954409714568171>.

Appendiks

A Resultater sporgeometri

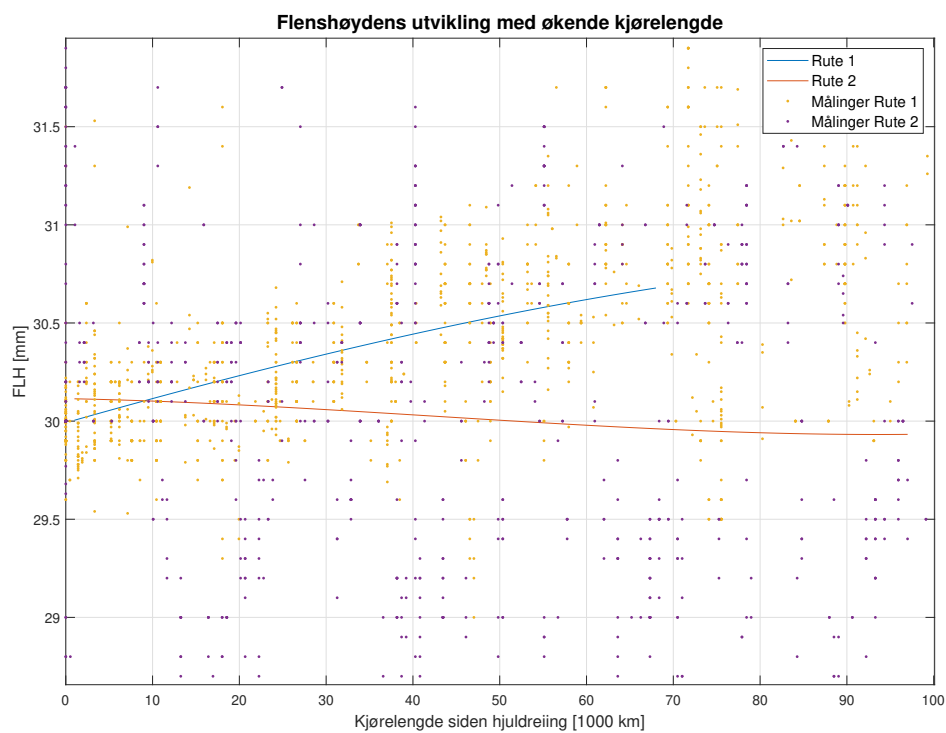


Figur 24: Gjennomsnittlig tilbakelagte horisontalkurveavstander mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.

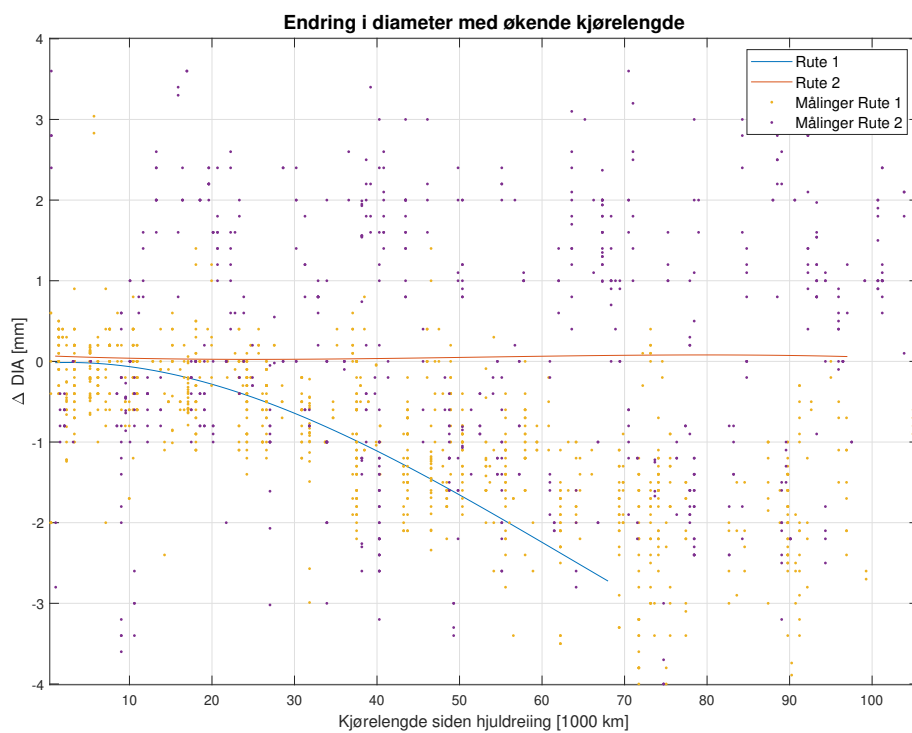


Figur 25: Gjennomsnittlig tilbakelagt avstand med stigning mellom hver hjuldreining for hjulsett på rutene målt i antall tusen kilometer.

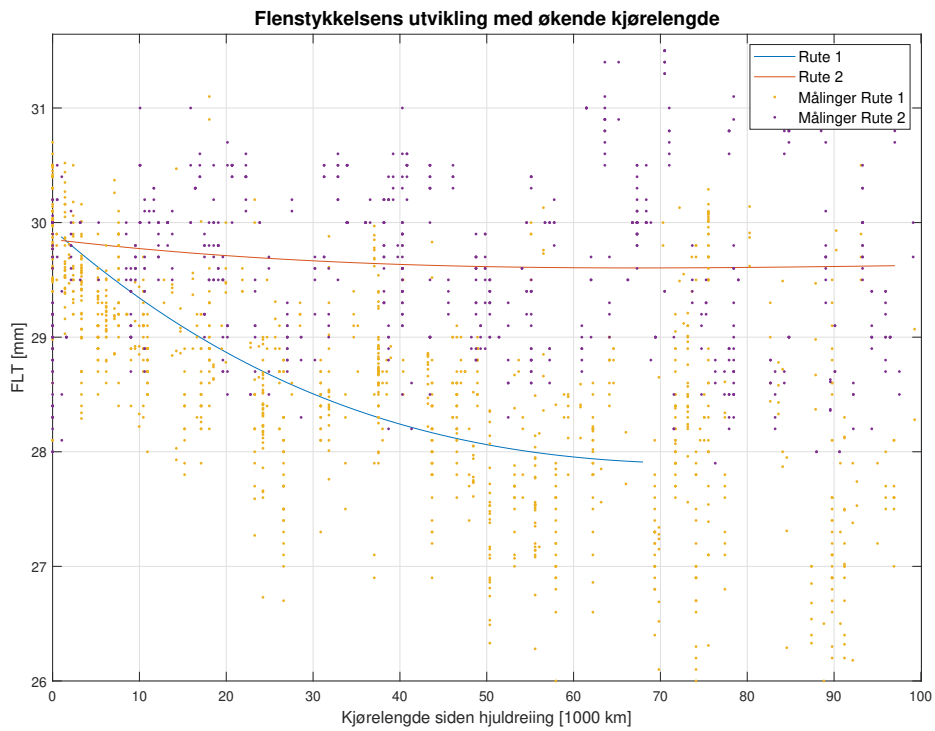
B Resultater hjulslitasje



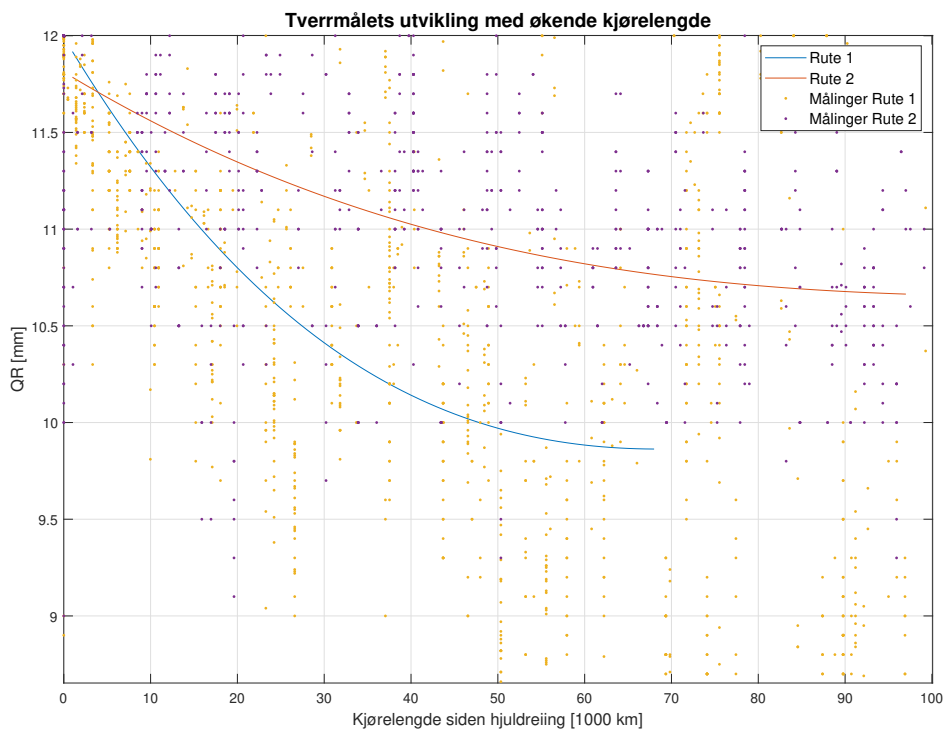
Figur 26: Måledata på flenshøyde med forstørrelse av de estimerte polynomene.



Figur 27: Måledata på hjuldiameterendring med forstørrelse av de estimerte polynomene.



Figur 28: Måledata på flenstykkelse med forstørrelse av de estimerte polynomene.



Figur 29: Måledata på tverrmål med forstørrelse av de estimerte polynomene.

C Polynomer hjulslitasje

Flenstykke

$$FLT_1 = -0,0000022719x^3 + 0,0006965277x^2 - 0,0667344447x + 29,9418159601$$

$$FLT_2 = -0,0000003385x^3 + 0,0001003461x^2 - 0,0089088382x + 29,8525154831$$

$$\frac{dFLT_1}{dx} = -0,0000068157x^2 + 0,0013930554x - 0,0667344447$$

$$\frac{dFLT_2}{dx} = -0,0000010156x^2 + 0,0002006922x - 0,0089088382$$

$$\left. \frac{dFLT_1}{dx} \right|_{x=(x_{1,25\%})/2} = -0,0390$$

$$\left. \frac{dFLT_2}{dx} \right|_{x=(x_{2,25\%})/2} = -0,0053$$

Flenshøyde

$$FLH_1 = -0,0000001484x^3 - 0,0000263334x^2 + 0,0125701638x + 29,9918670711$$

$$FLH_2 = 0,0000003504x^3 - 0,0000446688x^2 - 0,0008418663x + 30,1145811966$$

$$\frac{dFLH_1}{dx} = -0,0000004453x^2 - 0,0000526668x + 0,0125701638$$

$$\frac{dFLH_2}{dx} = 0,0000010513x^2 - 0,0000893376x - 0,0008418663$$

$$\left. \frac{dFLH_1}{dx} \right|_{x=(x_{1,25\%})/2} = 0,0112$$

$$\left. \frac{dFLH_2}{dx} \right|_{x=(x_{2,25\%})/2} = -0,0022$$

Tverrmål

$$QR_1 = -0,0000027604x^3 + 0,0008323825x^2 - 0,0751524937x + 11,9922844467$$

$$QR_2 = -0,0000005419x^3 + 0,0002117997x^2 - 0,0272833442x + 11,8123193486$$

$$\frac{dQR_1}{dx} = -0,0000082811x^2 + 0,0016647650x - 0,0751524937$$

$$\frac{dQR_2}{dx} = -0,0000016257x^2 + 0,0004235993x - 0,0272833442$$

$$\left. \frac{dQR_1}{dx} \right|_{x=(x_{1,25\%})/2} = -0,0421$$

$$\left. \frac{dQR_2}{dx} \right|_{x=(x_{2,25\%})/2} = -0,0195$$

Δ Diameter

$$\Delta DIA_1 = 0,0000054025x^3 - 0,0010295293x^2 + 0,0052646845x - 0,0201342906$$

