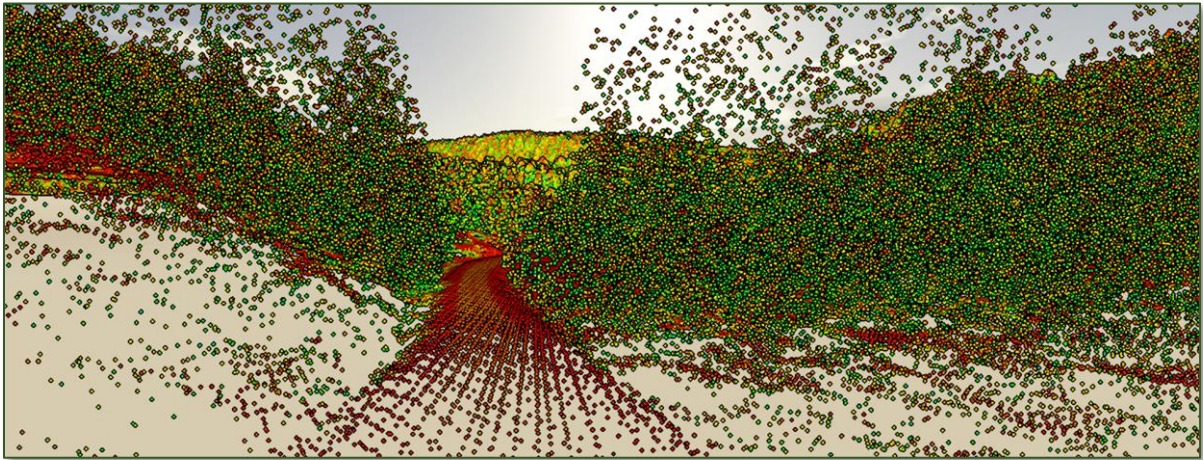


# LADASKAN - Laserdatabasert skogsbilveianalyse



Sluttrapport fra prosjektet LADASKAN

til finansieringskildene

Utviklingsfondet for skogbruket

og

Skogtiltaksfondet

Januar 2024

*Jan Bjerketvedt, Johannes Rahlf, Mostafa Hoseini, Stefano Puliti, Stephan Hoffmann*



## NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR  
BIOØKONOMI

## Forord

Dette prosjektet har blitt gjennomført med langt flere bidragsytere enn planlagt ved søknadstidspunktet. Bakgrunnen var at dette primært skulle være et startprosjekt for en doktorgradsstudent. Dessverre valgte Matthias en annen vei i løpet av høsten 2022. Men, NIBIO har mange dyktige ressurser å spille på. Prosjektet har etter hvert kommet i mål, det har ikke løst alle problemene knyttet til en «trykk på en knapp» helautomatisk registrering av eksisterende skogsbilveiers geometriske standard basert på laserdata, men det har vist eksempler på hva man kan gjøre med avanserte analyser basert på laserdatapunktskyer og noe av det man kan bruke allerede ferdige laserdatabaserte terrengmodeller fra Statens Kartverk til.

Prosjektet ble i perioden 2021 - 2023 støttet av Utviklingsfondet for Skogbruket og Skogtiltaksfondet. Det ble gjennomført i et samarbeid mellom NIBIO (faglig prosjektledelse) og Glommen Mjøsen Skog (formell prosjektledelse) for Skogtiltaksfondets vedkommende.

NIBIO har både gjennom dette prosjektet, og tilgrensende prosjekter, sett at innenfor denne delen av det driftstekniske fagområdet så er det mange nye og spennende problemstillinger. Noen er vi allerede i gang med, men vi ser fram til et videre samarbeid om nye problemstillinger med fremtidsrettede finansieringskilder.

Ås, januar 2024

Stephan Hoffman og Jan Bjerketvedt

PS! Når det står «vi» i siste avsnitt så er det en liten overdrivelse. Sistnevnte underskrevne har besluttet «at bedrive pensjonisme» når høsten begynner og videre samarbeid er derfor neppe aktuelt. Jeg vil benytte anledningen til å takke både Utviklingsfondet og Skogtiltaksfondet (og også Verdiskapingsfondet), men spesielt Utviklingsfondet, for at dere alle bidrar så sterkt i det driftstekniske utviklings-/anvendt forsknings-/forskningsarbeidet. Til tross for avslåtte skisser, avslåtte søknader og utallige purringer siden 1985, så har dere, slik jeg ser det, en veldig viktig rolle i koblingen mellom praksis/næring og forskning. Jeg er sikker på at Stephan og resten av NIBIOs «Forest Roads Group» med stipendiat Helle Ross Gobakken som «up and coming» vil ha stor glede av dere i fremtiden.

Keep up the good work!

Dette blir resultatet når mine kolleger ved NIBIO tiltror meg å språkvaske deres tekst og lage ett dokument av to.

Om det av ukjente årsaker er ønskelig med et dokument uten PS, så kan det fremstilles...

Jan

## Innhold

Forord.....	2
1. Innledning.....	5
Mål.....	5
Rapportens struktur .....	6
2. Del 1: Analyser basert på terrengmodeller fra laserdata og veigeometri fra kartdata.....	7
2.1 Innledning.....	7
2.2 Materiale og metoder .....	7
Lidar-data .....	7
Kartdata .....	7
Totalstasjonsdata fra Lier .....	7
Kurvatur og senterlinje vei .....	9
Stigning .....	14
Avvik fra Veinormalens krav.....	15
2.3 Resultater .....	15
Kartverkets midtlinje vei kontra feltmålt midtlinje vei .....	15
Midtlinje vei kontra senterlinje vei .....	16
Veibredde, kurvatur og stigning .....	17
Tverrprofilhøyder fra feltmålinger mot DTM-verdier .....	20
2.4 Diskusjon og konklusjon .....	22
3. Del 2: Analyser basert på punktskyer fra laserdata .....	23
3.1 Innledning.....	23
3.2 Materiale og metoder .....	23
Laserdata .....	23
Skogsveidata.....	24
Databehandling .....	24
Modelltrening.....	25
Bestemmelse av veigeometri .....	25
Kurveradius.....	26
3.3 Resultater og diskusjon .....	26
Modell .....	26
Beregning av veimidtlinjer og -geometrier .....	28
3.4 Referanser .....	31



## 1. Innledning

Omtrent 75% av skogsbilveiene i Norge er eldre enn 25 år og er blitt anlagt etter andre standarder og krav enn hva vi har i dag, - og definitivt bør ha fremover. Flere fylker har gjennomført veistandardregistreringer de senere årene (for eksempel Mjøsen Skog & Fylkesmannen i Oppland 2014, Holaker et al 2016), men detaljerte registreringer av stigningsforhold, kurvatur og veibredde, samt kombinasjoner av disse som Normaler for landbruksveier (heretter Veinormalen) stiller krav til, har ikke inngått.

Oppdatert kunnskap om standard på eksisterende veier vil være til nytte for mange ulike brukere: skogbruksledere, skogbrukssjefer, fylkesnivå, skogsveiplanleggere osv. Det vil også legge til rette for en målrettet innsats for å heve standarden på det eksisterende veinettet.

### Mål

Hovedmålet var å utvikle en metodikk for å analysere eksisterende skogsbilveiers kurvatur, veibredde og stigningsforhold basert på kart- og laserdata, for deretter å kunne klassifisere veiparseller som «innenfor» eller «utenfor» Veinormalens krav.

Delmål 1 var å identifisere en nøyaktig nok midtlinje vei til prosjektets formål. Delmålet er to-delt: hva er «nøyaktig nok» til dette formålet og hvilken nøyaktighet gir de ulike inputdataene. Alternativ input er FKB-data med høyre og venstre veikant (omstendelig omregningsprosess til midtlinje), Vbase med midtlinje vei, laserdata (større trær langs veien skaper problemer med få bakketreff) eller kombinasjoner av disse.

Delmål 2 var å analysere en nøyaktig nok midtlinje vei i en digital terrengmodell basert på laserdata for å hente ut informasjon om stigning, kurvatur og veibredde. Stigning er relativt greit. Kurvatur er mer utfordrende. Veibredde er vanskelig, - veldig avhengig av trær som stopper bakketreff på veiskulder/grøftekant og laserskanningstetthet.

Delmål 3 er å kombinere informasjonen samlet inn i analysene i Delmål 2 og omgjøre dette til et veikart som viser hvilke veiparseller som ikke oppfyller kravene i dagens Veinormaler, - enten dette er enkeltvariabler eller kombinasjoner av disse.

Dersom man klarer å nå disse målene, så kan man enklere løse en del oppgaver for næringen:

- Skogbruksledere kan raskt forhåndssjekke en skogsbilveis standard både i forhold til tømmertransport og skogsmaskintransport.
- På kommune- og fylkesnivå kan man enklere få en oversikt over skogsveinettets geometriske egenskaper og svakheter, for deretter å sette inn målrettede tiltak mot prioriterte skogsbilveier.
- Skogbrukets veiplanleggere får lettere tilgang til data om ombyggings-/opprustingsprosjekter og kan konsentrere datainnsamlingen i felt om andre faktorer.
- Skogeieren kan selv gå inn å se på «status» for egen vei for deretter å gjøre eventuelle kort- og langsiktige investeringsplaner.

Prosjektsøknaden understreker at det fortsatt vil være behov for å gjøre en fysisk befarings i felt (bæreevne, grusing, grøfter, stikkrenner mm), men tidsforbruket bør kunne reduseres betraktelig og

nøyaktighetsnivået bedres. Vårt eksisterende skogsbilveinnett er i for liten grad tilpasset fremtidens transport, men gjennom prosjektet kan en del kritiske flaskehalsen identifiseres.

### Rapportens struktur

I rapportens første del presenteres analyser med utgangspunkt i Statens Kartverks nedlastingsklare «hyllevarer»: ferdige terrengmodeller fra laserdata og kartbaserte veidata.

I rapportens andre del presenteres analyser basert på laserpunktskyer og programvare for å identifisere og klassifisere objekter i bildedataene (YOLO).

## 2. Del 1: Analyser basert på terrengmodeller fra laserdata og veigeometri fra kartdata

### 2.1 Innledning

I den landsdekkende høydemodellen er laserskanningens punktresultater tilrettelagt for videre bruk gjennom en ferdigberegnet terrengmodell med 1x1 m oppløsning. Disse terrengmodellene kan fritt lastes ned og benyttes til videre analyser. Dette åpner for mange mulige bruksområder i skogbruket, - ikke minst i forbindelse med skogsbilveier.

### 2.2 Materiale og metoder

#### Lidar-data

Det er lastet ned ulike laserdata fra «Høydedata.no». Disse dataene kan inneholde både overflatetreff og bakketreff. I utgangspunktet er bakketreffene mest interessante, det er disse som beskriver høydeforholdene til veiens tverrprofil: veioverflaten, veikanter, skjæringer, fyllinger og grøfter. Overflatetreffene kan brukes til å identifisere områder med behov for kantrydding, men dette gjelder kun relativt nye laserprosjekter. Men, de angir også hvor man kan forvente å ha dårlig dekning for bakke-dataene.

Hvilken tetthet, antall punkter pr m<sup>2</sup>, som laserskanningen er gjennomført med, vil sammen med vegetasjonsforholdene påvirke hvor mange gode bakketreff pr m<sup>2</sup> man kan forvente på skogsbilveien. Med mange bakketreff pr m<sup>2</sup> får man bedre informasjon om skogsbilveiens tverrprofil og høyere nøyaktighet på beregningene.

Dataene kan lastes ned som en ferdig 1x1 m høydemodell eller som en punktsky. Ved å ta utgangspunkt i en punktsky kan man bruke disse dataene direkte eller anvende dem til å interpolere en høydemodell med fritt valgt rutenettstørrelse.

