

Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp
Institutt for Naturforvaltning

Bæreevnemåling av skogsbilveg med håndholdt falloddsmåler

Measuring Carrying Capacity of Forest Roads using
Light Weight Deflectometer

Henrik Tvensberg
Skogfag

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på min 5-årige utdannelse innen skogfag ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. I masteroppgaven har jeg valgt å skrive om bæreevne måling av skogsbilveg. Dette har jeg valgt fordi skogbrukets driftsteknikk har vært en av mine store interesser gjennom studietiden. Jeg vil med dette rette en stor takk til min veileder førsteamanuensis Jan Bjerketvedt for god veiledning gjennom arbeidet med oppgaven og for god hjelp under feltarbeidet. Jeg vil også få takke mine medstudenter for mange minnerike minner fra skogbrukersalen.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, Norge, 11. mai 2016

Henrik Tvengsberg

Sammendrag

Store deler av skogbilvegnettet i Norge ble bygd på 1960- og 70 tallet, da gikk transporten fra fløting og mer over på tømmerbil. Det har i nyere tid blitt en markant økning i tømmerbilenes totalvekt fra 42 tonn og 8 tonns aksellast på 70- tallet til 60 tonn totalvekt og 10 tonns aksellast i 2013. Den økte totalvekten og økt nedbør som følge av klimaendringer fører til at store deler av skogbilvegnettet trenger opprustning og forsterkning.

I denne oppgaven ble det sett på muligheten for bruk av håndholdt falloddsmåler (Leight weight deflectometer, LWD) av merket Prima 100 for å beregne bæreevnen på skogbilveg. Dette ble gjort ved å måle etter en konvensjonell falloddsmåler (Falling weight deflectometer, FWD) på tre forskjellige veger på Østlandet i Norge. Resultatene viste en sammenheng på $FWD = 1,0432 * (Prima\ 100)$ med en R^2 på 0,68 for beregnet bæreevne i tonn.

Korrelasjonskoeffisienten for Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler viste enn sammenheng på 0,82. Korrelasjonskoeffisientene mellom Prima 100 og geofonene til den konvensjonelle falloddsmåleren, viste en sammenheng ned til 30 cm i vegoverbygningen. Det ble videre sett på om den håndholdte falloddsmåleren ble påvirket av den konvensjonelle falloddsmålerens. Der ble det ikke funnet noen trend til for høye eller for lave verdier.

I studiet ble det målt med 30 cm og 60 cm avstand fra hverandre for å se på variasjonen langs vegen. Her ble det funnet standardavvik på henholdsvis 2,0 tonn og 3,3 tonn. Det viser til stor variasjon langs med skogbilvegen. Kostnadene for å bruke konvensjonell falloddsmåler er store, dette fordi det er få lokalisert i Norge og transportavstanden blir stor. Håndholdt falloddsmåler er mer fleksibel, og kan være et godt alternativ til den konvensjonelle falloddsmåleren for å finne svakhetene i vegen.

Abstract

A large part of the forest road network in Norway was built in the 1960s and 70s. Then, the transportation went from log floating to the forest roads. Recently there has been an increase in timber trucks total weight, from 42 tons and 8 tons axle load in the 70s to 60 tons gross vehicle weight and 10 tons axle load in 2013. A large part of the forest roads needs to be upgraded and reinforced because of rainfall and the increased total weight of the timber trucks and.

The current study used a light weight deflectometer (LWD) branded Prima 100 to calculate the carrying capacity of the forest road. This was done by using a falling weight deflectometer (FWD) on three different roads in eastern parts of Norway. The results showed a correlation of $FWD = 1.0432 * (Prima\ 100)$ with an R^2 of 0.68 for the estimated carrying capacity in tons. The correlation coefficient for Prima 100 and FWD was 0.82. The correlation coefficients between Prima 100 and geophones to the FWD, showed a connection down to 30 cm road foundation. Furthermore, it was investigated whether the LWD was affected by the FWD. No trends were found.