$$\Delta DIA_2 = -0,0000006688x^3 + 0,0001048648x^2 - 0,0039739410x + 0,0692228308$$

$$\frac{d(\Delta DIA_1)}{dx} = 0,0000162074x^2 - 0,0020590586x + 0,0052646845$$

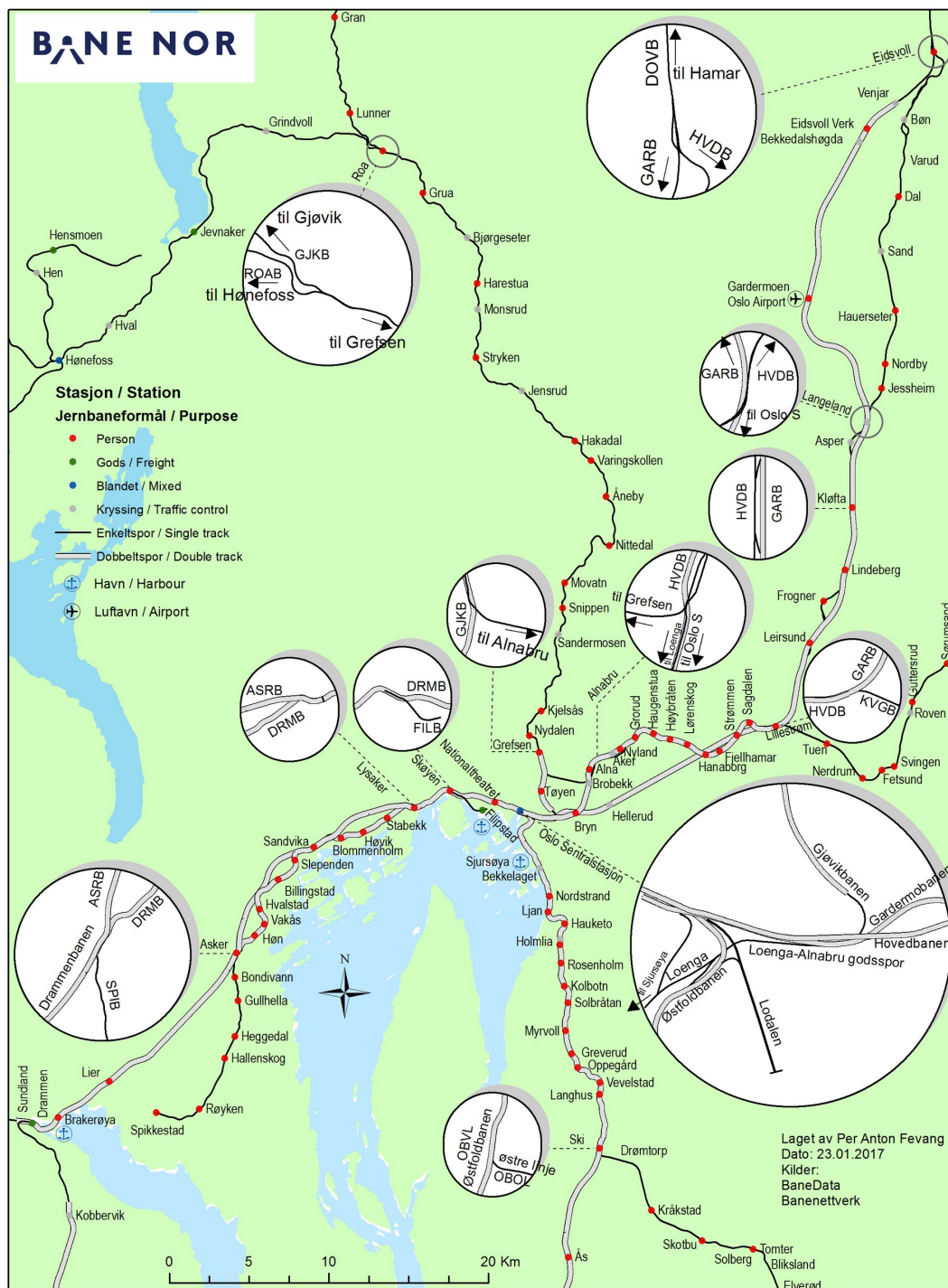
$$\frac{d(\Delta DIA_2)}{dx} = -0,0000020065x^2 + 0,0002097297x - 0,0039739410$$

$$\left. \frac{d(\Delta DIA_1)}{dx} \right|_{x=(x_{1,25\%})/2} = -0,0326$$

$$\left. \frac{d(\Delta DIA_2)}{dx} \right|_{x=(x_{2,25\%})/2} = -0,000598$$

D Trasékart

Geografiske kart som beskriver traséen til utvalgte deler av jernbanenettet.



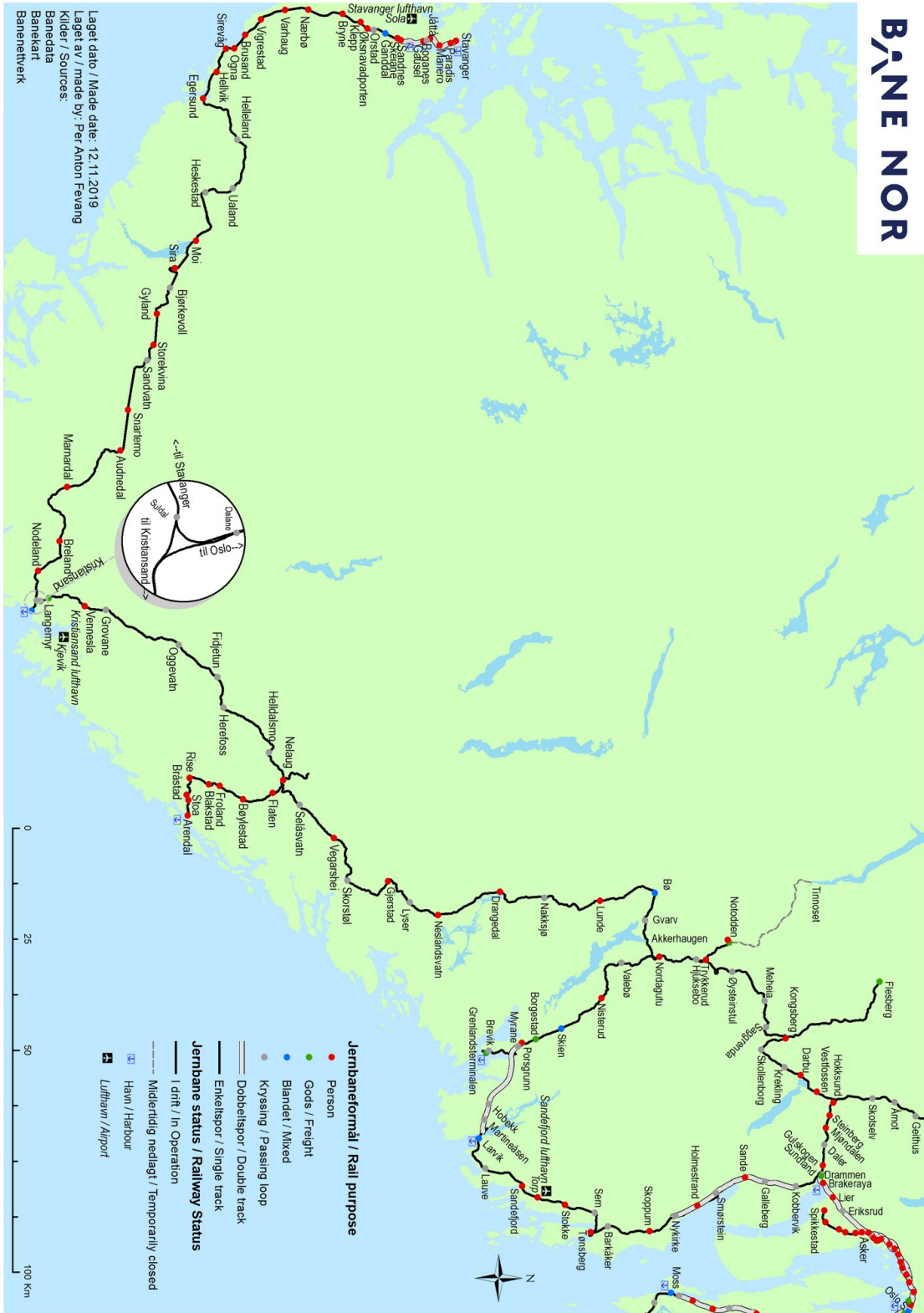
Figur 30: Trasékart for Oslo Gryta. Fra Oslo S i senter er Sørlandsbanen tilsluttet vestover, Dovrebanen østover og Østfoldbanen mot sør.

Kilde: Fevang, 2017



Figur 31: Trasékart for Østlandet med Oslogryta markert. Kartet dekker Sørlandsbanen ned til Gjerstad, Dovrebanen opp til Fåberg og Østfoldbaneruten helt til endestoppet Halden.

Kilde: Fevang, 2019



Figur 32: Trasekart for Sørlandsbanen

Kilde: Fevang, 2019



Baner med regulær persontrafikk / Lines with regular passenger traffic

Figur 34: Trasékart for Norges samlede jernbanenett

Kilde: Fevang, 2019

Appendiks E

Hjulsatsliste

Oversiktsark måledata

Antall ruter: **4**

Antall hjulsatser per rute:

Rute 1	Rute 2	Rute 3A	Rute 3B
154	96	2	2

Antall kontroller per hjulsats:

Hjulsats	Rute 1	Rute 2	Rute 3A	Rute 3B
1	11	8	8	1
2	9	7	9	1
3	15	17		
4	11	5		
5	14	4		
6	9	4		
7	10	12		
8	16	7		
9	10	12		
10	5	4		
11	2	9		
12	13	8		
13	10	11		
14	7	10		
15	7	8		
16	10	8		
17	8	11		
18	12	12		
19	12	6		
20	16	7		
21	20	12		
22	19	9		
23	5	7		
24	17	6		
25	13	9		
26	9	11		
27	9	11		
28	9	11		
29	9	3		
30	16	11		
31	4	8		
32	2	11		
33	5	13		
34	12	13		
35	17	9		
36	12	2		
37	9	11		
38	7	10		
39	8	7		
40	8	11		
41	11	8		
42	11	12		
43	11	12		
44	8	11		
45	8	8		
46	11	8		

47	9	12
48	17	11
49	17	11
50	11	6
51	8	11
52	6	11
53	8	18
54	12	18
55	7	9
56	8	16
57	8	16
58	8	13
59	8	13
60	12	7
61	12	13
62	20	8
63	18	11
64	7	10
65	7	13
66	13	4
67	9	12
68	12	4
69	3	11
70	11	17
71	17	11
72	7	11
73	2	17
74	21	18
75	13	19
76	6	9
77	10	19
78	17	8
79	8	9
80	11	18
81	8	7
82	8	14
83	9	14
84	8	8
85	11	11
86	11	7
87	11	10
88	11	6
89	16	7
90	4	8
91	16	11
92	20	12
93	19	1
94	15	1
95	16	6
96	16	6
97	16	
98	20	
99	17	
100	17	
101	19	
102	19	

103	9
104	8
105	10
106	7
107	9
108	7
109	11
110	9
111	9
112	13
113	9
114	8
115	9
116	6
117	6
118	6
119	6
120	4
121	7
122	9
123	9
124	10
125	7
126	8
127	5
128	9
129	8
130	5
131	6
132	6
133	6
134	8
135	8
136	12
137	7
138	7
139	13
140	13
141	9
142	10
143	8
144	8
145	10
146	5
147	5
148	2
149	7
150	7
151	15
152	3
153	3
154	2