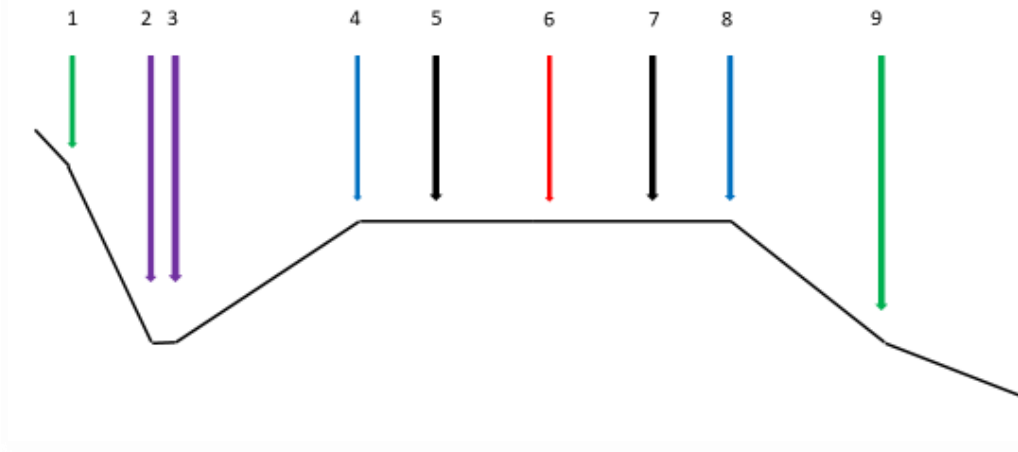
#### Kartdata

Det er skogsbilveienes senterlinje fra Elveg som er hovedinformasjonen fra Statens Kartverk i dette prosjektet. FKB-data inneholder riktignok informasjon om «høyre» og «venstre» (vei-)kantlinje, men erfaringsmessig er ikke disse spesielt nøyaktige.

Nøyaktigheten vil variere med alderen på dataene og hva slags instrument som er blitt benyttet.

#### Totalstasjonsdata fra Lier

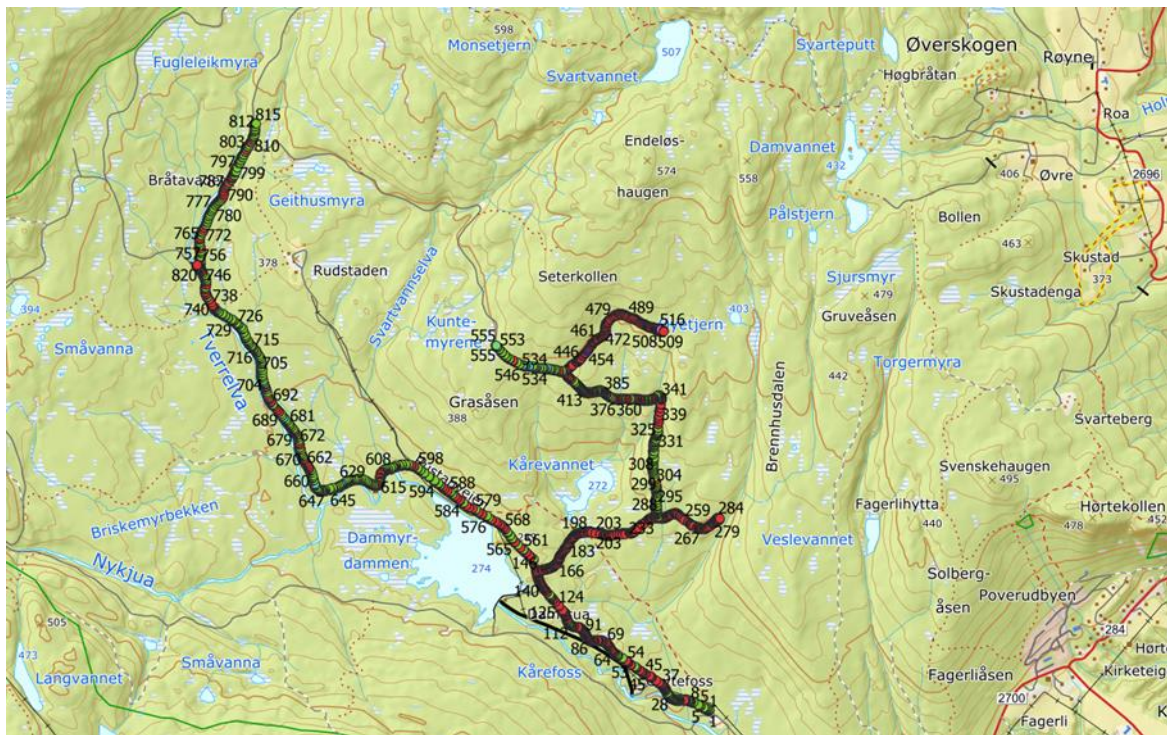
Sommeren 2022 ble det gjennomført en detaljert registrering av deler av skogsbilveinettet i Lier kommune med en totalstasjon.



Figur 1. Tverrprofilregistrering med totalstasjon. 1+9 er skjæringskant og fyllingsfot, 2 og 3 er grøftebunn, 4 og 8 er veikant, 5 og 7 er kjørespor og 6 er veimidt.

Figur 1 viser et tverrprofil fra en vei hvor venstresiden ligger mot en høyereliggende lise og høyresiden ender i et lavereliggende punkt. I dette eksemplet er det registrert 9 tverrprofilpunkter. Punkt 1 og 9 utgjør yttergrensene for veiens påvirkning av det opprinnelige terrenget. Der hvor terrenget går oppover på begge sider av veien, kan det være grøfteregistreringer på begge sider av veien og det maksimale antall av profilpunkter i undersøkelsen vil dermed være 11 punkter.

Totalt ble det registrert 10 km med skogsbilveier og 815 tverrprofiler fra disse veiene.



Figur 2. Feltregistrerte skogsbilveier i Finnemarka, Lier kommune

Det ble benyttet en Trimble S5 totalstasjon, Trimble Active Track 360 Target, Trimble R12 GNNS antenne og Trimble TSG5 håndterminal ved feltmålingene.



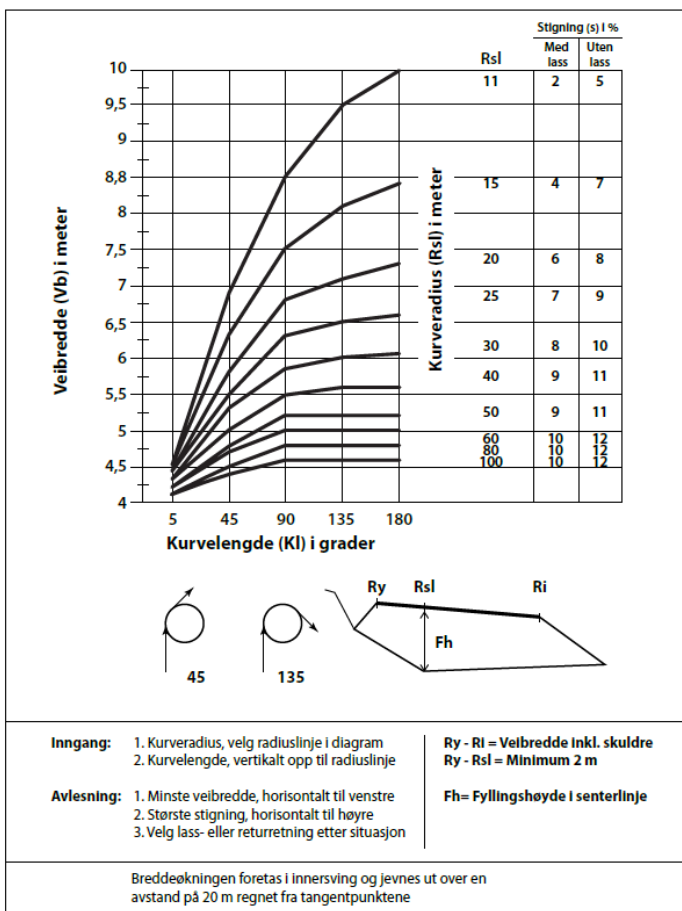
## Kurvatur og senterlinje vei

For en skogsbilvei inneholder kurvaturkravene to beskrivende variabler: kurveradius og kurvelengde. I Veinormalen beskrives for eksempel for veiklasse 3 (s. 17) at breddeutvidelse avhengig av kurveradius og kurvelengde skal tilfredsstille følgende krav:

Tabell 1. Veinormalens krav til veibredde ved varierende kurveradius og kurvelengde.

Kurveradius	Kurvelengde 45°	Kurvelengde 135°
10 - 14 m	Veibredde 7,0 m	Veibredde 9,5 m
15 - 19 m	Veibredde 6,5 m	Veibredde 8,0 m
20 - 24 m	Veibredde 6,0 m	Veibredde 7,0 m
25 - 29 m	Veibredde 5,5 m	Veibredde 6,5 m
30 - 39 m	Veibredde 5,5 m	Veibredde 6,0 m
40 - 49 m	Veibredde 5,0 m	Veibredde 5,5 m
50 - 59 m	Veibredde 5,0 m	Veibredde 5,0 m

Men, dette er bare deler av beregningsmaterialet. På side 19 finner man i Figur 33.6 at breddeutvidelsen allerede starter ved 5° kurvelengde.



Figur 3.6 Veibredde og stigning i kurver, veiklasse 3.

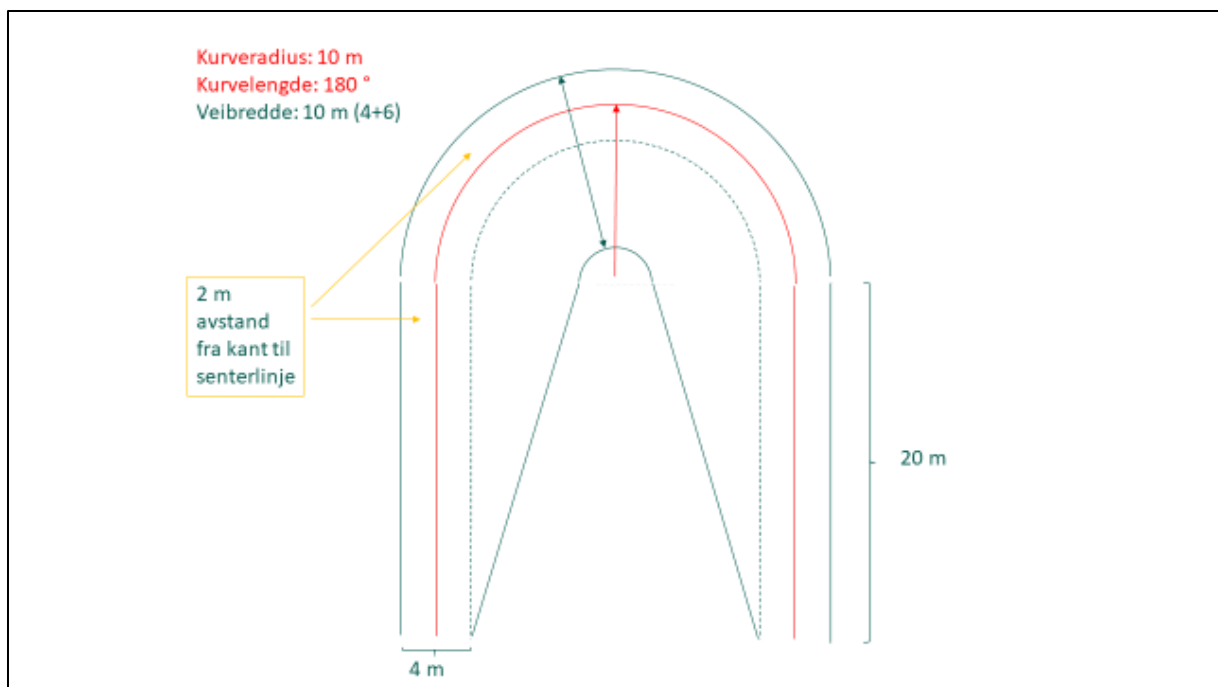
Figur 3. Veinormalens utvidede kravspesifikasjon for veibredde og stigning i kurver

Dersom man leser av krav til veibredde ved varierende kurveradius og -lengde for veiklasse 3 i Veinormalens figur 3.6, kan man sette opp denne tabellen:

Tabell 2. Veinormalens krav til veibredde og stigning ved varierende kurveradius og kurvelengde for veiklasse 3.