In this study, it was measured at 30 cm and 60 cm distance from each other to look at the variation along the road. Standard deviations of 2.0 tons and 3.3 tons were observed, respectively. It shows the great variety along with forest car road. The costs of using FWD measures are large, because there are few of them in Norway and transport distances are great. LWD measures are more flexible and can be a good alternative to FWD when used to find weaknesses in the road.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag.....	II
Abstract	III
1 Innledning.....	1
1.1 Klima og vann	1
1.2 Skogsbilveger	1
1.3 Bæreevne måling	4
1.4 Tidligere undersøkelser	5
1.5 Problemstilling.....	6
2 Metode.....	7
2.1 Studieområde	7
2.2 Måleutstyr.....	10
2.2.1 Prima 100	10
2.2.2 Konvensjonell fallodds måler	12
2.2.3 Terratest 5000	15
2.3 Formler	15
2.4 Statistikk og beregninger	17
3 Resultater.....	19
3.1 Bæreevnen til vegene.....	19
3.2 Sammenhengen mellom fallodds målerne	23
3.2.1 Sammenhengen mellom Prima 100 og konvensjonell fallodds måler	23
3.2.2 Påvirkningen i vegoverbygningen	26
3.2.3 Sammenhengen mellom Terratest 5000, Prima 100 og konvensjonell fallodds måler	27
3.3 Kontrollmålinger	28
3.4 Kostnader.....	30
4 Diskusjon.....	32
4.1 Bæreevnen til vegene.....	32
4.2 Sammenhengen mellom FWD og Prima 100	33
4.3 Påvirkningen i vegoverbygningen	34
4.4 Sammenhengen mellom Terratest 5000, Prima 100 og konvensjonell fallodds måler ...	35
4.5 Kontrollmålinger	35
4.6 Kostnader.....	36
5 Konklusjon	38
6 Referanser.....	39

1 Innledning

Skogsbilvegnettet i Norge har til formål å frakte tømmeret ut i fra skogen med tømmerbil og frem til industrien. Dette er for å senke transportkostnadene med lassbæreren som frakter tømmeret fra skogen og frem til bilveg. I 2015 ble det hogd 10 159 000 kubikk med tømmer, av dette ble 40% eksportert (SSB 2016). I dag blir tømmeret hogget året rundt, siden industrien ønsker ferskt tømmer (Mohtashami et al. 2012). Dette fører til at skogsbilvegene blir brukt året rundt.

1.1 Klima og vann

Klima har påvirkning på hvordan bæreevnen i vegen er. Med mer vann i vegen vil vegen bli svakere og tåle mindre trafikk. Når vanninnholdet i vegen øker i teleløsningen vil styrken til vegen 50 cm ned i vegoverbygningen svekkes med 48% og ved 120 cm dybde vil den svekkes 63% (Salour & Erlingsson 2013). I dag ser vi at det blir tidligere teleløsning og mer nedbør (Andreassen et al. 2015). Dette fører til at bæreevnen og dreneringen til vegene blir viktigere og viktigere i fremtiden.