Appendiks F

Benyttede MATLAB-funksjoner

```

function Slitasje_hjul = H_slit
tic

%HEADING AV INNDATA
INNDATA = readtable('Slitasje - Individbytter og hjuldata Type 73.xlsx','Sheet','Maalinger','Range','A1:H22234')
DagligKM = [ ]; % = [Rute 1, Rute 2, Rute 3, Rute 4]

%Definisjon av grunnvariabler
mal = {'Individnr' 'MålingsID' 'Meternavn' 'Målingsverdi' 'Måledato' 'Dagnr.' 'Materiell' 'Kunde'};

for n = 1:4
Rute(n).a = mal;
end

%Oppsplitting av tabellen INNDATA i 4 tabeller, en for hver rute. (pluss evt. rest som ikke tilhører noen av rutene)
for z = 1:size(INNDATA);

for k = 1:8

f = INNDATA{z,k};

if isnumeric(f) == 0
f = char(f);
end

B{1, k} = f;
end

p = B{1, 8};

if p == 10662
Rute(1).a(end+1,:) = B;
elseif p == 10750
Rute(2).a(end+1,:) = B;
elseif p == 10067 & B{1, 6} >= 1886 %dag >= 1. mars (altså f.o.m. 1. mars 2020)
Rute(3).a(end+1,:) = B;
elseif p == 10067 & B{1, 6} < 1886 %dag < 1. mars (altså frem til 1. mars 2020)
Rute(4).a(end+1,:) = B;
else
str = sprintf('Data fra kunde %d er representert i rådatafilen "Slitasje - Individbytter og hjuldata Type 73.xlsx", men inngår ikke i anal);
end

end

end

%

%Forming av struktur

for s = 1:4

dkM = DagligKM(s);
r(s).DREID_dgr_max = [];
r(s).DREID_dgr_max_870 = [];

Individer = unique(cell2mat(Rute(s).a(2:end,1)));

for j = 1:length(Individer)
r(s).i(j).hjulsatsnr = Individer(j);

U = [];
for x = 2:length(Rute(s).a(:,1))

if Rute(s).a{x,1} == Individer(j)
U(end+1) = Rute(s).a{x,6};
end

end

Drd = 0;
%Definering av liste for individet med unilke kontrolldatoer
r(s).i(j).kdatoer = unique(U);

%Opprettelse av undersøkelser for hjulsettet basert på listen kdatoer
for v = 1:length(r(s).i(j).kdatoer)

r(s).i(j).u(v).dagnr = r(s).i(j).kdatoer(v);
r(s).i(j).u(v).lokaldagnr = r(s).i(j).u(v).dagnr - r(s).i(j).kdatoer(1);
%Dagspikret = r(s).i(j).u(v).dagnr

r(s).i(j).u(v).DIAH = [];
r(s).i(j).u(v).DIAV = [];
r(s).i(j).u(v).FLHH = [];
r(s).i(j).u(v).FLHV = [];
r(s).i(j).u(v).FLTH = [];
r(s).i(j).u(v).FLTV = [];
r(s).i(j).u(v).QRH = [];
r(s).i(j).u(v).QRV = [];

```



```

%Oppsummering av struktens dimensjoner
Antall_ruter = size(r,2);
Antall_individer_per_rute = [size(r(1).i,2), size(r(2).i,2), size(r(3).i,2), size(r(4).i,2)];

Antall_kontroller_per_ind = {};
Antall_kontroller_per_indM = zeros(max(Antall_individer_per_rute), 4);
for ss = 1:4
    for jj = 1:Antall_individer_per_rute(ss)
        Antall_kontroller_per_ind{jj, ss} = size(r(ss).i(jj).u,2);
        Antall_kontroller_per_indM(jj, ss) = size(r(ss).i(jj).u,2);
    end
end

Antall_kontroller_per_rute = sum(Antall_kontroller_per_indM,1);
Antall_kontroller_totalt = sum(Antall_kontroller_per_rute);

```

```
%Sammen drag av resultater
```

```

Dager_mellom_dreieing = {};
AntMalinge_Dager_mellom_dreieing = [];
Gj_Dager_mellom_dreieing = [];
Std_Dager_mellom_dreieing = [];

Dager_mellom_dreieing_870 = {};
AntMalinge_Dager_mellom_dreieing_870 = [];
Gj_Dager_mellom_dreieing_870 = [];
Std_Dager_mellom_dreieing_870 = [];

for ss = 1:4
    Dager_mellom_dreieing{ss} = cell2mat(r(ss).DREID_dgr_max);
    AntMalinge_Dager_mellom_dreieing(ss) = numel(Dager_mellom_dreieing{ss});
    Gj_Dager_mellom_dreieing(ss) = mean(Dager_mellom_dreieing{ss});
    Std_Dager_mellom_dreieing(ss) = std(Dager_mellom_dreieing{ss});

    Dager_mellom_dreieing_870{ss} = cell2mat(r(ss).DREID_dgr_max_870);
    AntMalinge_Dager_mellom_dreieing_870(ss) = numel(Dager_mellom_dreieing_870{ss});
    Gj_Dager_mellom_dreieing_870(ss) = mean(Dager_mellom_dreieing_870{ss});
    Std_Dager_mellom_dreieing_870(ss) = std(Dager_mellom_dreieing_870{ss});
end

Gj_km_mellom_dreieing = Gj_Dager_mellom_dreieing.*DagligKM;
Std_km_mellom_dreieing = Std_Dager_mellom_dreieing.*DagligKM;
Gj_km_mellom_dreieing_870 = Gj_Dager_mellom_dreieing_870.*DagligKM;
Std_km_mellom_dreieing_870 = Std_Dager_mellom_dreieing_870.*DagligKM;

```

```
%
toc
```

```
%SKRIVING TIL EXCELFIL
```

```
RUTER = {'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'};
```

```
%ARK 1: Samlet oversikt inn data
```

```

Resultat_lagret = sprintf('Fil: Resultat_hjulslitasje_tabell.xls, generert %s', datestr(datetime('now')));
writematrix(Resultat_lagret, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'A1:A2')
writecell({'Oversiktsark data'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'A2')

writecell({'Antall ruter:'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'C4')
writematrix(Antall_ruter, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'E4')

writecell({'Antall hjulsatser:'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'C6')
writecell(RUTER, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'E6:I6')
writematrix(Antall_individer_per_rute, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'E7:I7')

writecell({'Antall kontroller:'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'C10')
writecell({'Hjulsats' 'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'D10:I10')
writematrix(permute([1:size(Antall_kontroller_per_indM)], [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'D11:D165')
writecell(Antall_kontroller_per_ind, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 1, 'Range', 'E11:I165')

```

```
%ARK 2-5: Detaljark for hver rute
```

```

for sss = 1:Antall_ruter

    writecell(RUTER(sss), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', sss+1, 'Range', 'B2')
    writecell({'Kontroll nr.' 'Måledagnr.' 'Dato' 'DIAH' 'DIAV' 'FLHH' 'FLHV' 'FLTH' 'FLTV' 'QRH' 'QRV' '' 'Dreid' 'Dagen' 'km' 'Δ DIAH' 'DIAH_0'},
    writecell({'Dreid' 'Siden forrige dreieing' 'Siden forrige dreieing' 'Siden forrige dreieing'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', sss+1,

        c = 0;
        for jjj = 1:Antall_individer_per_rute(sss)

            Hjulsatssp = sprintf('Hjulsats: %d (Individnr.: %d)', jjj, r(sss).i(jjj).hjulsatsnr);
            PosCell = sprintf('%d:A%d', 7+c, 8+c);
            writematrix(Hjulsatssp, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', sss+1, 'Range', PosCell)

            MM = {};

```



```

for vvv = 1:Antall_kontroller_per_indM(jjj,sss)

    MM{vvv,1} = vvv;
    MM{vvv,2} = r(sss).i(jjj).u(vvv).lokaldagr;
    MM{vvv,3} = (r(sss).i(jjj).u(vvv).dagr + 42005);
    MM{vvv,4} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DIAH;
    MM{vvv,5} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DIAV;
    MM{vvv,6} = r(sss).i(jjj).u(vvv).FLHH;
    MM{vvv,7} = r(sss).i(jjj).u(vvv).FLHV;
    MM{vvv,8} = r(sss).i(jjj).u(vvv).FLTH;
    MM{vvv,9} = r(sss).i(jjj).u(vvv).FLTV;
    MM{vvv,10} = r(sss).i(jjj).u(vvv).QRH;
    MM{vvv,11} = r(sss).i(jjj).u(vvv).QRV;

    MM{vvv,13} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DREID;
    MM{vvv,14} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DREID_dgr;
    MM{vvv,15} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DREID_km;
    MM{vvv,16} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DREID_diahD;
    MM{vvv,17} = r(sss).i(jjj).u(vvv).DREID_diah0;

end

hoy = size(MM, 1);
PosMat = sprintf('%d:%d', 7+c, 7+c+hoy);
writecell(MM, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', sss+1, 'Range', PosMat)

c = c + hoy + 1;
end

end

%ARK 6: Sammendrag resultater
%Ark5 = sprintf('Sammendrag av resultater');
writematrix('Sammendrag av resultater', 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'A1:A2')

writecell({' 'Vedlikeholdsintervall [dager] - Alle hjulradier' 'Vedlikeholdsintervall [dager] - Alle hjulradier' 'Vedlikeholdsintervall [km] - Alle hjulr;
writecell({'Antall måleintervaller' 'Gjennomsnitt' 'Standardavvik' 'Gjennomsnitt' 'Standardavvik'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range',
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'}, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'B4:B8')
writematrix(permute(AntMalinge_Dager_mellom_dreieing, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'C4:C8')
writematrix(permute(Gj_Dager_mellom_dreieing, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'D4:D8')
writematrix(permute(Std_Dager_mellom_dreieing, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'E4:E8')
writematrix(permute(Gj_km_mellom_dreieing, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'F4:F8')
writematrix(permute(Std_km_mellom_dreieing, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'G4:G8')

writecell({' 'Vedlikeholdsintervall [dager] - Nyprofil (870mm)' 'Vedlikeholdsintervall [dager] - Nyprofil (870mm)' 'Vedlikeholdsintervall [km] - Nyprofil
writecell({'Antall måleintervaller' 'Gjennomsnitt' 'Standardavvik' 'Gjennomsnitt' 'Standardavvik'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range',
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'}, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'B12:B16')
writematrix(permute(AntMalinge_Dager_mellom_dreieing_870, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'C12:C16')
writematrix(permute(Gj_Dager_mellom_dreieing_870, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'D12:D16')
writematrix(permute(Std_Dager_mellom_dreieing_870, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'E12:E16')
writematrix(permute(Gj_km_mellom_dreieing_870, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'F12:F16')
writematrix(permute(Std_km_mellom_dreieing_870, [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'G12:G16')

writecell({'Målinger nyprofil (870mm) [dager]' 'Målinger nyprofil (870mm) [dager]'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'D18:F18')
writecell({'Rute 1' 'Rute 2'}, 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'D19:F19')
writematrix(permute(sort(Dager_mellom_dreieing_870{1}), [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'D20:D300')
writematrix(permute(sort(Dager_mellom_dreieing_870{2}), [2 1]), 'Resultat_hjulslitasje_tabell.xls', 'Sheet', 6, 'Range', 'E20:E300')

Resultatfil_er_generert = Resultat_lagret
toc
end

```

Warning: Column headers from the file were modified to make them valid MATLAB identifiers before creating variable names for the table. The original column headers are saved in the VariableDescriptions property.
Set 'VariableNamingRule' to 'preserve' to use the original column headers as table variable names.