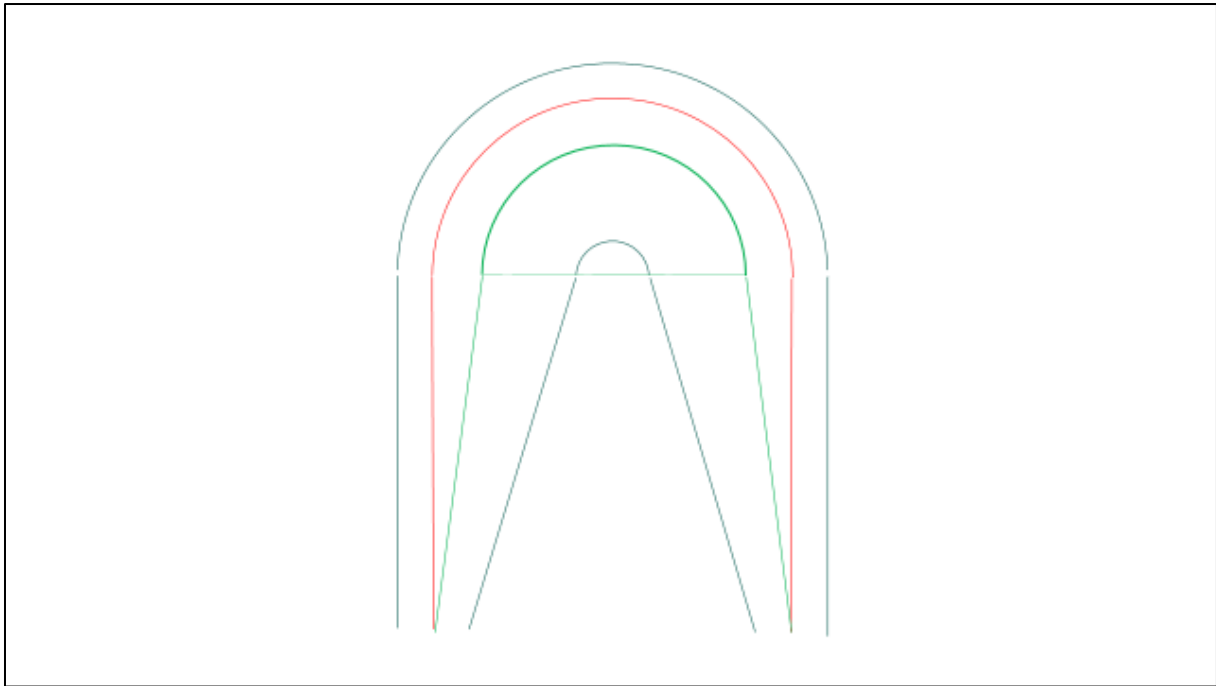
Kurveradius meter	Kurvelengde, grader					Max stigning, %	
	5° bredde, m	45° bredde, m	90° bredde, m	135° bredde, m	180° bredde, m	M. lass	U. lass
10	4,50	7,00	8,50	9,50	10,00	2	5
15	4,50	6,30	7,50	8,10	8,40	4	7
20	4,50	5,80	6,80	7,10	7,30	6	8
25	4,50	5,50	6,30	6,50	6,60	7	9
30	4,30	5,30	5,80	6,00	6,10	8	10
40	4,30	5,00	5,50	5,60	5,60	9	11
50	4,25	4,75	5,20	5,20	5,20	9	11
60	4,25	4,70	5,00	5,00	5,00	10	12
80	4,10	4,50	4,80	4,80	4,80	10	12
100	4,10	4,30	4,60	4,60	4,60	10	12

Kurveradius og kurvelengde måles i veiens senterlinje. I Veinormalen oppgis det at senterlinjen legges 2 m inn fra ytterkant sving og at all breddeutvidelse skal skje i innersving, samt at breddeutvidelsen skal utjevnes over en avstand på 20 meter.



Figur 4. Veinormalens definisjon av senterlinje.

Dersom man henter senterlinje vei fra Kartverket, så vil denne avvike fra Veinormalens definisjon, da denne, overraskende nok, er plassert i senter av veien.



Figur 5. Sammenligning av Veinormalens senterlinje (rød) og Kartverkets senterlinje (grønn).

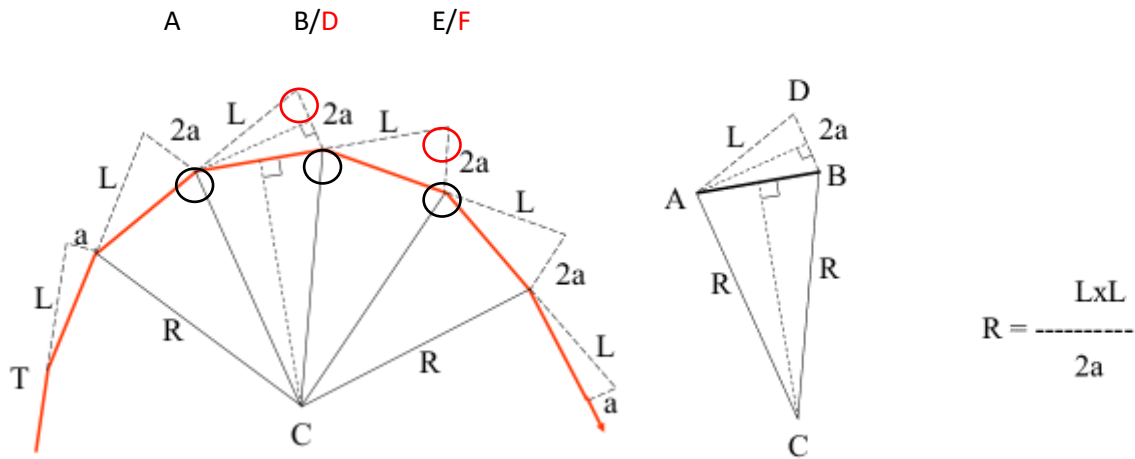
Nøyaktigheten for Kartverkets senterlinje kan variere med registreringstidspunkt og –instrument.

Sammenligning av Kartverkets midtlinje med totalstasjonsdata

Både Kartverkets midtlinjeregistrering og NIBIO's midtlinjeregistrering fra Finnemarka har tilnærmet det samme utgangspunktet, å angi midten mellom kjøresporene. De bør derfor sammenfalle bedre enn hva Veinormalens senterlinje gjør.

## Kurveradiusberegning basert på rundstikkingsmetoden

For å beregne kurveradius på eksisterende skogsveier må man ha minst 3 punkter langs linjen. Både teoretisk og i praksis kan man benytte seg av vår vanlige metoden for å stikke kurver, rundstikkingsmetoden, men denne må da gjøre baklengs.



Figur 6. Beregning av kurveradius med utgangspunkt i rundstikkingsmetoden.

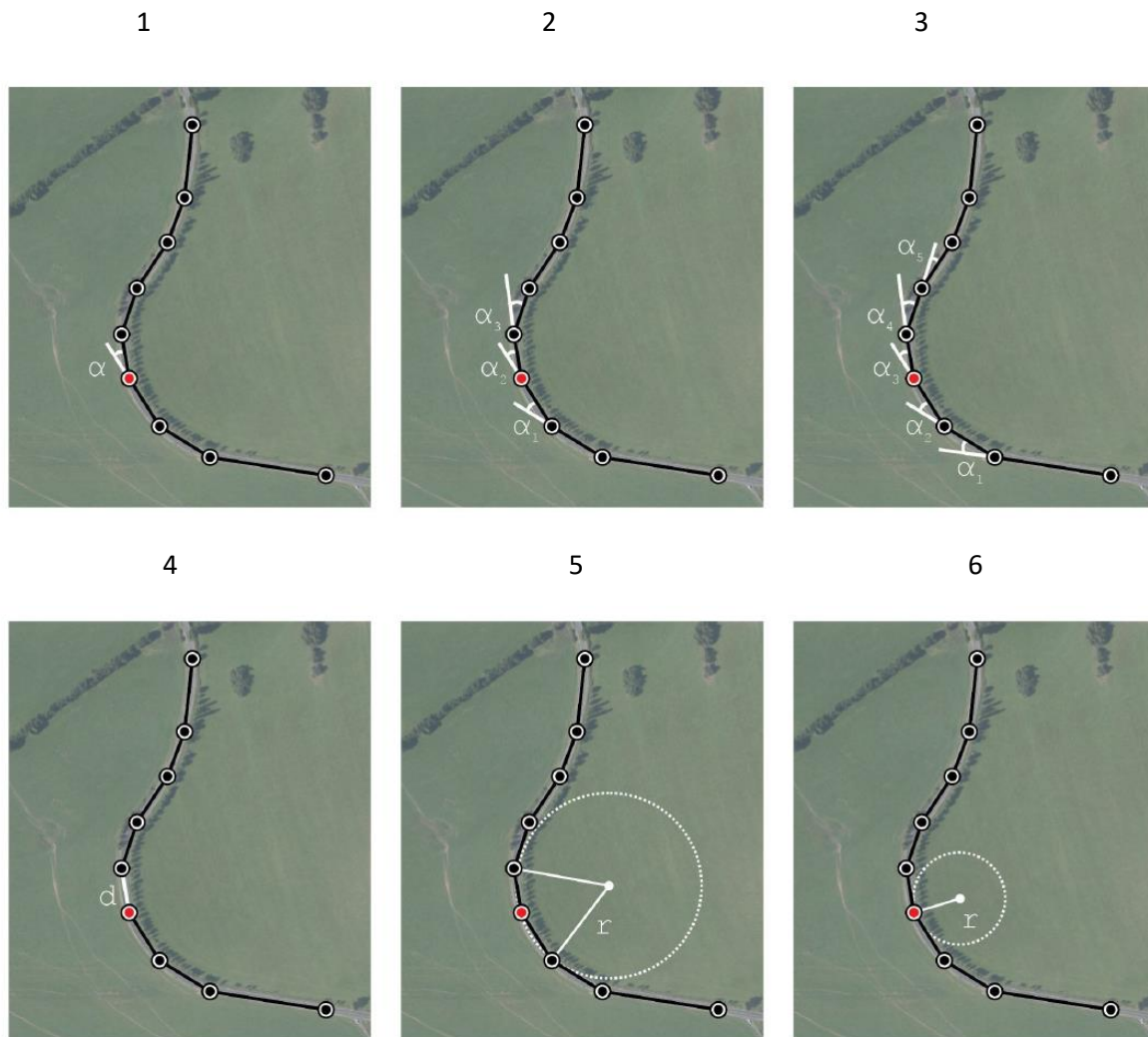
For å kunne beregne radius (R) i kurven mellom A og E på den eksisterende veilinen (kurvesegmentene A-B og B-E) må man finne posisjonen til F. Denne kan beregnes med utgangspunkt i A, retningen gjennom punkt B og avstanden mellom B og E.

## Kurveradiusberegning basert på ROCA-metoden

I prosjektet er det derimot valgt å teste ut den mer avanserte ArcGis-prosedyren ROCA. «ROad Curvature Analyst» (ROCA) er en ESRI ArcGIS Toolbox utviklet ved CDV-Transport Research Centre i Tsjekia (Bil et al., 2018) og er primært innrettet mot analyse av trafikkulykker. Programmet deler veinettet i rettstrekninger og kurver, og blant flere beregnede parametere finner man også horisontalkurveradius og kurvelengde.

Det tas utgangspunkt i seks ulike klassifiseringsvariabler/metoder (se også Figur 7):

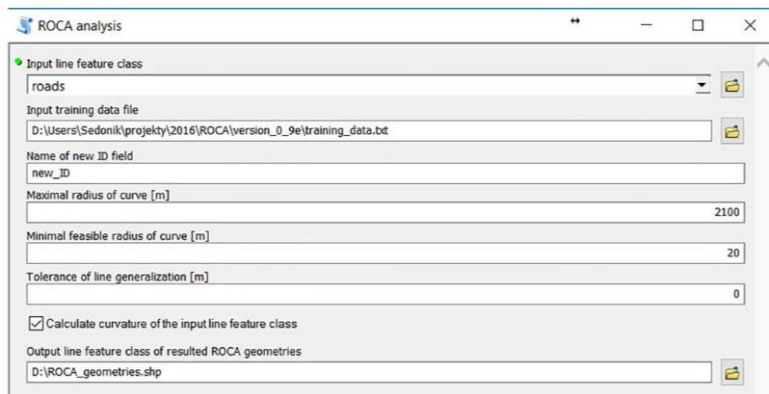
1. Vinkelen mellom tre etterfølgende punkter
2. Kumulativ vinkel for tre punkter
3. Kumulativ vinkel for fem punkter
4. Avstanden mellom to etterfølgende punkter
5. Radius til en omskreven sirkel
6. Radius til svingende (oscillerende) sirkel



Figur 7. Prinsipp for beregning av ROCA-metodens forklaringsvariabler (Bil et al 2018)

Bil et al (2018) har gjennom sine tester funnet at å benytte naïve Bayes-klassifisering basert på de nevnte forklaringsvariablene gir de beste resultatene for denne analysens formål.

Som bakgrunn for analysen er det etablert et test-veinett. Dette er et ferdig klassifisert veinett som deler dette inn i del av kurve eller del av rettstrekning. Programmet bruker dette test-veinettet for å klassifisere et nytt veinett.



Før analysen kan man definere en selvvalgt grense mellom kurve og rettstrekning, «Maximal radius of curve». Her avviker skogbrukets standard mye fra det offentlige veinettet. I brukerveiledningen antydes 1000 til 2500 meter kurveradius som grense mellom kurve og rettstrekning. For våre skogsbilveiers vedkommende vil 100 meter kurveradius være den mest aktuelle grenseverdien (se Kurvatur og senterlinje vei).