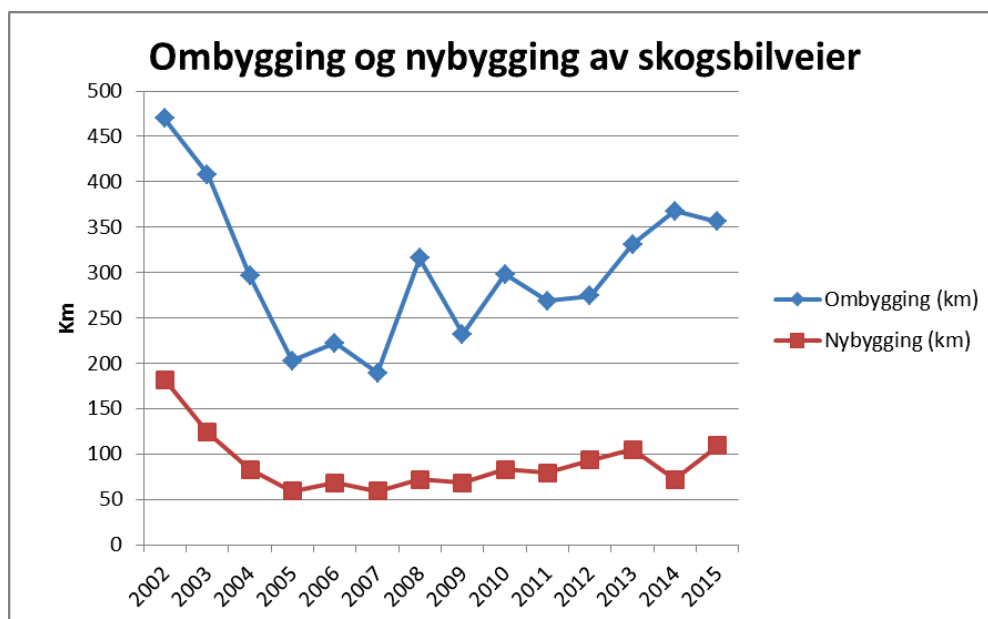
1.2 Skogsbilveger

Fra 1960 og utover ble store deler av tømmerfløtingen opphørt, dette fordi det var billigere å frakte tømmeret med tømmerbiler og mindre arbeidskrevende (Bjerketvedt & Gjerdjernet 2003). Vegene som den gang ble bygd, ble bygd for lastebiler med en tillatt aksellast på 8 tonn (Glommen-skog 2012). I 1980 ble kravene for aksellast endret til dagens krav på 10 tonn (Glommen-skog 2012). Lengden og vogntogets totalvekt var også mindre før. På 70-tallet var det 18,5 meters vogntoglengde med en totalvekt på 42 tonn. Dette ble endret i 1984 til 22 meters lengde og en totalvekt på 50 tonn. I 2008 ble totalvekten endret til 56 tonn, og i 2012 ble det vedtatt en lengde på 24 meter (Glommen-skog 2012). Den 23.10.2013 ble den tillatte totalvekten for tømmerbiler økt fra 56 tonn til 60 tonn (SVV 2013).



Figur 1. Byggeaktiviteten av nye skogsbilveger i Norge fra 1951 til 2014 (Landbruksdirektoratet 2016).

I Norge er det registrert ca. 48 000 km med skogsbilveger, det meste av nybyggingen av vegene skjedde fra 1951 og frem til toppåret i 1968 med 1 600 km (Landbruksdirektoratet 2016). På denne tiden ble vegene bygget for å frakte tømmeret til industrien ved hjelp av lastebiler. Etter toppåret i 1968 har byggeaktiviteten av skogsbilveger sunket jevnt frem til 1980 der den flatet ut med et årlig gjennomsnitt på 800 km nybygging av skogsbilveg i året (Landbruksdirektoratet 2016). Etter 1990 har aktiviteten fortsatt med å synke til den har flatet ut igjen i 2004 med ca. 80 km nybygde skogsbilveger. I 2015 ble det bygd 109 km med ny veg (Landbruksdirektoratet 2016).



Figur 2. Byggeaktiviteten på nybygg og ombygging av skogsbilveger fra 2002 til 2015 (Landbruksdirektoratet 2016).

I 2002 ble det bygd om 470 km med skogsbilveg til en høyere vegklasse. Denne aktiviteten har sunket frem til 2005 der den var på 203 km (Landbruksdirektoratet 2016). Etter 2005 har ombygningsaktiviteten økt frem til 2014 med 368 km i året. I 2015 ble det ombygd 356 km med skogsbilveg (Landbruksdirektoratet 2016).

Kostnadene for ombygning av skogsbilveg har vært varierende fra 2002 og frem til i dag. Det har vært i fra 210 kr/m i 2003 til det høyeste i 2015 på 340 kr/m (Landbruksdirektoratet 2016). Kostnadene for ombygning av veg varierer med vegens beliggenhet, og hvor mye som må gjøres for å få den i en høyere vegklasse. Sprenging og masseflytting er de kostnadene som drar meterprisen opp.

For å kunne oppnå veger som tåler dagens 60 tonns tunge tømmerbiler er det utviklet vegklasser for landbruksveger, der det er oppgitt hvordan vegen skal være oppbygd og hvilken utforming den skal ha. I Norge er det delt inn i 8 klasser for skogsbilveger, der klasse 1 til 6 er beregnet for tømmertransport med lastebil og klasse 7 og 8 er beregnet for tømmertransport med lastetraktor. Vegene som er beregnet for bruk av tømmerbiler i dag skal dimensjoneres for 10 tonns aksellast (LMD 2013). Vegklasse 3 er skogsbilveg som er laget for tømmerbiler med henger og kan brukes hele året, unntatt teleløsningen på våren og de våteste periodene på høsten. Mens vegklasse 2 er dimensjonert for bruk hele året av tømmerbiler med henger (LMD 2013).