INNDATA =

22233x8 table

assetnum	measurementid	metername	measurementvalue	M_ledato	Dagrnr	Materiell	Kunde
24771	48509	{'DIAH'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	49585	{'DIAH'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	50733	{'DIAH'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	56395	{'DIAH'}	828.8	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72286	{'DIAH'}	828.6	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83255	{'DIAH'}	828.4	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0923e+05	{'DIAH'}	824.8	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'DIAH'}	806	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.3531e+05	{'DIAH'}	871	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	49047	{'DIAV'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	50124	{'DIAV'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	51289	{'DIAV'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	56394	{'DIAV'}	829.8	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72285	{'DIAV'}	829.4	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83254	{'DIAV'}	828.8	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	

45905	80870	{ 'FLTH' }	30	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45905	1.2993e+05	{ 'FLTH' }	29.9	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45905	1.6261e+05	{ 'FLTH' }	28.5	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45905	1.8713e+05	{ 'FLTH' }	30.8	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45905	2.2142e+05	{ 'FLTH' }	29	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45905	2.3281e+05	{ 'FLTH' }	30	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45905	80871	{ 'FLTS' }	60	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45905	1.2994e+05	{ 'FLTS' }	59.9	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45905	1.6262e+05	{ 'FLTS' }	57	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45905	1.8713e+05	{ 'FLTS' }	61.5	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45905	2.2142e+05	{ 'FLTS' }	58	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45905	2.3281e+05	{ 'FLTS' }	60	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45905	80869	{ 'FLTV' }	30	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45905	1.2993e+05	{ 'FLTV' }	30	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45905	1.6261e+05	{ 'FLTV' }	28.5	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45905	1.8713e+05	{ 'FLTV' }	30.7	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45905	2.2142e+05	{ 'FLTV' }	29	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45905	2.3281e+05	{ 'FLTV' }	30	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45905	80875	{ 'QRH' }	12.2	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45905	1.2994e+05	{ 'QRH' }	11	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45905	1.6262e+05	{ 'QRH' }	10.5	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45905	1.8714e+05	{ 'QRH' }	10.6	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45905	2.2143e+05	{ 'QRH' }	10	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45905	2.3282e+05	{ 'QRH' }	12	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45905	80874	{ 'QRV' }	12.2	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45905	1.2994e+05	{ 'QRV' }	11.3	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45905	1.6262e+05	{ 'QRV' }	10.3	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45905	1.8713e+05	{ 'QRV' }	10.8	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45905	2.2142e+05	{ 'QRV' }	9.8	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45905	2.3282e+05	{ 'QRV' }	12	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80868	{ 'DIAH' }	871	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'DIAH' }	872.6	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'DIAH' }	870	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8713e+05	{ 'DIAH' }	873.2	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2142e+05	{ 'DIAH' }	871	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.3281e+05	{ 'DIAH' }	857.8	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80867	{ 'DIAV' }	871	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'DIAV' }	872.6	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'DIAV' }	870	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8713e+05	{ 'DIAV' }	873.2	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2142e+05	{ 'DIAV' }	871.4	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.3281e+05	{ 'DIAV' }	857.3	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80864	{ 'FLHH' }	30	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'FLHH' }	29.2	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'FLHH' }	30.5	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8712e+05	{ 'FLHH' }	28.9	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2142e+05	{ 'FLHH' }	30	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.3281e+05	{ 'FLHH' }	30	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80863	{ 'FLHV' }	30	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'FLHV' }	29.2	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'FLHV' }	30.5	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8712e+05	{ 'FLHV' }	28.9	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2141e+05	{ 'FLHV' }	29.8	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.3281e+05	{ 'FLHV' }	30	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80861	{ 'FLTH' }	30	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2992e+05	{ 'FLTH' }	30.1	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.626e+05	{ 'FLTH' }	28.7	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8712e+05	{ 'FLTH' }	30.9	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2141e+05	{ 'FLTH' }	29	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.328e+05	{ 'FLTH' }	30	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80862	{ 'FLTS' }	60	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'FLTS' }	60.2	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'FLTS' }	57.3	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8712e+05	{ 'FLTS' }	61.8	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2141e+05	{ 'FLTS' }	57.7	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.328e+05	{ 'FLTS' }	60	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80860	{ 'FLTV' }	30	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2992e+05	{ 'FLTV' }	30.1	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.626e+05	{ 'FLTV' }	28.6	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8712e+05	{ 'FLTV' }	30.9	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2141e+05	{ 'FLTV' }	28.7	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.328e+05	{ 'FLTV' }	30	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80866	{ 'QRH' }	12.2	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'QRH' }	11.3	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'QRH' }	10.7	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8713e+05	{ 'QRH' }	10.9	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2142e+05	{ 'QRH' }	10	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.3281e+05	{ 'QRH' }	12	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }
45906	80865	{ 'QRV' }	12.2	02-Dec-2020	2162	{ 'TP73' }
45906	1.2993e+05	{ 'QRV' }	11.3	08-Apr-2021	2289	{ 'TP73' }
45906	1.6261e+05	{ 'QRV' }	10.6	10-Jul-2021	2382	{ 'TP73' }
45906	1.8712e+05	{ 'QRV' }	11	23-Sep-2021	2457	{ 'TP73' }
45906	2.2142e+05	{ 'QRV' }	9.6	16-Dec-2021	2541	{ 'TP73' }
45906	2.3281e+05	{ 'QRV' }	12	18-Jan-2022	2574	{ 'TP73' }

Elapsed time is 176.303353 seconds.

Resultatfil_er_generert =

'Fil: Resultat_hjulsitasje_tabell.xls, generert 14-May-2022 12:21:56'

Elapsed time is 298.604926 seconds.


```

function Slitasje_hjul = H_slit
tic

%HEADING AV INNDATA
INNDATA = readtable('Slitasje - Individbytter og hjuldata Type 73.xlsx','Sheet','Maalingen','Range','A1:H22234')
DagligKM = [ ]; % = [Rute 1, Rute 2, Rute 3, Rute 4]

%Definisjon av grunnvariabler
mal = {'Individnr' 'MålingsID' 'Meternavn' 'Målingsverdi' 'Måledato' 'Dagnr.' 'Materiell' 'Kunde'};

for n = 1:4
Rute(n).a = mal;
end

%Oppsplitting av tabellen INNDATA i 4 tabeller, en for hver rute. (pluss evt. rest som ikke tilhører noen av rutene)
for z = 1:size(INNDATA);

for k = 1:8

f = INNDATA{z,k};

if isnumeric(f) == 0
f = char(f);
end

B{1, k} = f;
end

p = B{1, 8};

if p == 10662
Rute(1).a(end+1,:) = B;
elseif p == 10750
Rute(2).a(end+1,:) = B;
elseif p == 10067 & B{1, 6} >= 1886 %dag >= 1. mars (altså f.o.m. 1. mars 2020)
Rute(3).a(end+1,:) = B;
elseif p == 10067 & B{1, 6} < 1886 %dag < 1. mars (altså frem til 1. mars 2020)
Rute(4).a(end+1,:) = B;
else
str = sprintf('Data fra kunde %d er representert i rådatafilen "Slitasje - Individbytter og hjuldata Type 73.xlsx", men inngår ikke i analysen');
end

end

%
%Forming av struktur

for s = 1:4

dkM = DagligKM(s);
r(s).DREID_dgr_max = [];
r(s).DREID_dgr_max_870 = [];

r(s).X_flt = [];
r(s).Y_flt = [];

r(s).X_f1h = [];
r(s).Y_f1h = [];

r(s).X_qr = [];
r(s).Y_qr = [];

r(s).X_DDIA = [];
r(s).Y_DDIA = [];

Individer = unique(cell2mat(Rute(s).a(2:end,1)));

for j = 1:length(Individer)
r(s).i(j).hjulsatsnr = Individer(j);

U = [];
for x = 2:length(Rute(s).a(:,1))

if Rute(s).a{x,1} == Individer(j)
U(end+1) = Rute(s).a{x,6};
end

end

Drd = 0;
%Definering av liste for individet med unilke kontrolldatoer
r(s).i(j).kdatoer = unique(U);

%Opprettelse av undersøkelser for hjulsettet basert på listen kdatoer
for v = 1:length(r(s).i(j).kdatoer)

```

```

r(s).i(j).u(v).dagnr = r(s).i(j).kdatoer(v);
r(s).i(j).u(v).lokaldagnr = r(s).i(j).u(v).dagnr - r(s).i(j).kdatoer(1);
%Dagspikret = r(s).i(j).u(v).dagnr

r(s).i(j).u(v).DIAH = [];
r(s).i(j).u(v).DIAV = [];
r(s).i(j).u(v).FLHH = [];
r(s).i(j).u(v).FLHV = [];
r(s).i(j).u(v).FLTH = [];
r(s).i(j).u(v).FLTV = [];
r(s).i(j).u(v).QRH = [];
r(s).i(j).u(v).QRV = [];

r(s).i(j).u(v).DREID = [];
r(s).i(j).u(v).DREID_dgr = [];
r(s).i(j).u(v).DREID_km = [];
r(s).i(j).u(v).DREID_diah0 = [];
r(s).i(j).u(v).DREID_diahD = [];

%Går gjennom listen med alle målinger fra respektiv
%rute. For elementer der hjulsatsnr. og kdato
%samsvarer hentes måleverdi til strukten.
for Maling = 2:size(Rute(s).a)

    if Rute(s).a{Maling,1} == r(s).i(j).hjulsatsnr(1) && Rute(s).a{Maling,6} == r(s).i(j).u(v).dagnr(1)
        if strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'DIAH') == 1;
            r(s).i(j).u(v).DIAH = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'DIAV') == 1;
            r(s).i(j).u(v).DIAV = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'FLHH') == 1;
            r(s).i(j).u(v).FLHH = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'FLHV') == 1;
            r(s).i(j).u(v).FLHV = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'FLTH') == 1;
            r(s).i(j).u(v).FLTH = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'FLTV') == 1;
            r(s).i(j).u(v).FLTV = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'QRH') == 1;
            r(s).i(j).u(v).QRH = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        elseif strcmp(char(Rute(s).a{Maling,3}), 'QRV') == 1;
            r(s).i(j).u(v).QRV = cell2mat(Rute(s).a{Maling,4});
        end
    end

end

%Loggfører endringer siden sist dreieing
if Drd > 0;
    r(s).i(j).u(v).DREID_dgr = r(s).i(j).u(v).lokaldagnr - r(s).i(j).u(Drd).lokaldagnr;
    r(s).i(j).u(v).DREID_km = r(s).i(j).u(v).DREID_dgr * dKM;
    r(s).i(j).u(v).DREID_diah0 = r(s).i(j).u(Drd).DIAH;
    r(s).i(j).u(v).DREID_diahD = r(s).i(j).u(v).DIAH - r(s).i(j).u(v).DREID_diah0;

end

if isempty(r(s).i(j).u(v).DIAH) == 0

    %sjekker 30.0-30.0-30.0-12.0-12.0 / 30.0-30.0-30.0-12.2-12.2
    NP = 0;
    if isempty(r(s).i(j).u(v).FLHH) == 0 && isempty(r(s).i(j).u(v).FLHV) == 0 && isempty(r(s).i(j).u(v).FLTH) == 0 && isempty(
        if r(s).i(j).u(v).FLHH == 30 && r(s).i(j).u(v).FLHV == 30 && r(s).i(j).u(v).FLTH == 30 && r(s).i(j).u(v).FLTV == 30 &&
            NP = 1;
        end
    end

    if v == 1 || isempty(r(s).i(j).u(v-1).DIAH) == 1

        if r(s).i(j).u(v).DIAH >= 870 || NP == 1
            r(s).i(j).u(v).DREID = 'x';
            Drd = v;
        end

    else

        DeltaDIAH = r(s).i(j).u(v).DIAH - r(s).i(j).u(v-1).DIAH;
        if isempty(DeltaDIAH) == 0
            DeltaDagDIAH = DeltaDIAH/(r(s).i(j).u(v).lokaldagnr - r(s).i(j).u(v-1).lokaldagnr);
            if (30*DeltaDagDIAH < -3 && DeltaDIAH < -4) || DeltaDIAH > 10 || NP == 1;
                r(s).i(j).u(v).DREID = 'x';
                r(s).i(j).u(v).DREID_diahD = [];

            if Drd > 0;
                r(s).DREID_dgr_max{end+1} = r(s).i(j).u(v).DREID_dgr;
                if r(s).i(j).u(v).DREID_diah0 >= 870
                    r(s).DREID_dgr_max_870{end+1} = r(s).i(j).u(v).DREID_dgr;
                end
            end
        end
    end
end