Videre kan man også definere en minste akseptable (feasible) kurveradius. Dette er gjort for å kunne identifisere feil i veidataene.

Det nest siste punktet i input-menyen, «Tolerance of line generalization», er også viktig. Formålet er å generalisere dataene slik at mulige feil i veilinjens blir filtrert vekk. Her benyttes Douglas-Peucker generaliseringsalgoritme for å forenkle veilinjens ved å fjerne overflødige punkter. Ved litt prøving og feiling ser det ut som en toleranseverdi på 0,5 gir best resultater for det aktuelle skogsbilveinettet.

## Stigning

For å kartlegge stigningsforholdene ble Lidardata lagt til grunn. Kartverkets VegSenterlinje ble benyttet som utgangspunkt. Denne linjen inneholder punkter med varierende avstand langs linjen. Det er imidlertid enkelt å etablere nye punkter med fast avstand fra linjens startpunkt som erstatter de originale punktene.

For stigningens vedkommende er det ingen spesiell punktavstand som ansees å være bestemmende. Men, for kurveradius kan punktavstanden være av stor betydning i krappe kurver (liten kurveradius). Dermed bør avstanden tilpasses kravene for kurveradius.

Stigningen beregnes med utgangspunkt i høydeforskjellen mellom punkt n og punkt n+1 dividert på avstanden mellom punkt n og punkt n+1. Dette tilsvarer  $\tan \alpha$ , hvor  $\alpha$  er stigningsvinkelen i grader. I skogbruket foretrekkes prosent fremfor grader og stigningen angis i prosent dvs.  $100 \times \tan \alpha$ .

$$\text{Stigningsprosent} = 100 \times (Z_1 - Z_2) / \sqrt{[(X_1 - X_2)]^2 + [(Y_1 - Y_2)]^2}$$

Hvor:

X1, Y1, Z1 er X-koordinat, Y-koordinat, høyde over havet for punkt 1

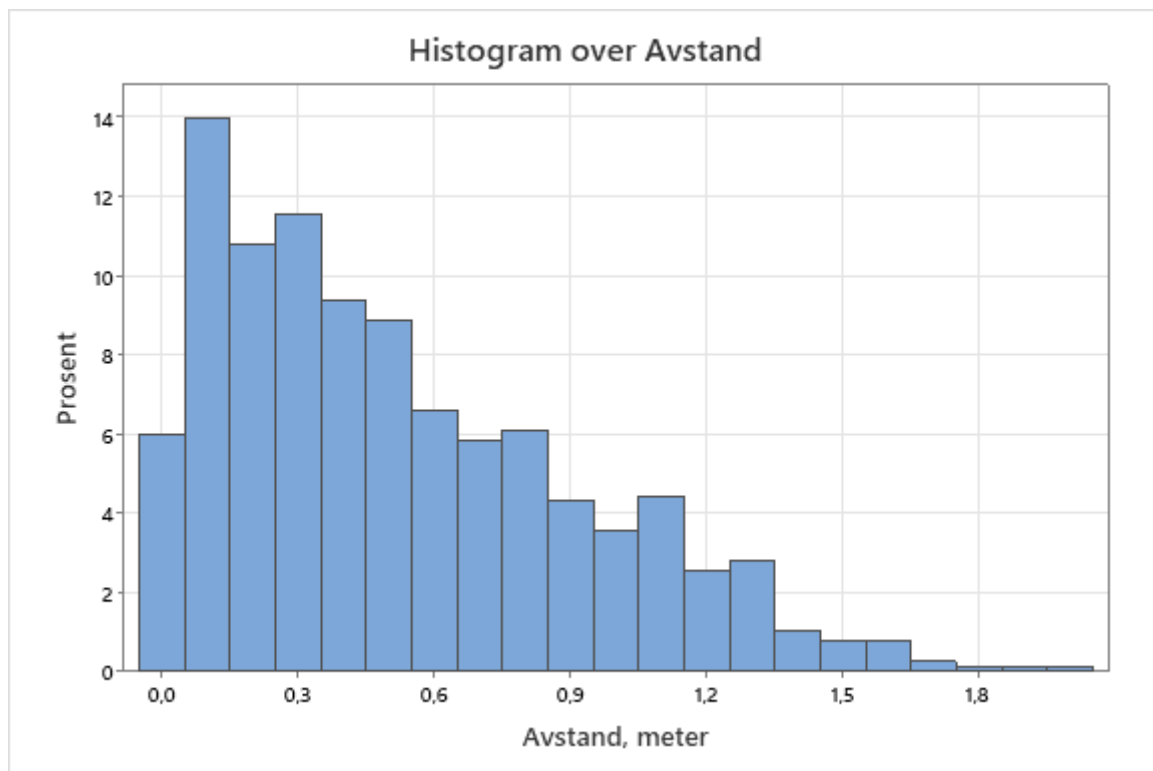
X2, Y2, Z2 er X-koordinat, Y-koordinat, høyde over havet for punkt 2

## Avvik fra Veinormalens krav

Både de målte og beregnede verdiene kan ligge innenfor eller utenfor Veinormalens krav. Når man skal sammenstille de registrerte og beregnede verdiene med Veinormalens krav, så tas det utgangspunkt i at kravene er absolutte og likeverdige. Det vil si at dersom veibredden er 0,1 meter for smal, så er veiparsellen ikke godkjent selv om stigningskravet er oppfylt etter kravene i Tabell 2.

## 2.3 Resultater

### Kartverkets midtlinje vei kontra feltmålt midtlinje vei



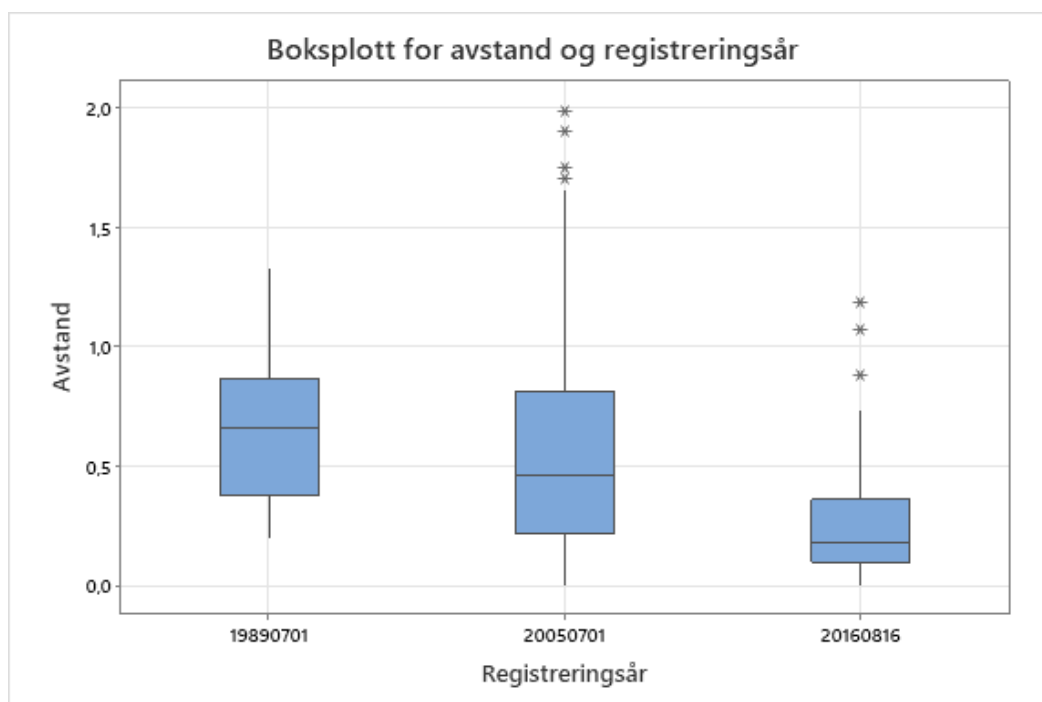
Figur 8. Fordeling av avvik mellom Kartverkets midtlinje og feltmålt midtlinje vei

For hele datamaterialet har man et gjennomsnittlig avvik på 52 cm i XY-retning mellom midtlinjen fra kartet og den feltmålte midtlinjen.

Kartverkets midtlinje-data består av registreringer gjort på ulike tidspunkter og med forskjellige registreringsmetoder og – utstyr. Det gir seg også utslag i avviket.

Tabell 3. Avviksvariasjon mellom ulike registreringsår

Registreringsår	Antall punkt	Gjennomsnittlig avvik, cm	Min-Max, cm
1989	9	65,4	20-133
2005	705	54,6	0-199
2016	73	26,0	0-119
Totalt	787	52,0	0-199



Figur 9. Avviksvariasjon mellom ulike registreringsår

For 1989-registreringene (9 pkt.) ble det benyttet «Stereoinstrument, uspes.» med en oppgitt nøyaktighet på 500 cm. For 2005-registreringene (705 pkt.) anvendte man «Digitalt stereoinstrument» med en nøyaktighet på 200 cm. Ved siste registrering i 2016 (73 pkt.) ble det også brukt «Digitalt stereoinstrument», men med en nøyaktighet på 50 cm.

#### Midtlinje vei kontra senterlinje vei

Beregnet avvik mellom Veinormalens senterlinje og Kartverkets senterlinje, dvs det kurveradiustillegget som en radius beregnet fra Kartverkets senterlinje må tillegges for å komme til Veinormalens senterlinje.

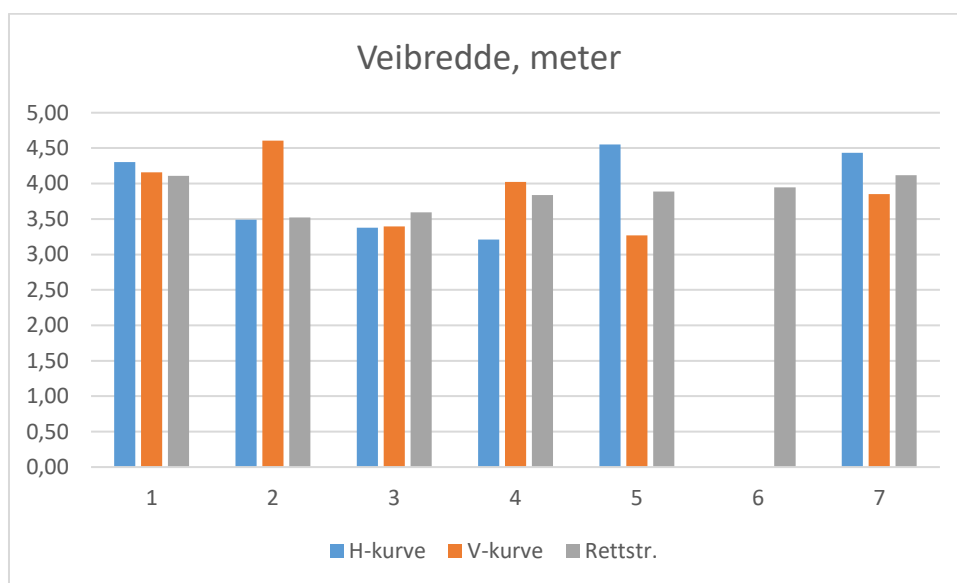
Tabell 4. Beregnet avvik mellom Veinormalens senterlinje og Kartverkets senterlinje

Kurveradius	Kurvelengde, grader				
	5°	45°	90°	135°	180°
meter	tillegg, m	tillegg, m	tillegg, m	tillegg, m	tillegg, m
10	0,25	1,50	2,25	2,75	3,00
15	0,25	1,15	1,75	2,05	2,20
20	0,25	0,90	1,40	1,55	1,65
25	0,25	0,75	1,15	1,25	1,30
30	0,15	0,65	0,90	1,00	1,05
40	0,15	0,50	0,75	0,80	0,80
50	0,13	0,38	0,60	0,60	0,60
60	0,13	0,35	0,50	0,50	0,50
80	0,05	0,25	0,40	0,40	0,40
100	0,05	0,15	0,30	0,30	0,30



Det er en viktig forutsetning som ikke må oversees i denne sammenligningen. Denne differansen er basert på at de aktuelle veiene er bygd i henhold til dagens 1997-krav i Veinormalen til breddeutvidelse i kurver. Dette er, i beste fall, kun gyldig for nyanlegg og ombygginger etter 1997 da gjeldende veibreddekrav ble innført. Bruken av «i beste fall» i denne sammenheng har sin bakgrunn i at det erfaringsmessig har vist seg at en del av de godkjente veianleggene etter 1997 har hatt mangler knyttet til både breddeutvidelse og stigning i kurver. Dersom veien er anlagt med en mindre breddeutvidelse enn hva Veinormalen krever, så vil avviket mellom Kartverkets senterlinje og Veinormalens senterlinje bli redusert.