I Hedmark ble det i 2015 kartlagt hvor mange veger som trenger ombygging. Av det totale vegnettet på 11 599 km bør 14% bygges om og 19% må bygges om. For veger som bør bygges om er det 56% (560 km) av hovedvegene og 49% (320 km) av sekundærvegene der bæreevnen må forsterkes. For skogsbilveger som må bygges om er det 65% (573 km) av hovedvegene og 83% (1 072 km) av sekundærvegene der bæreevnen må forsterkes i følge Tore Holaker, Fylkesskogmester driftsteknikk ved Fylkesmann i Hedmark (e-post, 30. mars 2016).

I 2012 ble skogsbilvegen i Oppland kartlagt. I denne kartleggingen ble skogsbilvegene klassifisert fra A til C. Der A er veg med få mangler, B er veg med mangler som er rimelig å gjøre noe med og C er veg som trenger tyngre opprusting. Denne undersøkelsen kom frem til at 49 % (2603,4 km) av vegene trenger tyngre opprusting (Bergum et al. 2014). Vi kan med dette se at det er store behov for å kunne klassifisere hvor sterk vegen er. I Oppland kan man antyde at 2603,4 km trenger bæreevneforsterkning, og i Hedmark er det 2 525 km der

bæreevnen må forsterkes. Det er derfor viktig med korrekte data når man skal ombygge skogsbilvegen for å kunne spare kostnader.

1.3 Bæreevнемåling

I dagens situasjon med tyngre tømmerbiler og våtere klima er det viktig at veiene holder de kravene de skal for å kunne kjøre ut tømmeret med tømmerbil til industrien. Det er derfor viktig at veier som er opprustet til en vegklasse virkelig holder de kravene som den er laget for, og med dagens priser på opprustning er det viktig at kostnadene blir brukt der de skal. Nøyaktig kartlegging av vegens styrke kan med dette redusere kostnaden.

I et studie av Christoffersson og Johansson (2012) i Sverige ble det brukt georadar og konvensjonell fallodds måler (Falling Weight Deflectometer, FWD) før opprustning av vegen startet for å kartlegge styrken til vegen. Georadar er et utstyr som skaper et bilde av vegoverbygningen ved å skanne vegen kontinuerlig for å kartlegge hvordan laginndelingen er i vegoverbygningen. Den kan ikke benyttes til å finne kornfordelingen (Aurstad et al. 2011). Konvensjonell fallodds måler er et utstyr som slipper et lodd mot en plate og en serie med geofoner registrerer nedbøyningen fra platen. Dette gjøres for å simulere belastningen på vegen av en lastebil som passerer, normalt en hjullast på 5 tonn (Aurstad et al. 2011). For å kartlegge de svake punktetene i vegen og for å beregne hvor mye forsterkning som er nødvendig for å få vegen opp til en styrke på 90 MPa ble hele vegen skannet med georadar og det ble anlagt kontrollmålinger med konvensjonell fallodds måler. Med bruk av dette utstyr kom de frem til at de sparte minst 14 til 51 % i forhold til tre erfarende vegplanlegger. Dette fordi det ble forsterket der det trengtes forsterkning og med riktig mengde (Christoffersson & Johansson 2012).

For å kunne beregne hvor mye forsterkning som skal til for å tilfredsstille bæreevnen er det viktig å kunne samle inn korrekt data om vegoverbygningens bæreevne. Det har igjennom tidene blitt brukt mange forskjellige typer måleutstyr. Fallodds måleren ble utviklet i Danmark, i 1964 ble starten på fallodds måleren og for første gang utprøvd (Bohn). En fullskala fallodds måler er meningen at skal simulere belastningen på vegen til en lastebil som passere et punkt (Kaakkurivaara et al. 2015). Problemene i dag med bruk av konvensjonell fallodds måler er at de er veldig dyre å leie inn. Det er svært kostbart for en enkelt skogeier å leie inn utstyret for en dag. Prisen for bæreevнемåling med en konvensjonell fallodds måler er på ca 3000-4000 kr pr. kilometer ved 40 målepunkter pr. km i følge Ivar Faksdal, senioringeniør areal og samferdsel i Rambøll (E-post, 04.03.2016). Prisen er avhengig av hvor

mange målepunkter som skal utføres per kilometer og hvor langt det er til utstyret sin lokalisering. Rambøll har en og Statens vegvesen har tre konvensjonelle fallodds målere i følge Ivar Faksdal, senioringeniør areal og samferdsel i Rambøll (E-post, 04.03.2016). Et annet interessant utstyr for å kunne beregne bæreevnen til vegen er håndholdt fallodds måler (Leight weight deflectometer, LWD). Dette er en forenklet utgave av den konvensjonelle fallodds måleren, med et mindre lodd og kan dermed medbringes rundt på området som skal måles.