```



```

end
%

%Oppsummering av struktens dimensjoner
Antall_ruter = size(r,2);
Antall_individer_per_rute = [size(r(1).i,2), size(r(2).i,2), size(r(3).i,2), size(r(4).i,2)];

Antall_kontroller_per_ind = {};
Antall_kontroller_per_indM = zeros(max(Antall_individer_per_rute), 4);
for ss = 1:4
    for jj = 1:Antall_individer_per_rute(ss)
        Antall_kontroller_per_ind{jj, ss} = size(r(ss).i(jj).u,2);
        Antall_kontroller_per_indM(jj, ss) = size(r(ss).i(jj).u,2);
    end
end

Antall_kontroller_per_rute = sum(Antall_kontroller_per_indM,1);
Antall_kontroller_totalt = sum(Antall_kontroller_per_rute);

%Sammendrag av resultater

Dager_mellom_dreiring = {};
AntMalinge_Dager_mellom_dreiring = [];
Gj_Dager_mellom_dreiring = [];
Std_Dager_mellom_dreiring = [];

Dager_mellom_dreiring_870 = {};
AntMalinge_Dager_mellom_dreiring_870 = [];
Gj_Dager_mellom_dreiring_870 = [];
Std_Dager_mellom_dreiring_870 = [];

for ss = 1:4
    Dager_mellom_dreiring{ss} = cell2mat(r(ss).DREID_dgr_max);
    AntMalinge_Dager_mellom_dreiring(ss) = numel(Dager_mellom_dreiring{ss});
    Gj_Dager_mellom_dreiring(ss) = mean(Dager_mellom_dreiring{ss});
    Std_Dager_mellom_dreiring(ss) = std(Dager_mellom_dreiring{ss});

    Dager_mellom_dreiring_870{ss} = cell2mat(r(ss).DREID_dgr_max_870);
    AntMalinge_Dager_mellom_dreiring_870(ss) = numel(Dager_mellom_dreiring_870{ss});
    Gj_Dager_mellom_dreiring_870(ss) = mean(Dager_mellom_dreiring_870{ss});
    Std_Dager_mellom_dreiring_870(ss) = std(Dager_mellom_dreiring_870{ss});
end

Gj_km_mellom_dreiring = Gj_Dager_mellom_dreiring.*DagligKM;
Std_km_mellom_dreiring = Std_Dager_mellom_dreiring.*DagligKM;
Gj_km_mellom_dreiring_870 = Gj_Dager_mellom_dreiring_870.*DagligKM;
Std_km_mellom_dreiring_870 = Std_Dager_mellom_dreiring_870.*DagligKM;

%
toc
%PLOTING AV PARAMETER SOM FUNKSJON AV TILBAKELAGT AVSTAND I KM

x_1 = (r(1).X_flt ./ 1000);
y_1 = r(1).Y_flt;
p_1 = polyfit(x_1,y_1,3);
x2_1 = 1:1:68.0;
y2_1 = polyval(p_1,x2_1);

x_2 = (r(2).X_flt ./ 1000);
y_2 = r(2).Y_flt;
p_2 = polyfit(x_2,y_2,3);
x2_2 = 1:1:97.7;
y2_2 = polyval(p_2,x2_2);

ax1 = nexttile;
plot(x2_1,y2_1, x2_2,y2_2, x_1,y_1, '.', x_2,y_2, '.')
title(ax1,'Flenstykkelens utvikling med økende kjørelengde')
xlabel(ax1,'Kjørelengde siden hjuldreiring [1000 km]')
ylabel(ax1,'FLT [mm]', 'FontSize', 12)
yline(22.0,'-', 'Min. flenstykkel', 'FontSize', 11);
yline(33.0,'-', 'Maks. flenstykkel', 'FontSize', 11);

legend('Rute 1', 'Rute 2', 'Målinger Rute 1', 'Målinger Rute 2', 'FontSize', 1, 'Location','northeast')
grid on
drawnow

N_punkter_1 = size(r(1).X_flt)
N_punkter_2 = size(r(2).X_flt)

FLT_1 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_1(1),p_1(2),p_1(3),p_1(4))
FLT_2 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_2(1),p_2(2),p_2(3),p_2(4))

x_1 = (r(1).X_flt ./ 1000);

```

```

y_1 = r(1).Y_flh;
p_1 = polyfit(x_1,y_1,3);
x2_1 = 1:1:68.0;
y2_1 = polyval(p_1,x2_1);

x_2 = (r(2).X_flh ./ 1000);
y_2 = r(2).Y_flh;
p_2 = polyfit(x_2,y_2,3);
x2_2 = 1:1:97.7;
y2_2 = polyval(p_2,x2_2);

ax1 = nexttile;
plot(x2_1,y2_1, x2_2,y2_2, x_1,y_1,'.', x_2,y_2, '.')
title(ax1,'Flenshøydens udvikling med økende kjørelegde')
xlabel(ax1,'Kjørelegde siden hjuldreing [1000 km]')
ylabel(ax1,'FLH [mm]', 'FontSize', 12)
yline(27.5,'-','Min. flenshøide', 'FontSize', 11);
yline(36.0,'-','Maks. flenshøide', 'FontSize', 11);

legend('Rute 1', 'Rute 2', 'Målinger Rute 1', 'Målinger Rute 2', 'FontSize', 1, 'Location','northeast')
grid on
drawnow

N_punkter_1 = size(r(1).X_flh)
N_punkter_2 = size(r(2).X_flh)

FLH_1 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_1(1),p_1(2),p_1(3),p_1(4))
FLH_2 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_2(1),p_2(2),p_2(3),p_2(4))

x_1 = (r(1).X_qr ./ 1000);
y_1 = r(1).Y_qr;
p_1 = polyfit(x_1,y_1,3);
x2_1 = 1:1:68.0;
y2_1 = polyval(p_1,x2_1);

x_2 = (r(2).X_qr ./ 1000);
y_2 = r(2).Y_qr;
p_2 = polyfit(x_2,y_2,3);
x2_2 = 1:1:97.7;
y2_2 = polyval(p_2,x2_2);

ax1 = nexttile;
plot(x2_1,y2_1, x2_2,y2_2, x_1,y_1,'.', x_2,y_2, '.')
title(ax1,'Tverrmålets udvikling med økende kjørelegde')
xlabel(ax1,'Kjørelegde siden hjuldreing [1000 km]')
ylabel(ax1,'QR [mm]', 'FontSize', 12)
yline(6.5,'-','Min. tverrmål');

legend('Rute 1', 'Rute 2', 'Målinger Rute 1', 'Målinger Rute 2', 'FontSize', 1, 'Location','northeast')
grid on
drawnow

N_punkter_1 = size(r(1).X_qr)
N_punkter_2 = size(r(2).X_qr)

QR_1 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_1(1),p_1(2),p_1(3),p_1(4))
QR_2 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_2(1),p_2(2),p_2(3),p_2(4))

x_1 = (r(1).X_DDIA ./ 1000);
y_1 = r(1).Y_DDIA;
p_1 = polyfit(x_1,y_1,3);
x2_1 = 1:1:68.0;
y2_1 = polyval(p_1,x2_1);

x_2 = (r(2).X_DDIA ./ 1000);
y_2 = r(2).Y_DDIA;
p_2 = polyfit(x_2,y_2,3);
x2_2 = 1:1:97.7;
y2_2 = polyval(p_2,x2_2);

ax1 = nexttile;
plot(x2_1,y2_1, x2_2,y2_2, x_1,y_1,'.', x_2,y_2, '.')
title(ax1,'Endring i diameter med økende kjørelegde')
xlabel(ax1,'Kjørelegde siden hjuldreing [1000 km]')
ylabel(ax1,'\Delta DIA [mm]', 'FontSize', 12)

legend('Rute 1', 'Rute 2', 'Målinger Rute 1', 'Målinger Rute 2', 'FontSize', 1, 'Location','southeast')
grid on
drawnow

N_punkter_1 = size(r(1).X_DDIA)
N_punkter_2 = size(r(2).X_DDIA)

DELTA_DIA_1 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_1(1),p_1(2),p_1(3),p_1(4))
DELTA_DIA_2 = sprintf('y = (%.4f) x^3 + (%.4f) x^2 + (%.4f) x + (%.4f)',p_2(1),p_2(2),p_2(3),p_2(4))

```


%

toc
end

Warning: Column headers from the file were modified to make them valid MATLAB identifiers before creating variable names for the table. The original column headers are saved in the VariableDescriptions property. Set 'VariableNamingRule' to 'preserve' to use the original column headers as table variable names.

INNDATA =

22233x8 table

assetnum	measurementid	metername	measurementvalue	M_ledato	Dagnr_	Materiell	Kunde
24771	48509	{'DIAH'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	49585	{'DIAH'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	50733	{'DIAH'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	56395	{'DIAH'}	828.8	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72286	{'DIAH'}	828.6	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83255	{'DIAH'}	828.4	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0923e+05	{'DIAH'}	824.8	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'DIAH'}	806	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.3531e+05	{'DIAH'}	871	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	49047	{'DIAV'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	50124	{'DIAV'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	51289	{'DIAV'}	826.8	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
24771	56394	{'DIAV'}	829.8	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72285	{'DIAV'}	829.4	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83254	{'DIAV'}	828.8	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0923e+05	{'DIAV'}	825.5	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'DIAV'}	806	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.3531e+05	{'DIAV'}	871	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37337	{'FLHH'}	30.5	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56391	{'FLHH'}	29.5	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72284	{'FLHH'}	29.6	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83251	{'FLHH'}	29.7	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'FLHH'}	31.5	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'FLHH'}	30	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.3531e+05	{'FLHH'}	30	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37336	{'FLHV'}	30.5	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56390	{'FLHV'}	29	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72283	{'FLHV'}	29.2	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83250	{'FLHV'}	29.5	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'FLHV'}	31.1	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'FLHV'}	30	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.353e+05	{'FLHV'}	30	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37334	{'FLTH'}	31.5	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56388	{'FLTH'}	30.5	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72281	{'FLTH'}	31	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83248	{'FLTH'}	28.8	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'FLTH'}	28.7	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2488e+05	{'FLTH'}	30	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.353e+05	{'FLTH'}	30	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37335	{'FLTS'}	63	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56389	{'FLTS'}	60.5	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72282	{'FLTS'}	59.8	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83249	{'FLTS'}	57.3	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'FLTS'}	57.2	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2488e+05	{'FLTS'}	60	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.353e+05	{'FLTS'}	60	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37333	{'FLTV'}	31.5	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56387	{'FLTV'}	30	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	72280	{'FLTV'}	28.8	05-Nov-2020	2135	{'TP73'}	
24771	83247	{'FLTV'}	28.5	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'FLTV'}	28.5	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2488e+05	{'FLTV'}	30	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.353e+05	{'FLTV'}	30	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37339	{'QRH'}	11	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56393	{'QRH'}	11.5	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	83253	{'QRH'}	10.3	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'QRH'}	11	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'QRH'}	12	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.3531e+05	{'QRH'}	12.2	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
24771	37338	{'QRV'}	11	27-Jul-2020	2034	{'TP73'}	
24771	56392	{'QRV'}	11	11-Sep-2020	2080	{'TP73'}	
24771	83252	{'QRV'}	10.2	09-Dec-2020	2169	{'TP73'}	
24771	1.0922e+05	{'QRV'}	11.7	06-Feb-2021	2228	{'TP73'}	
24771	1.2489e+05	{'QRV'}	12	22-Mar-2021	2272	{'TP73'}	
24771	1.3531e+05	{'QRV'}	12.2	24-Apr-2021	2305	{'TP73'}	
26719	48561	{'DIAH'}	835	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
26719	49638	{'DIAH'}	835	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
26719	50640	{'DIAH'}	835	31-Aug-2020	2069	{'TP73'}	
26719	66202	{'DIAH'}	838.4	15-Oct-2020	2114	{'TP73'}	
26719	1.0047e+05	{'DIAH'}	815	10-Jan-2021	2201	{'TP73'}	
26719	1.1944e+05	{'DIAH'}	815	05-Mar-2021	2255	{'TP73'}	
26719	1.583e+05	{'DIAH'}	817.8	27-Jun-2021	2369	{'TP73'}	