### Veibredde, kurvatur og stigning

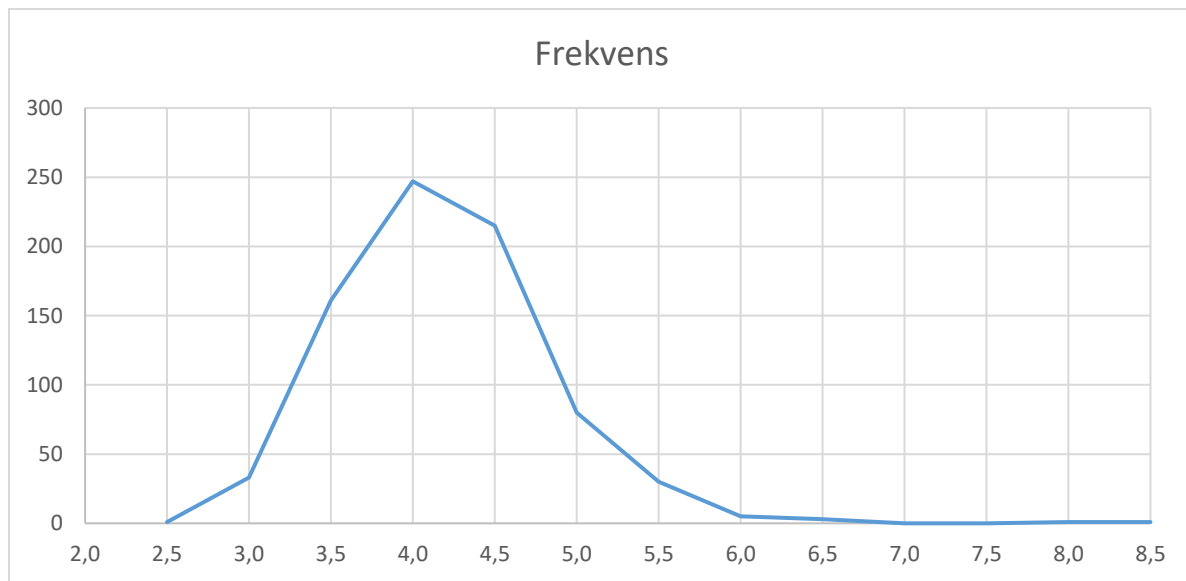


Figur 10. Feltregistrert gjennomsnittlig veibredde for kurver og rettstrekninger

Tabell 5. Feltregistrert gjennomsnittlig veibredde for høyre- og venstrekurver og rettstrekninger

Veinr	Veibredde, meter			Gj.snitt
	H-kurve	V-kurve	Rettstr.	
1	4,30	4,16	4,11	4,14
2	3,49	4,60	3,52	3,57
3	3,38	3,39	3,60	3,53
4	3,21	4,02	3,84	3,81
5	4,55	3,27	3,89	3,88
6			3,94	3,94
7	4,43	3,85	4,12	4,13
Alle	3,99	3,93	3,95	3,95

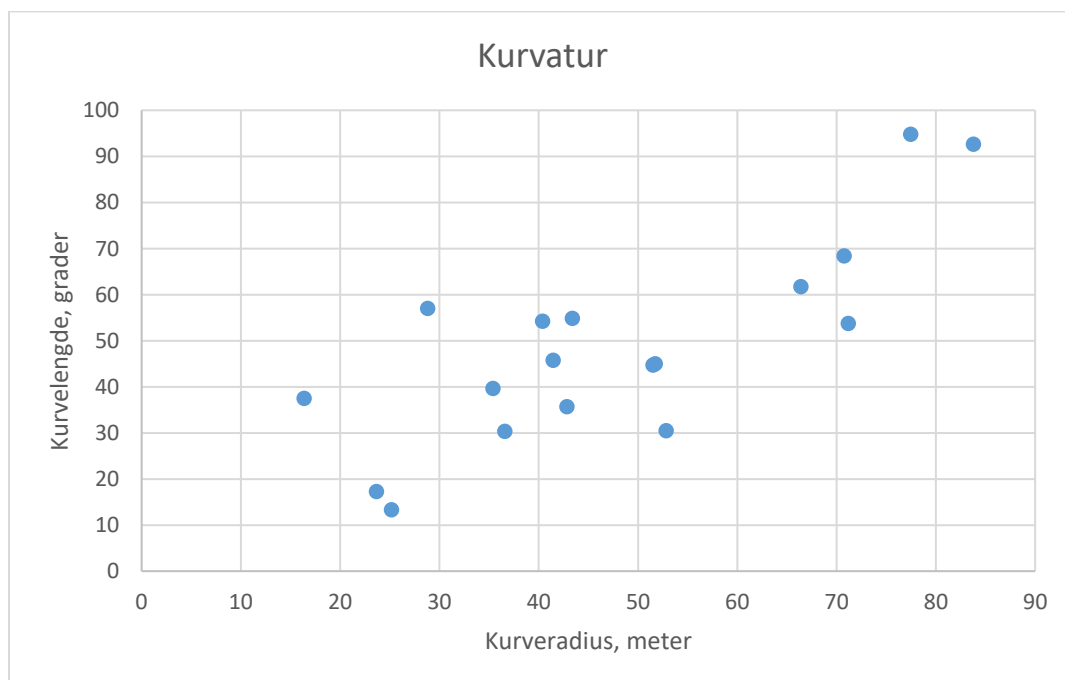
Som gjennomsnittsverdiene for de 7 forsøksveiene viser er det kun 2 av de 7 veistrekningene som har veibreddeverdier (4 meter) over dagens veinormalkrav for rettstrekninger (over 100 meter kurveradius).



Figur 11. Frekvensfordeling for feltregistrerte veibredder

Frekvensfordelingen i Figur 11 viser at det er mange veisegmenter med veibredde over minimumskravet på 4 meter. Men, det er også mange veibredder under minimumskravet. Helt ned til 2,5 meter, - langt fra 4 meters kravet.

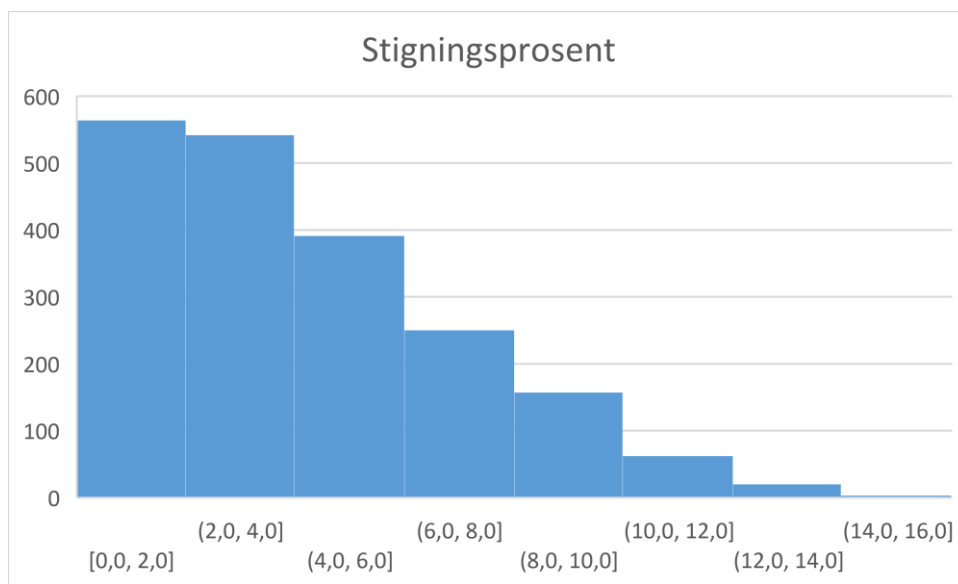
I kurvene skal det breddeutvides (i innerkant) og dette påvirkes av kurvelengden (og setter krav til stigningen). Kurveberegningene, både kurveradius og kurvelengde, kommer fra ROCA-modellen.



Figur 12. Kurveradius og kurvelengde for kurver under 100 m radius

Det var 18 kurver med radius under 100 meter på de undersøkte veiene. Laveste verdi (krappeste kurve) var 16 meter.

Stigningen ble beregnet for 5 meter lange seksjoner av veiene.



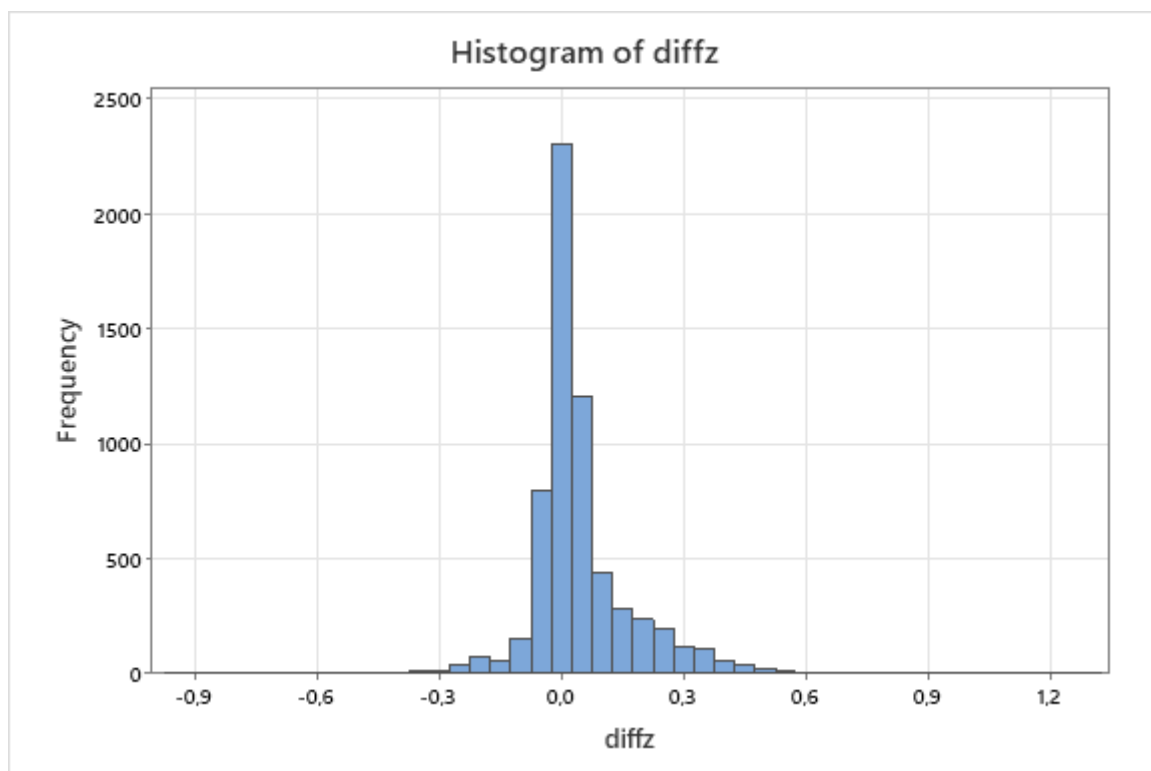
Figur 13. Frekvensfordeling for stigningsprosenten til 5 meters veiseksjoner

Det er 4,4 % av strekningene som har enn 10 % stigning og 1,6 % som har mer enn 12 % stigning.

Når man sammenstiller data for kurvatur og stigning, så er det ingen kurver som er for bratte for motkjøring uten lass, men det er 11 % (2 av 18) som er for bratte for motkjøring med lass. I dette forsøksområdet går tømmertransporten i hovedsak ned og ut dalen og man har dermed motkjøring uten lass.

Men, når man også inkluderer veibredden, så er det kun 2 av de 18 kurvene (11 %) som har en veibredde som tilfredsstillende kravene i Veinormalen. Riktignok var det ytterligere 5 kurver (28 %) som var i nærheten, mens 61 % av kurvene var godt under Veinormalens breddekrav.