45906	1.8712e+05	{'FLTH'}	30.9	23-Sep-2021	2457	{'TP73'}
45906	2.2141e+05	{'FLTH'}	29	16-Dec-2021	2541	{'TP73'}
45906	2.328e+05	{'FLTH'}	30	18-Jan-2022	2574	{'TP73'}
45906	80862	{'FLTS'}	60	02-Dec-2020	2162	{'TP73'}
45906	1.2993e+05	{'FLTS'}	60.2	08-Apr-2021	2289	{'TP73'}
45906	1.6261e+05	{'FLTS'}	57.3	10-Jul-2021	2382	{'TP73'}
45906	1.8712e+05	{'FLTS'}	61.8	23-Sep-2021	2457	{'TP73'}
45906	2.2141e+05	{'FLTS'}	57.7	16-Dec-2021	2541	{'TP73'}
45906	2.328e+05	{'FLTS'}	60	18-Jan-2022	2574	{'TP73'}
45906	80860	{'FLTV'}	30	02-Dec-2020	2162	{'TP73'}
45906	1.2992e+05	{'FLTV'}	30.1	08-Apr-2021	2289	{'TP73'}
45906	1.626e+05	{'FLTV'}	28.6	10-Jul-2021	2382	{'TP73'}
45906	1.8712e+05	{'FLTV'}	30.9	23-Sep-2021	2457	{'TP73'}
45906	2.2141e+05	{'FLTV'}	28.7	16-Dec-2021	2541	{'TP73'}
45906	2.328e+05	{'FLTV'}	30	18-Jan-2022	2574	{'TP73'}
45906	80866	{'QRH'}	12.2	02-Dec-2020	2162	{'TP73'}
45906	1.2993e+05	{'QRH'}	11.3	08-Apr-2021	2289	{'TP73'}
45906	1.6261e+05	{'QRH'}	10.7	10-Jul-2021	2382	{'TP73'}
45906	1.8713e+05	{'QRH'}	10.9	23-Sep-2021	2457	{'TP73'}
45906	2.2142e+05	{'QRH'}	10	16-Dec-2021	2541	{'TP73'}
45906	2.3281e+05	{'QRH'}	12	18-Jan-2022	2574	{'TP73'}
45906	80865	{'QRV'}	12.2	02-Dec-2020	2162	{'TP73'}
45906	1.2993e+05	{'QRV'}	11.3	08-Apr-2021	2289	{'TP73'}
45906	1.6261e+05	{'QRV'}	10.6	10-Jul-2021	2382	{'TP73'}
45906	1.8712e+05	{'QRV'}	11	23-Sep-2021	2457	{'TP73'}
45906	2.2142e+05	{'QRV'}	9.6	16-Dec-2021	2541	{'TP73'}
45906	2.3281e+05	{'QRV'}	12	18-Jan-2022	2574	{'TP73'}

Elapsed time is 172.984980 seconds.

N_punkter_1 =

1 2633

N_punkter_2 =

1 1322

FLT_1 =

$$'y = (-0.0000) x^3 + (0.0007) x^2 + (-0.0667) x + (29.9418)'$$

FLT_2 =

$$'y = (-0.0000) x^3 + (0.0001) x^2 + (-0.0089) x + (29.8525)'$$

N_punkter_1 =

1 2634

N_punkter_2 =

1 1322

FLH_1 =

$$'y = (-0.0000) x^3 + (-0.0000) x^2 + (0.0126) x + (29.9919)'$$

FLH_2 =

$$'y = (0.0000) x^3 + (-0.0000) x^2 + (-0.0008) x + (30.1146)'$$

N_punkter_1 =

1 2633

N_punkter_2 =

1 1292

QR_1 =

$$'y = (-0.0000) x^3 + (0.0008) x^2 + (-0.0752) x + (11.9923)'$$

QR_2 =

$$'y = (-0.0000) x^3 + (0.0002) x^2 + (-0.0273) x + (11.8123)'$$

N_punkter_1 =

1 1928

N_punkter_2 =

1 1155

DELTA_DIA_1 =

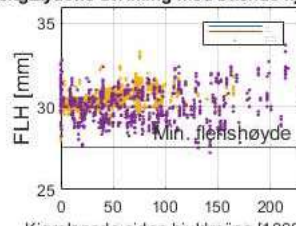
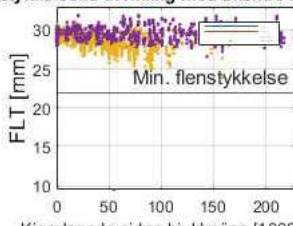
$$y = (0.0000) x^3 + (-0.0010) x^2 + (0.0053) x + (-0.0201)$$

DELTA_DIA_2 =

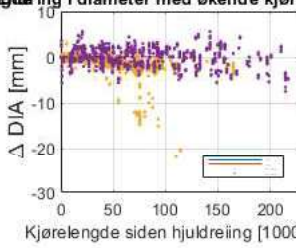
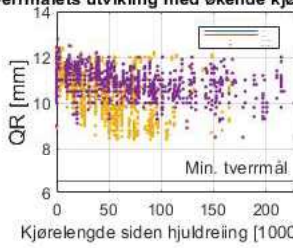
$$y = (-0.0000) x^3 + (0.0001) x^2 + (-0.0040) x + (0.0692)$$

Elapsed time is 174.488762 seconds.

Flenstykkelsens udvikling med økende kjørelengde **Flenshøydens utvikling med økende kjørelengde**



Tverrmålets utvikling med økende kjørelengde **Endring i diameter med økende kjørelengde**



```

function HorizontalSummering_sporgeo = Hsum
tic

%DATAANGIVELSE:
%
%DATAANGIVELSE 1 av 4:
%Definerer hvilken fane i excelflen "Resultat_Horizontal.xls" som resultatet skal overskrive.
fanenr = 2;

%DATAANGIVELSE 2 av 4:
%DEFINERER TILBAKELAGT AVSTAND per DAG [km/dag]
kmDagRute1 = 
kmDagRute2 = 
kmDagRute3A = 
kmDagRute3B = 

%DATAANGIVELSE 3 av 4:
%DEFINERER GJENNOMSITTILIG ANTALL DAGER FØR REPROFILERING [dag]
%N.B. Antallet vil kunne avhenge av hjul diameter.
DgrReprofRute1 = 143.2;
DgrReprofRute2 = 184.3;
DgrReprofRute3A = 262.2;%ANSLAGSVERDI MANTENA (140 000km)
DgrReprofRute3B = 149.3;%ANSLAGSVERDI MANTENA (140 000km)

%DATAANGIVELSE 4 av 4:
%DEFINERER KURVERADIUSINTERVALLER

%fork.:
%IA_rb: Intervall A, radius begynnelse
%IA_rs: Intervall A, radius slutt

%Int A: [0, 200>
IA_rb = 0;
IA_rs = 200;

%Int B: [200, 300>
IB_rb = 200;
IB_rs = 300;

%Int C: [300, 400>
IC_rb = 300;
IC_rs = 400;

%Int D: [400, 500>
ID_rb = 400;
ID_rs = 500;

%Int E: [500, 600>
IE_rb = 500;
IE_rs = 600;

%Int F: [600, 800>
IF_rb = 600;
IF_rs = 800;

%Int G: [800, 1000>
IG_rb = 800;
IG_rs = 1000;

%Int H: [1000, 1500>
IH_rb = 1000;
IH_rs = 1500;

%Int I: [1500, INF>
II_rb = 1500;
II_rs = inf;

%Int J: [INF, INF>
IJ_rb = inf;
IJ_rs = inf;

%Int K: == -1
IK_rb = -1;
IK_rs = -1;

%DATABEARBEIDING:
%
%km-per-dag ruter
kmDAG = permute([kmDagRute1, kmDagRute2, kmDagRute3A, kmDagRute3B],[2 1]);
DgrReprof = permute([DgrReprofRute1, DgrReprofRute2, DgrReprofRute3A, DgrReprofRute3B],[2 1]);

%RADIUS
R_beg = [IA_rb, IB_rb, IC_rb, ID_rb, IE_rb, IF_rb, IG_rb, IH_rb, II_rb, IJ_rb, IK_rb];
R_slutt = [IA_rs, IB_rs, IC_rs, ID_rs, IE_rs, IF_rs, IG_rs, IH_rs, II_rs, IJ_rs, IK_rs];

%Krumning
K_beg = R_beg.^-1;
K_slutt = R_slutt.^-1;

```

```

%DEFINERER SUM-MATRISE, L (for lengde av ulike radier)

%Radiusintervallenes kolonnenr. i matrise L [Int = kolonnenr.]:
%A = 01;
%B = 02;
%C = 03;
%D = 04;
%E = 05;
%F = 06;
%G = 07;
%H = 08;
%I = 09;
%J = 10;
%K = 11;

%Rutenes radnr. i matrise L [Rute = radnr.]:
%Rute 1 = 01;
%Rute 2 = 02;
%Rute 3A = 03;
%Rute 3B = 04;

L = zeros(4,11);

%RUTENR.-LØKKE
rute = 1;

while rute <= 4;

    %HENTING AV INNDATA

    INNDATA = xlsread('Sporgeometri - Rute 1, 2, 3A og 3B.xlsx', rute);

    %GÅR HJENNOM ALLE OBJEKTER OG LEGGER TIL HVER OBJEKTLENGDE I RIKTIG
    %RADIUSINTERVALL
    for q = 1:length(INNDATA)-3;

        %Hent data: INNDATA(rad, kolonne)

        %celleverdi = INNDATA(i+2, 1)

        dist = INNDATA(q+2, 4);

        StartR = INNDATA(q+2, 5);
        SluttR = INNDATA(q+2, 6);

        if StartR == 0
            StartR = inf;
        end
        if SluttR == 0
            SluttR = inf;
        end

        StartK = 1/StartR;
        SluttK = 1/SluttR;

        %Fordeling av L i riktig intervall

        Z = zeros(1,11); % = [a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k]

        if StartR == SluttR;

            for t = 1:9
                if StartK <= K_beg(t) & StartK > K_slutt(t)
                    Z(t) = dist;
                end
            end
            if StartK == K_beg(10)
                Z(10) = dist;
            end
        else

            Spenn = sort([StartK, SluttK]); % = [K_minst, K_størst]
            Delta_k = zeros(1,10);

            for t = 1:10

                % Ingen overlapping, utenfor intervall
                if Spenn(1) >= K_beg(t) | Spenn(2) <= K_slutt(t)
                    Delta_k(t) = 0;

                %Overlapping, berører både øvre og nedre rand
                elseif Spenn(1) <= K_slutt(t) & Spenn(2) >= K_beg(t)
                    Delta_k(t) = K_beg(t)-K_slutt(t);

                %Overlapping, berører kun nedre rand
            end
        end
    end
end

```

```

elseif Spenn(1) <= K_slutt(t) & Spenn(2) <= K_beg(t)
    Delta_k(t) = Spenn(2) - K_slutt(t);

%Overlapping, berører kun øvre rand
elseif Spenn(1) >= K_slutt(t) & Spenn(2) >= K_beg(t)
    Delta_k(t) = K_beg(t) - Spenn(1);

%Overlapping, berører ingen rand
elseif Spenn(1) >= K_slutt(t) & Spenn(2) <= K_beg(t)
    Delta_k(t) = Spenn(2) - Spenn(1);
end

end

Krumningsdiff = Delta_k;
Krumsum = sum(Delta_k);

Krumningpros = Delta_k / Krumsum;

Z = Krumningpros * dist;
Z(11)=0;

end

%Loggføring

z=1;
while z <= 11

    L(rute,z) = L(rute,z) + Z(z);

    z = z+1;
end

q = q+1;

end

```

```

rute = rute + 1;
end

```

```

Banekm_strekning_fordeling = L
TotL = sum(L,2);
Banekm_strekning_tot = TotL

```

```

N_pros = L./TotL;
Banekm_strekning_andel = N_pros * 100

```

```

TogkmDAG = kmDAG
TogkmDAG_fordeling = N_pros .* kmDAG
TogkmReprof_fordeling = TogkmDAG_fordeling .* DgrReprof;

```

```

%TotM_km_dag = sum(TogkmDAG_fordeling,2)
%TotM = sum(Banekm_strekning_andel,2)

```

```
%DATAFREMSTILLING FIL:
```

```
%
```

```
%SKRIV RESULTAT TIL EXCELFIL
```

```

Resultat_lagret = sprintf('Filnavn: Resultat_Horisontal, Fane: %d, Dato: %s', fanenr, datestr(datetime('now')))
writematrix(Resultat_lagret, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'A1:A2')

```

```

writecell(permute({'Intervall' 'f.o.m. R' 'til R'},[2 1]), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B3:B6')
writecell({'A' 'B' 'C' 'D' 'E' 'F' 'G' 'H' 'I' 'J' 'K' ' ' 'Sum A-K'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'C3:O4')
writematrix(R_beg, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'C4:M5')
writematrix(R_slutt, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'C5:M6')

```

```

writecell({'Andel av ruten innenfor de ulike radiusintervallene [%]'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B7:B8')
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B8:B12')
writematrix(Banekm_strekning_andel, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'C8:M12')
writematrix(sum(Banekm_strekning_andel,2), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'O8:O12')

```

```

writecell({'Avstand tilbakelagt per dag innenfor de ulike radiusintervallene [km]'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B13:B14')
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B14:B18')
writematrix(TogkmDAG_fordeling, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'C14:M18')
writematrix(sum(TogkmDAG_fordeling,2), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'O14:O18')

```

```

writecell({'Avstand tilbakelagt før reprofilerer innenfor de ulike radiusintervallene [km]'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B19:B20')
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'B20:B24')
writematrix(TogkmReprof_fordeling, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'C20:M24')
writematrix(sum(TogkmReprof_fordeling,2), 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'O20:O24')

```

```
%SKRIV INNDATA TIL EXCELFIL
```

```

writecell({'Inndata for analyse'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'U7:U8')
writecell({'Rutenavn'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'U8:U9')
writecell({'km/dag'}, 'Resultat_Horisontal.xls', 'Sheet', fanenr, 'Range', 'V8:V9')

```

```

writecell({'dgn mellom reprof.'}, 'Resultat_Horisontal.xls','Sheet', fanenn,'Range','W8:W9')

writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Horisontal.xls','Sheet', fanenn,'Range','U9:U13')
writematrix(kmDAG, 'Resultat_Horisontal.xls','Sheet', fanenn,'Range','V9:V13')
writematrix(DgrReprof, 'Resultat_Horisontal.xls','Sheet', fanenn,'Range','W9:W13')
writecell({'Fil: Spongeometri - Rute 1, 2, 3A og 3B.xlsx'}, 'Resultat_Horisontal.xls','Sheet', fanenn,'Range','U14:U15')

%DATAFREMSTILLING DIAGRAM
%
%UTPLUKKING AV DATA

%kutter bort rader (ruter)
NkuttTak = 0;
NkuttGulv = 1;

%kutter bort kolonner (intervaller)
NkuttVenstre = 1;
NkuttHoyre = 1;

R_beg_2 = R_beg(:,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
R_slutt_2 = R_slutt(:,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);

Banekm_strekning_andel_2 = Banekm_strekning_andel(1+NkuttTak:end-NkuttGulv,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
TogkmDAG_fordeling_2 = TogkmDAG_fordeling(1+NkuttTak:end-NkuttGulv,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
TogkmReprof_fordeling_2 = TogkmReprof_fordeling(1+NkuttTak:end-NkuttGulv,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);

Tegnfn = {'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'};
Tegnfn = Tegnfn(:,1+NkuttTak:end-NkuttGulv);

for n = 1:length(R_beg_2)
    AksX{n} = sprintf('%d-%d', R_beg_2(n), R_slutt_2(n)-1);
end

%Modifikasjon navn spesialintervaller
AksX{end} = sprintf('Rettlinje');
AksX{end-1} = sprintf('≥%d', R_beg_2(end-1));

%Tegner diagram for andel av strekning innenfor intervaller
x = categorical(AksX);
x = reordercats(x,AksX);
y = permute(Banekm_strekning_andel_2,[2 1]);

figure(1)
bar(x,y)
title('Rutenes horisontalkurvefordeling')
legend(Tegnfn, 'Location','northwest')
xlabel('Radius [m]')
ylabel('Andel av rute [%]')

%Tegner diagram for tilbakelagte km/dag innenfor intervaller

z = permute(TogkmDAG_fordeling_2,[2 1]);

figure(2)
bar(x,z)
title('Daglig kjørelengde fordelt over horisontalkurvatur')
legend(Tegnfn, 'Location','northwest')
xlabel('Radius [m]')
ylabel('Tilbakelagt avstand [km]')

%Tegner diagram for tilbakelagte km før reprofilering innenfor intervaller

z = permute((TogkmReprof_fordeling_2 ./ 1000),[2 1]);

figure(3)
bar(x,z)
title('Kjørelengde før reprofilering fordelt over horisontalkurvatur')
legend(Tegnfn, 'Location','northwest')
xlabel('Radius [m]')
ylabel('Tilbakelagt avstand [1000 km]')

toc
end

```

Banekm_strekning_fordeling =

Columns 1 through 7

0.0161	12.1210	78.1157	42.0970	35.7372	40.3196	29.9881
0.0350	23.1961	29.9730	26.3237	23.2740	34.7364	22.2662
0.0093	6.5785	11.7366	7.9886	4.3307	12.0006	7.3708
0.0093	6.5785	12.0842	8.7081	5.2499	12.7538	8.1393

Columns 8 through 11

48.1819	132.1966	167.5231	0
61.2681	187.4885	140.8173	0
13.2250	56.5111	46.7534	0
14.4933	70.3764	63.6512	0

Banekm_strekning_tot =

586.2964
549.3784
166.5044
202.0440

Banekm_strekning_andel =

Columns 1 through 7

0.0028	2.0674	13.3236	7.1802	6.0954	6.8770	5.1148
0.0064	4.2222	5.4558	4.7916	4.2364	6.3228	4.0530
0.0056	3.9509	7.0488	4.7978	2.6009	7.2074	4.4268
0.0046	3.2560	5.9810	4.3100	2.5984	6.3124	4.0285

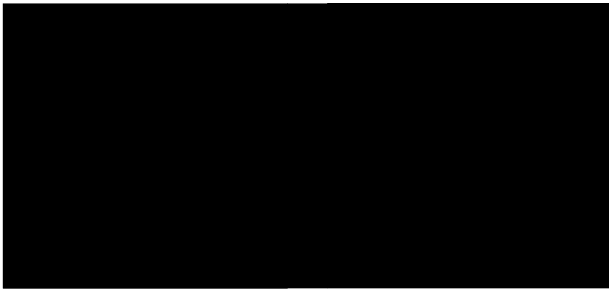
Columns 8 through 11

8.2180	22.5477	28.5731	0
11.1523	34.1274	25.6321	0
7.9427	33.9397	28.0794	0
7.1734	34.8322	31.5036	0

TogkmDAG =



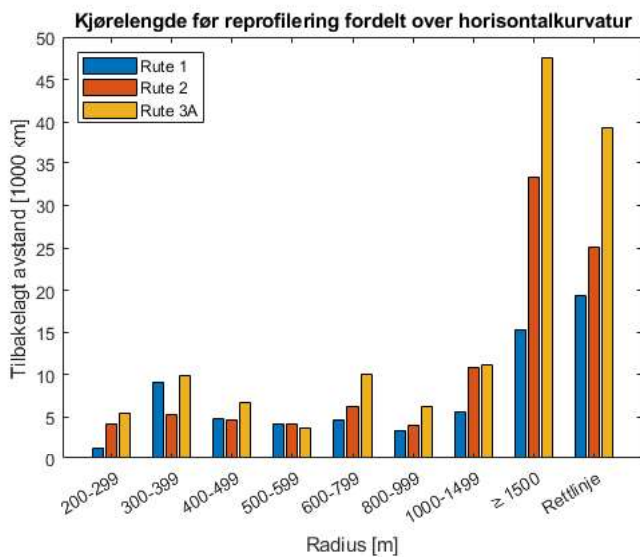
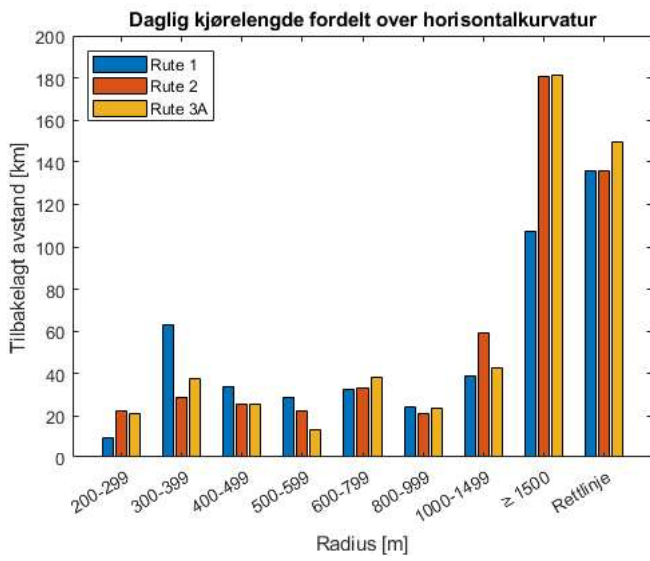
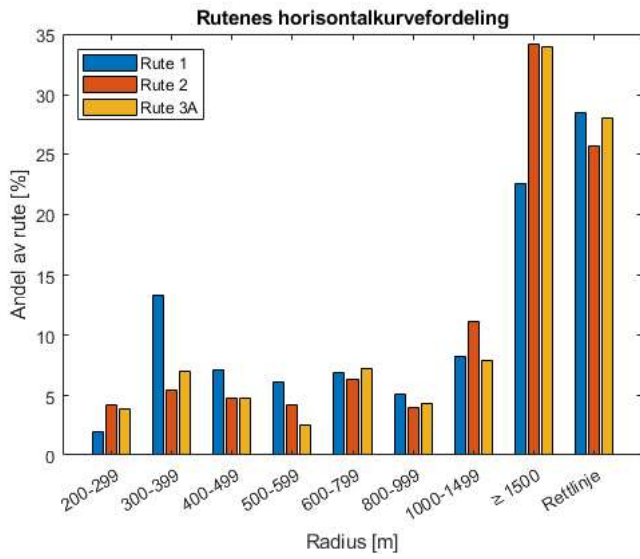
TogkmDAG_fordeling =



Resultat_lagret =

'Filnavn: Resultat_Horisontal, Fane: 2, Dato: 14-May-2022 12:15:11'