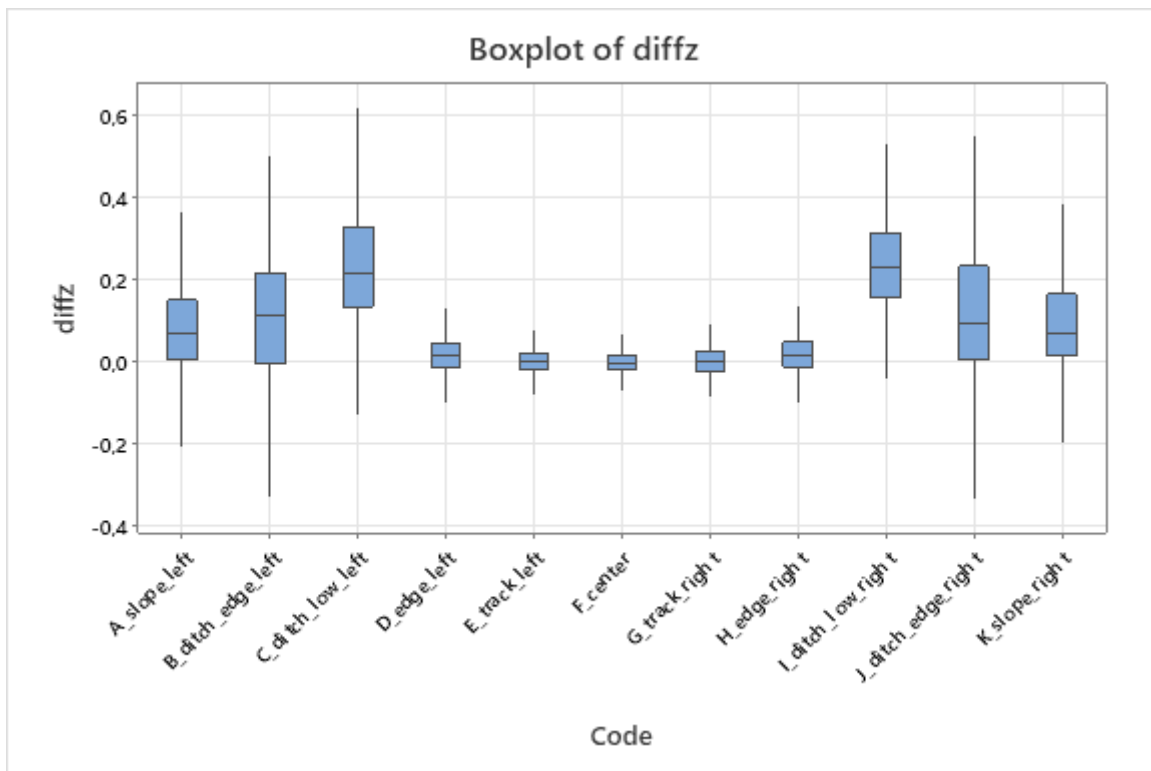
## Tverrprofilhøyder fra feltmålinger mot DTM-verdier



Figur 14. Frekvensfordeling av differansen mellom høydedata fra DTM og feltregistrering

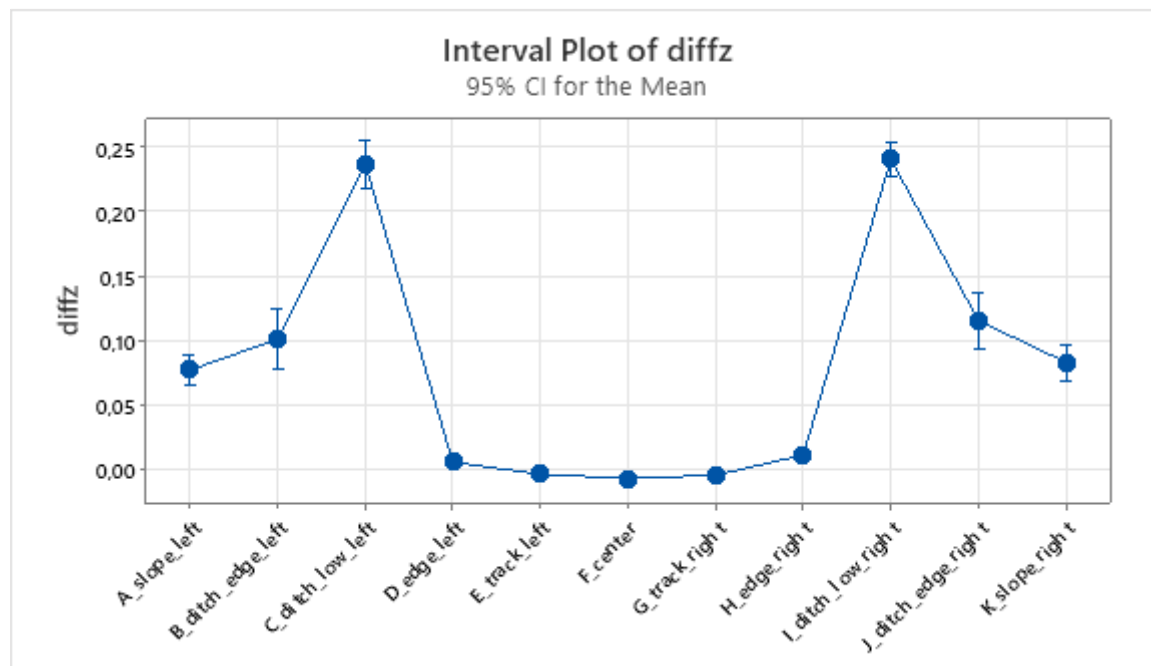
Figuren viser høydeforskjellen (basert på punktenes høyde over havet) mellom tverrprofilpunktens beregnede høyde tatt ut fra DTM minus høyden registrert i felt med totalstasjon. Den litt skjeve fordelingen rundt 0-punktet antyder for høye verdier fra terrengmodellen.

Når man analyserer dataene videre og ser på hvordan høydeforskjellen varierer mellom de ulike punktgruppene (plassering i tverrprofilen), kommer det fram et mer forklarende bilde.



Figur 15. Boksploott av høydeavvik mellom DTM og feltregistrering fordelt på registreringspunkt

For de tverrprofilpunkter som er nærmest veiens midtlinje (F\_center) og faller innenfor veibredden (E, G, D, H), så øker avviket i liten grad, - men, det øker noe mot ytterkant av veien. For grøfteregistreringens vedkommende er det, dessverre, som forventet. Vegetasjonen mellom veiskulder og skjæringstopp/fyllingsfot begrenser nøyaktigheten (muligheten til å treffe bakken) til laserdataene.



Figur 16. Avvik mellom høyde fra DTM og feltregistrering

## 2.4 Diskusjon og konklusjon

Midtlinje vei fra Statens Kartverk avviker lite, i snitt 52 cm, fra feltmålte data. Det er tydelig at kartleggingstidspunktet (alderen på dataene) har betydning for nøyaktigheten.

Forskjellige definisjoner av midtlinje vei mellom Statens Kartverk og Veinormalen kan forårsake feil i beregning av kurveradius, men den blir merkbar først ved kombinasjon av liten kurveradius og lang kurvelengde. I tillegg har man den kjensgjerning at eldre eksisterende skogsbilveier er smalere enn hva dagens Veinormal tilsier, - det gjør at avviket mellom midtlinje vei fra Statens Kartverk og Veinormalens plassering vil bli mindre.

Dersom man legger denne studien til grunn tyder det på at midtlinje vei fra Statens Kartverk kan være et godt grunnlag for beregning av kurveradius i henhold til Veinormalen, men dette avhenger både av alder på midtlinje fra Statens Kartverk og ikke minst om man beveger seg i ytterpunktene av kurveradius og kurvelengde.

Når man kommer til kurve-problematikken er det ganske åpenbart, og som forventet, at det er veibredden som har mangler. Det er som regel terrenget som bestemmer og begrenser veilinjens kurveradius og kurvelengde, mens stigning og veibredde kan lettere tilpasses. Utviklingen av tømmerbilenes dimensjoner har også medført forandringer i Veinormalens kurvaturkrav og da spesielt på veibredden.

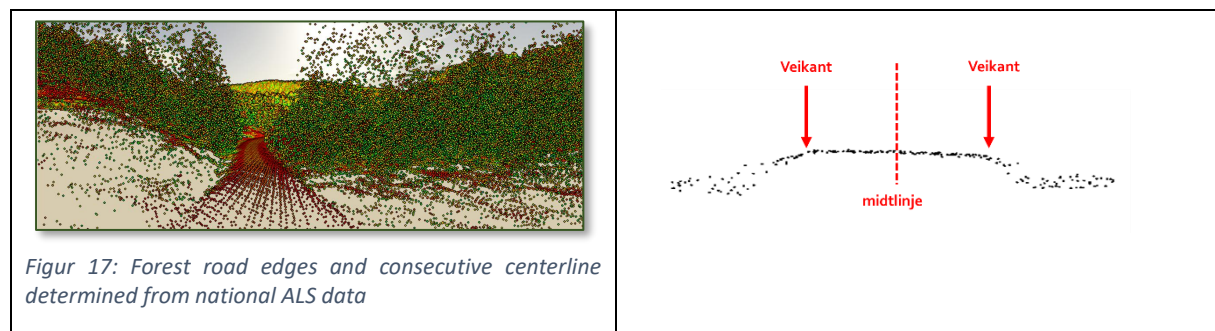
Hovedutfordringen knyttet til bruk av Kartverkets «hyllevarer» er derfor terrengmodellens økende unøyaktig fra midtlinjen og ut mot veikant og grøft. Med et 1x1 m rutenett som har gjennomsnittsverdien til alle bakketreffene innenfor ruten, så vil veikant og grøftebunn bli mindre distinkte eller mer avrundet i terrengmodellen. Når man har problemer med å identifisere veikantene, så mister man også muligheten til å kartlegge veibredden.

## 3. Del 2: Analyser basert på punktskyer fra laserdata

### 3.1 Innledning

Norges skogsbilveinett utgjør en kritisk infrastruktur for skogbruket, men er påfallende utdatert. Rundt 75% av disse veiene er eldre enn 25 år og er derfor anlagt etter forutgående standarder som ikke nødvendigvis samsvarer med dagens behov og fremtidige utfordringer. På tross av regionale registreringer av veistandard, er det en markant informasjonsmangel når det gjelder detaljert kartlegging av veiens geometriske egenskaper som stigningsforhold, kurvatur og veibredde. Dette hullet i kunnskapen kompliserer beslutningsprosessen for ulike interessenter, fra skogbruksledere og skogeiere til offentlige myndigheter, spesielt når det kommer til vedlikehold, oppgradering og ressursallokering.

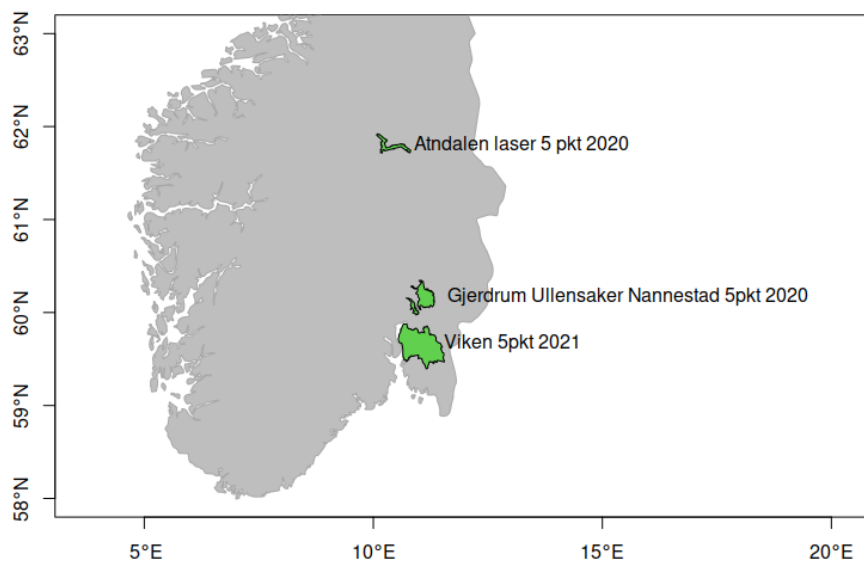
For å adressere dette informasjonsgapet, er den underliggende ideen å utnytte flybårne laserskanningsdata (airborne laser scanning, ALS) som ble samlet landsdekkende i forbindelse med Norges nasjonal detaljert høydemodell (NDH). Ved å implementere en objekt-deteksjonsmodell basert på dyp-lærings-algoritmer, sikter vi mot å identifisere veikanter og nøyaktig lokalisere den sanne senterlinjen for hver vei i tverrprofiler av laserpunktskyen (Figur 17). Denne tilnærmingen vil muliggjøre en mer presis bestemmelse av veiens overordnede geometriske egenskaper, inkludert veibredde, stigning og kurveradius. Slik nøyaktig informasjon kan brukes for å klassifisere veiene i samsvar med dagens og fremtidige trafikkrestriksjoner.