Elapsed time is 5.236164 seconds.



```
function HorizontalSummering_sporgeo = Hsum
tic
```

```
%DATAANGIVELSE:
```

```
%
```

```
%DATAANGIVELSE 1 av 4:
%Definerer hvilken fane i excel-filen "Resultat_Vertikal.xls" som resultatet skal overskrive.
fanenr = 2;
```

```
%DATAANGIVELSE 2 av 4:
%DEFINERER TILBAKELAGT AVSTAND per DAG [km/dag]
kmDagRute1 = 
kmDagRute2 = 
kmDagRute3A = 
kmDagRute3B =
```

```
%DATAANGIVELSE 3 av 4:
%DEFINERER GJENNOMSITTILIG ANTALL DAGER FØR REPROFILERING [dag]
%N.B. Antallet vil kunne avhenge av hjul diameter.
DgrReprofRute1 = 143.2;
DgrReprofRute2 = 184.3;
DgrReprofRute3A = 262.2;%ANSLAGSVERDI MANTENA (140 000km)
DgrReprofRute3B = 149.3;%ANSLAGSVERDI MANTENA (140 000km)
```

```
%DATAANGIVELSE 4 av 4:
%DEFINERER KURVERADIUSINTERVALLER
```

```
%fork.:
%IA_rb: Intervall A, radius begynnelse
%IA_rs: Intervall A, radius slutt
```

```
%Int A: 0
IA_sb = 0;
IA_ss = 0;
```

```
%Int B: <0, 2,5>
IB_sb = 0;
IB_ss = 2.5;
```

```
%Int C: [2,5, 5,0>
IC_sb = 2.5;
IC_ss = 5.0;
```

```
%Int D: [5,0, 7,5>
ID_sb = 5.0;
ID_ss = 7.5;
```

```
%Int E: [7,5, 10>
IE_sb = 7.5;
IE_ss = 10;
```

```
%Int F: [10, 12,5>
IF_sb = 10;
IF_ss = 12.5;
```

```
%Int G: [12,5, 15>
IG_sb = 12.5;
IG_ss = 15;
```

```
%Int H: [15, 17,5>
IH_sb = 15;
IH_ss = 17.5;
```

```
%Int I: [17,5, 20>
II_sb = 17.5;
II_ss = 20;
```

```
%Int J: >=20
IJ_sb = 20;
IJ_ss = inf;
```

```
%Int K:
IK_sb = -1;
IK_ss = -1;
```

```
%DATABEARBEIDING:
```

```
%
```

```
%km-per-dag samt dgr-før-reprofilering - Ruter
kmDAG = permute([kmDagRute1, kmDagRute2, kmDagRute3A, kmDagRute3B],[2 1]);
DgrReprof = permute([DgrReprofRute1, DgrReprofRute2, DgrReprofRute3A, DgrReprofRute3B],[2 1]);
```

```
%RADIUS
S_beg = [IA_sb, IB_sb, IC_sb, ID_sb, IE_sb, IF_sb, IG_sb, IH_sb, II_sb, IJ_sb, IK_sb];
S_slutt = [IA_ss, IB_ss, IC_ss, ID_ss, IE_ss, IF_ss, IG_ss, IH_ss, II_ss, IJ_ss, IK_ss];
```

```
%DEFINERER SUM-MATRISSE, L (for lengde av ulike radier)
```

```

%Radiusintervallenes kolonnenr. i matrise L [Int = kolonnenr.]:
%A = 01;
%B = 02;
%C = 03;
%D = 04;
%E = 05;
%F = 06;
%G = 07;
%H = 08;
%I = 09;
%J = 10;
%K = 11;

%Rutenes radnr. i matrise L [Rute = radnr.]:
%Rute 1 = 01;
%Rute 2 = 02;
%Rute 3A = 03;
%Rute 3B = 04;

L = zeros(4,11);

%RUTENR.-LØKKE
rute = 1;

while rute <= 4;

    %HENTING AV INNDATA

    INNDATA = xlsread('Sporgeometri - Rute 1, 2, 3A og 3B.xlsx', rute+5);

    %GÅR HJENNOM ALLE OBJEKTER OG LEGGER TIL HVER OBJEKTLENGDE I RIKTIG
    %RADIUSINTERVALL
    for q = 1:length(INNDATA)-3;

        %Hent data: INNDATA(rad, kolonne)

        %celle verdi = INNDATA(i+2, 1)

        dist = INNDATA(q+2, 4);
        Stig = INNDATA(q+2, 7);

        %Fordeling av L i riktig intervall

        Z = zeros(1,11); % = [a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k]

        if Stig == 0
            Z(1) = dist;
        elseif Stig > S_beg(2) & Stig < S_slutt(2)
            Z(2) = dist;
        end

        for t = 3:11
            if Stig >= S_beg(t) & Stig < S_slutt(t);
                Z(t) = dist;
            end
        end

        %Loggføring

        z=1;
        while z <= 11

            L(rute,z) = L(rute,z) + Z(z);

            z = z+1;
        end

        q = q+1;
    end

    rute = rute + 1;
end

Banekm_strekning_fordeling = L
TotL = sum(L,2);
Banekm_strekning_tot = TotL

N_pros = L./TotL;
Banekm_strekning_andel = N_pros * 100

TogkmDAG = kmDAG
TogkmDAG_fordeling = N_pros .* kmDAG

```

```
TogkmReprof_fordeling = TogkmDAG_fordeling .* DgrReprof;
```

```
%TotM_km_dag = sum(TogkmDAG_fordeling,2)
```

```
%TotM = sum(Banekm_strekning_andel,2)
```

```
%DATAFREMSTILLING FIL:
```

```
%
```

```
%SKRIV RESULTAT TIL EXCELFIL
```

```
Resultat_lagret = sprintf('Filnavn: Resultat_Vertikal, Fane: %d, Dato: %s', fanennr, datestr(datetime('now')))
writematrix(Resultat_lagret, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'A1:A2')
```

```
writecell(permute({'Intervall' 'f.o.m. S' 'til S'},[2 1]), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B3:B6')
writecell({'A' 'B' 'C' 'D' 'E' 'F' 'G' 'H' 'I' 'J' 'K' ' ' 'Sum A-K'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'C3:O4')
writematrix(S_beg, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'C4:M5')
writematrix(S_slutt, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'C5:M6')
```

```
writecell({'Andel av ruten innenfor de ulike stigningsintervallene [%]'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B7:B8')
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B8:B12')
writematrix(Banekm_strekning_andel, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'C8:M12')
writematrix(sum(Banekm_strekning_andel,2), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'O8:O12')
```

```
writecell({'Avstand tilbakelagt per dag innenfor de ulike stigningsintervallene [km]'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B13:B14')
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B14:B18')
writematrix(TogkmDAG_fordeling, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'C14:M18')
writematrix(sum(TogkmDAG_fordeling,2), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'O14:O18')
```

```
writecell({'Avstand tilbakelagt før reprofiling innenfor de ulike stigningsintervallene [km]'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B19:B20')
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'B20:B24')
writematrix(TogkmReprof_fordeling, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'C20:M24')
writematrix(sum(TogkmReprof_fordeling,2), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'O20:O24')
```

```
%SKRIV INNDATA TIL EXCELFIL
```

```
writecell({'Inndata for analyse'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'U7:U8')
writecell({'Rutenavn'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'U8:U9')
writecell({'km/dag'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'V8:V9')
writecell({'dgr mellom reprof.'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'W8:W9')
```

```
writecell(permute({'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'},[2 1]), 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'U9:U13')
writematrix(kmDAG, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'V9:V13')
writematrix(DgrReprof, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'W9:W13')
writecell({'Fil: Sporgeometri - Rute 1, 2, 3A og 3B.xlsx'}, 'Resultat_Vertikal.xls', 'Sheet', fanennr, 'Range', 'U14:U15')
```

```
%DATAFREMSTILLING DIAGRAM
```

```
%
```

```
%UTPLUKKING AV DATA
```

```
%kutter bort rader (ruter)
```

```
NkuttTak = 0;
```

```
NkuttGulv = 1;
```

```
%kutter bort kolonner (intervaller)
```

```
NkuttVenstre = 0;
```

```
NkuttHoyre = 1;
```

```
S_beg_2 = S_beg(:,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
```

```
S_slutt_2 = S_slutt(:,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
```

```
Banekm_strekning_andel_2 = Banekm_strekning_andel(1+NkuttTak:end-NkuttGulv,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
```

```
TogkmDAG_fordeling_2 = TogkmDAG_fordeling(1+NkuttTak:end-NkuttGulv,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
```

```
TogkmReprof_fordeling_2 = TogkmReprof_fordeling(1+NkuttTak:end-NkuttGulv,1+NkuttVenstre:end-NkuttHoyre);
```

```
Tegn = {'Rute 1' 'Rute 2' 'Rute 3A' 'Rute 3B'};
```

```
Tegn = Tegn(:,1+NkuttTak:end-NkuttGulv);
```

```
for n = 1:length(S_beg_2)
```

```
    AksX{n} = sprintf('%1f - %1f', S_beg_2(n), S_slutt_2(n)-0.1);
```

```
end
```

```
%Modifikasjon navn spesialintervaller
```

```
AksX{1} = sprintf('Vannrett');
```

```
AksX{2} = sprintf('0.1 - %1f', S_slutt_2(2)-0.1);
```

```
AksX{end} = sprintf('≥%1f', S_beg_2(end));
```

```
%Tegner diagram for andel av strekning innenfor intervaller
```

```
x = categorical(AksX);
```

```
x = reordercats(x,AksX);
```

```
y = permute(Banekm_strekning_andel_2,[2 1]);
```

```
figure(1)
```

```
bar(x,y)
```

```

title('Rutenes vertikalgeometriske fordeling')
legend(Tegnf, 'Location','northeast')
xlabel('Stigning [%]')
ylabel('Andel av rute [%]')

%Tegner diagram for tilbakelagte km/dag innenfor intervaller

z = permute(TogkmDAG_fordeling_2,[2 1]);

figure(2)
bar(x,z)
title('Daglig kjørelengde fordelt over vertikalgeometri')
legend(Tegnf, 'Location','northeast')
xlabel('Stigning [%]')
ylabel('Tilbakelagt avstand [km]')

```

```

%Tegner diagram for tilbakelagte km før reprofilerer innenfor intervaller

z = permute((TogkmReprof_fordeling_2 ./ 1000),[2 1]);

figure(3)
bar(x,z)
title('Kjørelengde før reprofilerer fordelt over vertikalgeometri')
legend(Tegnf, 'Location','northeast')
xlabel('Stigning [%]')
ylabel('Tilbakelagt avstand [1000 km]')

```

```

toc
end

```

Banekm_strekning_fordeling =

Columns 1 through 7

85.0767	53.5718	72.0036	60.2466	47.1661	64.6227	50.8077
69.3013	132.2498	64.4908	57.5907	45.6104	45.2350	48.7707
5.7222	39.5405	16.1417	19.5273	50.8088	27.4607	3.2606
16.9609	46.5268	20.0444	22.5172	52.0040	36.4068	3.2837

Columns 8 through 11

73.7435	32.3528	43.6005	0
51.7888	32.6166	1.5654	0
0.1557	0.1674	3.6673	0
0.1557	0.1674	3.6673	0

Banekm_strekning_tot =

583.1920
549.2195
166.4522
201.7342

Banekm_strekning_andel =

Columns 1 through 7

14.5881	9.1860	12.3465	10.3305	8.0876	11.0809	8.7120
12.6181	24.0796	11.7423	10.4859	8.3046	8.2362	8.8800
3.4377	23.7549	9.6975	11.7315	30.5246	16.4976	1.9589
8.4075	23.0634	9.9360	11.1618	25.7785	18.0469	1.6277

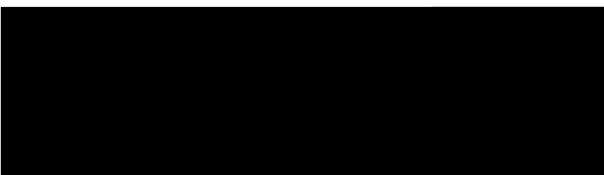
Columns 8 through 11

12.6448	5.5475	7.4762	0
9.4295	5.9387	0.2850	0
0.0935	0.1006	2.2032	0
0.0772	0.0830	1.8179	0

TogkmDAG =



TogkmDAG_fordeling =



Resultat_lagret =

'Filnavn: Resultat_Vertikal, Fane: 2, Dato: 14-May-2022 12:13:19'

Elapsed time is 5.499567 seconds.