### 3.2 Materiale og metoder

#### Laserdata

Tre ALS-prosjekter ble utvalgt på grunn av dekning av topografi, arealbruk, vegetasjon og skogsbilvegnett (Fig 2). Området har en samlet størrelse av 2 470 km<sup>2</sup>. Høyden varierer mellom 0 og 1422 m.o.h.. LiDAR-dataene har en gjennomsnittlig punktskytetthet på 5 punkter/m<sup>2</sup>:



Figur 18. Oversikt over prosjektområdene

Tabell 6. Prosjektdetaljer

Prosjekt	Prosjektnummer	Sensor	Dato	Area (km <sup>2</sup> )	Transects training	Transects validation
1 Gjerdrum Ullensaker Nannestad 5pkt	LACHVI04	Riegl VQ-1560ii	04/2020	449	473	176
2 Atndalen laser 5 pkt	LACHHE64	Riegl VQ-1560ii	06/2020	204	777	193
3 Viken 5pkt	LACHVI11	Riegl VQ-1560ii	04-05/2021	1818	2408	562

### Skogsveidata

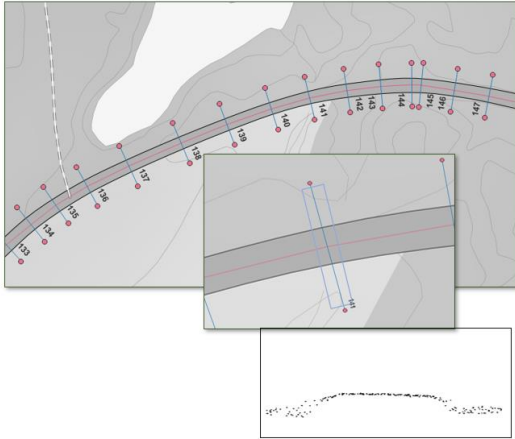
Informasjon om skogsbilveier i laserprosjektområdene er hentet fra Vbase, et datasett for veinett basert på Nasjonal vegdatabank (Statens kartverk 2017). Datasettet inneholder informasjon om veiernes sentrumslinjer og kategorier. Alle veier som er kategorisert som skogsveier, ble inkludert, noe som resulterte i en total lengde av skogsveier på 566 km innenfor prosjektområdets grenser.

### Databehandling

Et tilfeldig utvalg av veier ble gjort fra veidatasettet. Langs veiene ble det etablert et transektssentrum hvert 100. meter. For veisegmenter kortere enn 100 meter, ble transektssentrumet plassert i segmentets midtpunkt. Transektene strekker seg 7 meter i begge retninger, ortogonalt fra veiens sentrumslinje, og er 3 meter brede. Alle laserpunkter innenfor transektene ble ekstrahert fra



punktskyene og plottet med x-aksen ortogonalt fra veiens linje og y-aksen som høyde. Hele prosesseringsprosedyren er beskrevet i Figur 19. Foreløpige analyser viste at en bredde på 3 meter for tverrsnittene gir en punkttetthet som er tilstrekkelig for å gjenkjenne veikanter; 1 meter er for knapt, mens 5 meter er mer enn nødvendig og fører til lengre behandlingstid. Prosesseringen ble utført i R (R Core Team, 2022) ved bruk av pakken lidR (Roussel et al., 2020).



Figur 19. Transektprosedyre

### Modelltrening

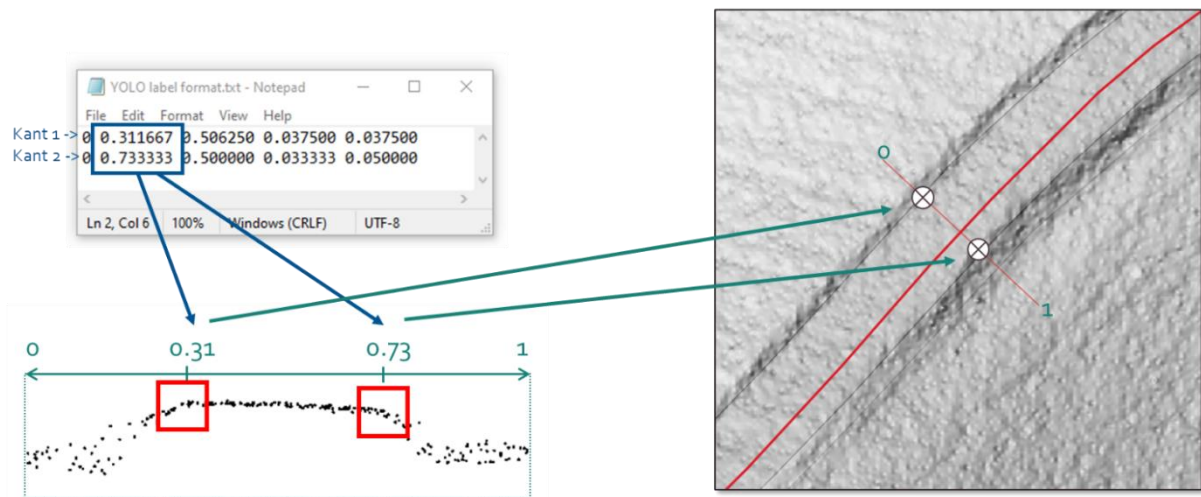
For å identifisere og klassifisere objekter i bildedataene ble det anvendt en "You-Only-Look-Once" (YOLO) bounding box-detektor (Redmon et al., 2016). YOLO er en stadig mer populær algoritme innen skogbruksrelaterte applikasjoner av datasyntese (Straker et al., 2023; Puliti og Astrup, 2022), på grunn av algoritmens evne til å oppnå høy kvalitet på maskinsyn, samt dens brukervennlighet og effektive implementering i virkelige scenarier. Bruk av konvolusjonelle nevralt nettverk (CNN) eller dyp læring er spesielt fordelaktig, ettersom de gir robuste løsninger på komplekse visuelle gjenkjenningssoppgaver.

Til modelltrening brukte vi YOLOv8 nano og large med forskjellige innstillinger for å finne den beste konfigurasjonen til å detektere vegkantene. Etter manuell annotering av veikanter i 4784 veitransekter, ble dataene delt inn i et treningssett (80 %), et valideringssett (10 %) og et testsett for å anvende de endelige modellene. Kun transekter der begge veikanter var synlige ble benyttet til modelltrening.

### Bestemmelse av veigeometri

Ved prediksjon produserer YOLO text filer med lokale koordinater av detekterte objekter i bildet. Disse koordinater ble transformert tilbake til geografiske koordinater på transektlinjen for å stedfeste kantposisjonene (Figur 20).

De predikerte kantene representerer veikantene på hver side, slik at veibredde kan bestemmes som en primær veigeometrifunksjon. I tillegg, utgående fra tverrsnittet fra veikant til veikant, kan midtlinjens plassering bestemmes på rett posisjon i linjesegmentet. Ved å ekstrahere verdiene fra en digital høydemodell på midtlinjekoordinatene, kan man benytte høyde over havet for å beregne stigningen fra tverrsnitt til tverrsnitt som en gjennomsnittlig stigning for veiens retning.



Figur 20: YOLO oppdaget veikant (bounding box) og bestemte plasseringskoordinater på transekten

### Kurveradius

For å beregne kurveradius, ble det utviklet en metode som utnytter prinsippene fra to-dimensjonal vektoranalyse. Denne metoden tar i bruk veikoordinatene og for å bestemme endringer i retningen og kurvatur ved hvert punkt på veien med hjelp av differensialregning. For å forbedre nøyaktigheten i beregningene, benyttes en glattingsteknikk på koordinatdataene for å redusere støy. Denne teknikken er spesielt relevant når man arbeider med data som inneholder små uregelmessigheter, som det forekommer i veigeometrier.

Kurvaturen beregnes ved å først finne de første og andre deriverte av koordinatene. Disse deriverte representerer henholdsvis endringen i retning og endringen i kurvatur langs veien. Ved å kombinere disse deriverte, kan man utlede en nøyaktig måling av veiens kurvaturhastighet i hvert punkt. Kurveradius  $R$  kan bestemmes av kurvatur  $\kappa$  ved bruk av formelen:  $R = 1/\kappa$

Videre ble transformasjonsmetoder anvendt for å konvertere geografiske koordinater til et mer hensiktsmessig koordinatsystem for romlig analyse. Denne transformasjonen er kritisk for å sikre at beregningene av veiens kurvatur er både nøyaktige og relevante for veiens skala. Etter transformasjonen beregnes kurvaturen for hvert veisegment, og resultatene integreres med den eksisterende veidataen.

## 3.3 Resultater og diskusjon

### Modell

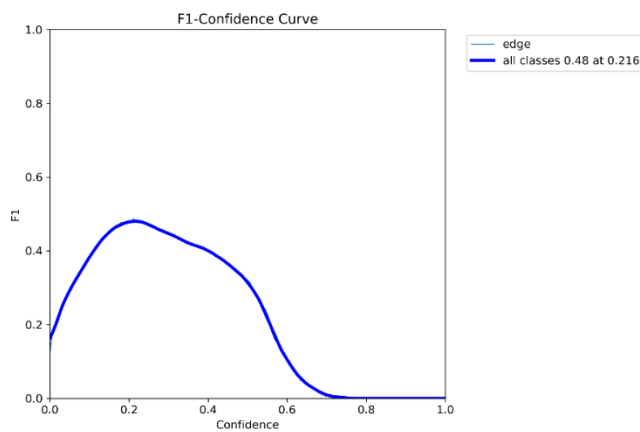
To versjoner av YOLOv8, spesifikt nano- og large-versjonen, ble evaluert. Disse versjonene skiller seg fra hverandre i antall inngangsparametere. Generelt sett medfører en økning i antall parametere høyere nøyaktighet av prediksjoner, men på bekostning av redusert hastighet. For å bekrefte hvilken modell som var mest egnet, ble to treningsløp utført – ett med nano- og ett med large-versjonen av YOLOv8. Nano-versjonen, som krever mindre minne, tillot en batch-størrelse på 64 transekter for hver

kjøring, mens med large-versjonen var det kun mulig å bruke 8 transekter per kjøring på grunn av dens større minnekrav.

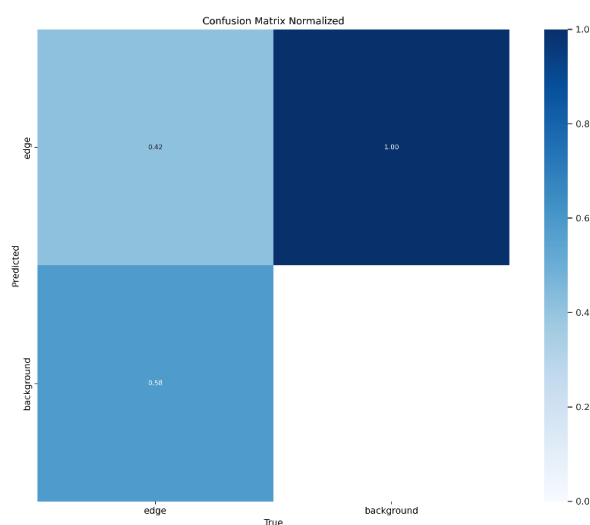
Modelltrening var opprinnelig oppsett med 500 kjøringer, men begge treningsløpene avsluttet prosessen før, med nano-versjonen etter 171 kjøringer og large-versjonen etter 172 kjøringer, noe som indikerer at ingen ytterligere forbedring av modellen var oppnåelig.

Grafen i Figur 21 viser en F1-tillitskurve, som gir en visualisering av modellens presisjon og gjenkallelse for ulike tillitsnivåer. En høy F1-score indikerer god balanse mellom presisjon og gjenkallelse, mens tillitsverdien gir en indikasjon på modellens sikkerhet i sine prediksjoner. Fra kurven kan vi se at modellens optimale ytelse oppnås med en F1-verdi på 0,48 ved en tillitsverdi på 0,2. Dette resultatet fra modellvalideringen indikerer hvor effektivt modellen kan gjenkjenne og klassifisere veikanter under gitte tillitsgrenser.

Modellytelse ble evaluert basert på nøyaktighet til å detektere vegkanter i valideringsdatasettet. Vegkantene ble detektert med 35% og 42% nøyaktighet for henholdsvis YOLOv8 nano og large (Figur 22).



Figur 21: F1-tillitskurve for modellen brukt med YOLOv8 large

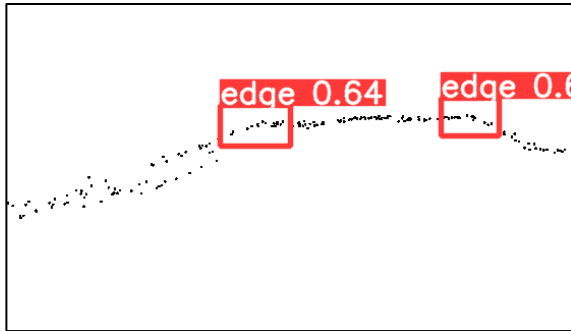


Figur 22: Confusion Matrix for modellen brukt med YOLOv8 large.

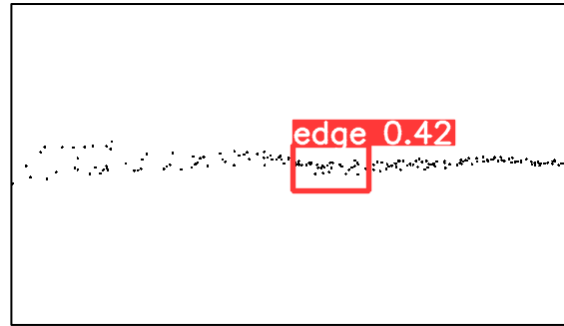
## Beregning av veimidtlinjer og -geometrier

Nøyaktig detektering av veikantene på tverrsnittene er en forutsetning for å bestemme veigeometrien. Et veitverrsnittprofil fra laserdata kan være mangfoldig og avhengig av veistandard og stedforhold, og tetthet og kvalitet av laserskanningsdataene. Derfor følger den ikke alltid en tydelig profil med grøfter, kanter og skråninger. En bred rekke profiltyper av ulike terrengetyper ble inkludert i modellens trening og valideringsprosess. Imidlertid, selv om den presterer godt på opphøyde veikropper (Figur 23), forårsaker avvik fra en standardprofil ofte feil i kantdeteksjonen, og begrenser dermed bruksområdet. For eksempel, på veldig flate veier med manglende skjærings- og fyllingsskråninger og svært grunne grøfter, er det bare én eller ingen kant som er oppdaget (Figur 24), sammenlignet med senkede veier i en ravedal hvor flere kanter er oppdaget (Figur 25). I andre tilfeller oppstod feil oppdagelse av kanter utenfor veikroppen, for eksempel hvis tydelige terrengformer ved siden av veien oppsto med utseendet av kanter (Figur 26). I tillegg finnes det også problemer i nærheten av kryss og ved parallelle veibaner, hvor mer enn to veikanter forekommer i laser-tverrsnittsprofilet.

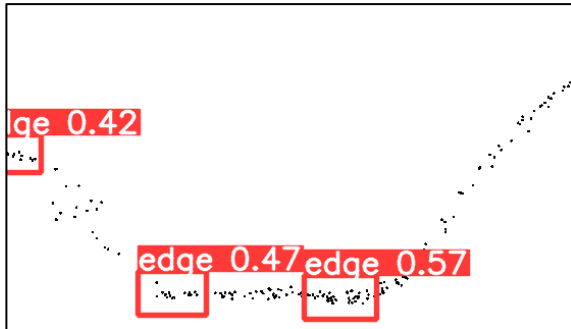
Veikantlinjen bestemmes fra de predikerte veikantene. En enkel måte er å legge en line gjennom hver enkelt kantdeteksjon. For å minimere feilaktige deteksjoner kan det tenkes en enkel metode som bruker modellkonfidensverdiene. For hver side av veien ble en linje tilpasset de forutsagte kantkoordinatene ved hjelp av en spline-algoritme og en moving-window-metode. Deretter blir veikanten midlet både fra spline-interpoleringen og hver forutsagt kantkoordinat ved bruk av konfidensverdien som en vekt.



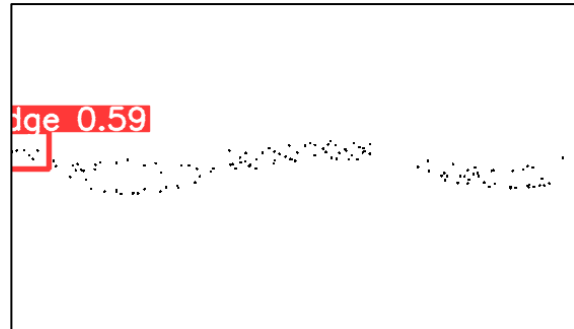
Figur 23: Riktig deteksjon



Figur 24: En eller ingen kant oppdaget



Figur 25: Mer enn to kanter



Figur 26: Feil deteksjon

Med den beskrevne metoden er riktig bestemmelse av midtlinjen begrenset til rette veistrekninger, siden midtlinjen er plassert direkte i midten av veibanen. I kurver, derimot, følger den planlagte midtlinjen den ytre kanten på en gitt avstand som i Norge er 2 meter fra ytre kant med minimum veibredde på 4 meter (klasse 3-5) i henhold til "Normaler for landbruksveier", på grunn av utvidelseskrav som skal foretas i innersvingen. Derfor inneholder den presenterte tilnærmingen en noe avvikende midtlinje, som i en viss grad også påvirker beregningen av kurveradius og dermed bestemt krumning. Imidlertid, med tanke på den delvis store avstanden fra digitaliserte midtlinjer fra tidligere anvendte fjernmålingsmetoder, som bruk av ortofoto, representerer den presenterte tilnærmingen allerede en betydelig forbedring.

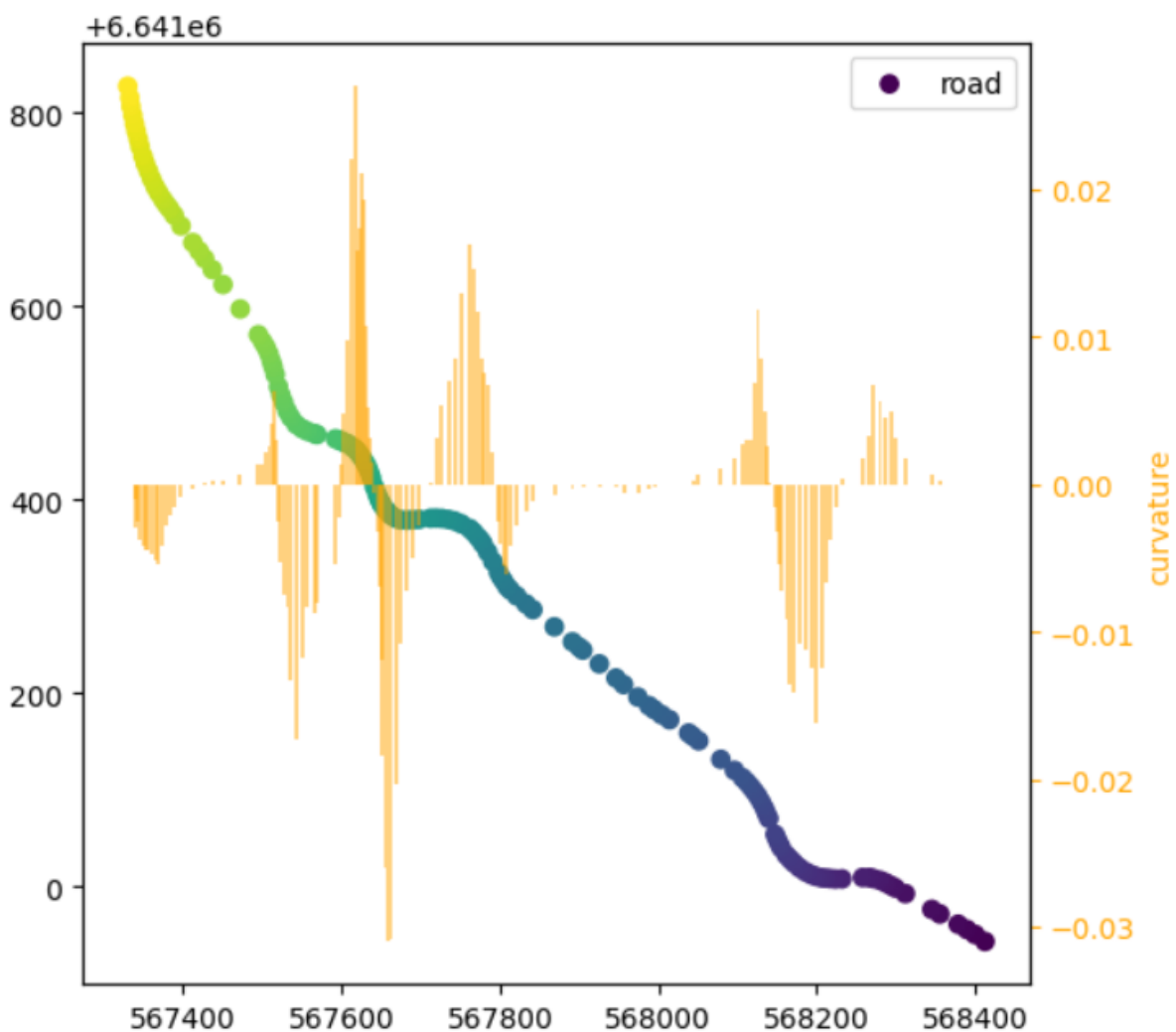
Likevel er det begrensninger knyttet til kantdeteksjonskapasiteten, som også kan være relatert til punktskytettheten. Høy tetthet av punktskyer er ikke tilgjengelig over hele Norge, og der dataene er tilgjengelige, er de ikke alltid nylig eller hyppig oppdatert. Derfor kan analyser basert på ALS-punktskydataene gjenspeile en tidligere tilstand som ikke er i tråd med dagens veisituasjon.

Nevnte begrensninger fører til at metoden er ikke operativ brukbar for tiden. Imidlertid utvikles en annen tilnærming innenfor SmartForest-prosjektet, der RoadSens-mobil nærhetssensorplattform med stereokamera og høytytende GNSS, som er montert på en vanlig personbil, brukes til å skanne veier mens den kjører. Veikantene bestemmes gjennom en objekt-deteksjonsmodell som brukes på georefererte videorammer, og som trekker ut et veikropps-bilde basert på punktskyen fra stereokameraet. Denne tilnærmingen garanterer en oppdatert undersøkelse av den aktuelle veien, men krever en kjøretur over veien, en tidkrevende innsats igjen.

Med fokus på innledende undersøkelser for å fullføre skogsbilvei-databaser, har den presenterte tilnærmingen uansett et stort potensial på grunn av mulig bruk på store områder til tross for nåværende begrensninger. Men for oppfølgingsundersøkelser kan andre tilnærminger som RoadSens være mer hensiktsmessige. Begge tilnærmingene viser mulighetene som stammer fra objekt-deteksjonsalgoritmer som YOLO. Men begge tilnærminger står også overfor ytelsesmangler som

kan reduseres ytterligere gjennom modellforbedringer, for eksempel mer treningsdata, en betydelig utfordring for skogsbilveilmiljøet, hvor det i forhold til asfalterte veier eksisterer en enorm variasjon av strukturer, former og utseende.

Studien viste at objekt-deteksjonsmodeller basert på dyp læring, spesielt YOLO, kunne identifisere veikantene i lasertvernsnittsprøfer med høy nøyaktighet. Det var imidlertid begrensninger knyttet til kantdeteksjonen, spesielt i situasjoner med avvik fra standard veiprofil og lav punktskytethet. Uansett ser vi et stort potensial for en første undersøkelse av skogsbilveier, mens andre tilnærminger som RoadSens kan være mer hensiktsmessige for oppfølgingsundersøkelse. Begge tilnærmingene drar nytte av objekt-deteksjonsalgoritmer som YOLO, men krever fortsatt forbedringer for å håndtere variasjonen i skogsbilveiers strukturer, former og utseende.



Figur 27: eksempel av veikurvatur

### 3.4 Referanser

Kartverket (2017). Nasjonal vegdatabank. Url: [www.vegvesen.no/fag/teknologi/nasjonal-vegdatabank/hva-er-nasjonal-vegdatabank/](http://www.vegvesen.no/fag/teknologi/nasjonal-vegdatabank/hva-er-nasjonal-vegdatabank/) [accessed: 10.01.2024]

Puliti, S., & Astrup, R. (2022). Automatic detection of snow breakage at single tree level using YOLOv5 applied to UAV imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102946.

R Core Team, R. (2013). R: A language and environment for statistical computing.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 779-788).

Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R., Meador, A. S., ... & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112061.

Straker, A., Puliti, S., Breidenbach, J., Kleinn, C., Pearse, G., Astrup, R., & Magdon, P. (2023). Instance segmentation of individual tree crowns with YOLOv5: A comparison of approaches using the ForInstance benchmark LiDAR dataset. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 9, 100045.