1.4 Tidligere undersøkelser

Steinert et al. (2005) sammenlignet konvensjonell fallodds måler med håndholdt fallodds måler og fant ut at korrelasjonskoeffisient var generelt mellom 0,50 og 0,86. Håndholdte fallodds måleren viste generelt høyere verdi av elastisitetsmodul enn den konvensjonelle fallodds måleren (Steinert et al. 2005). Elastisitetsmodulen er forholdet mellom spenningen som påføres og den elastiske deformasjonen til materialet (Ormestad 2009). Whaley (1994) har sammenlignet en håndholdt fallodds måler av typen Loadman mot en vanlig fallodds måler. Han konkluderte med at målingen med håndholdt fallodds måler ikke er så nøyaktig som de er med en vanlig fallodds måler, kun en korrelasjonskoeffisient på 0,78. Han konkluderte med at håndholdt fallodds måler hadde lavere vekt på loddet som slippes. Derfor blir det en mindre sjokkbølge, og inntrengningen i vegoverbygningen blir kun i det øverste laget (Whaley 1994).

Fleming et al. (2000) sammenlignet Prima 100 og GDP (German Dynamic Plate Bearing Test) med FWD (Falling weight deflectometer) i felt. Undersøkelsen ble gjort på en veg med 450 mm knust masser over siltig leire. Der ble det funnet en korrelasjonskoeffisient på 0,97 til FWD med en R^2 på 0,6 ved bruk av Prima 100 og en korrelasjonskoeffisient for GDP på 0,63 med en R^2 på 0,38 sammenlignet med en konvensjonell fallodds måler (Fleming et al. 2000).

Steinert et al. (2006) sammenlignet Prima 100 med 20 kg lodd og FWD under tine og fryse sykluser på asfaltert veg. Han fant ut at det er bedre sammenheng mellom Prima 100 og FWD for tynnere asfalt R^2 på 0,87 enn det er for tykker asfalt R^2 på 0,56 (Steinert et al. 2006).

I et studie utført i Louisiana i USA, ble Prima 100 undersøkt både ute i felt og i laboratoriet. Ved tester på en høytrafikkert veg med en vegoverbygning bygd opp av homogene masser og god laginndeling fant de en regresjonsmodell der $FWD=0,964*(Prima\ 100)$ med en R^2 på 0,94. Den håndholdte fallodds måleren ble også testet på laboratoriet. Der ble det funnet at ved bruk av håndholdt fallodds måler har man en påvirkning ned til 270-280 mm i vegoverbygningen (Nazzal et al. 2007).

I et studie av Kaakkurivaara et al. (2015) i Finland ble det sammenlignet håndholdt falloddsmåler av typen Loadman med konvensjonell falloddsmåler på skogsbilveg. I dette forsøket ble den håndholdte falloddsmåleren utstyrt med en plate med diameter på 13,2 cm og et lodd på 10 kg som ble sluppet fra 80 cm høyde. Denne studien ble gjort i teleløsningsperiodene fra 2009 til 2012. Det ble også foretatt en måling om sommeren. I denne studien kom de frem til at den håndholdte falloddsmåleren hadde en korrelasjonskoeffisient med konvensjonell falloddsmåler for skogsbilveg bygd på mineraljord, på 0,572 for målinger i hjulsporet og -0,412 for målinger i senter av vegen. For skogsbilveg bygd på myr er korrelasjonskoeffisienten på 0,441 for hjulsporet og 0,912 for målinger utført i midten av vegen. Regresjonsmodellen viste $FWD = 0,352 * LWD + 18,9$ med en R^2 på 0,327 for veg bygd på myr, og $FWD = 0,432 * LWD + 19,5$ med en R^2 på 0,508 for veg bygd på mineraljord. Det ble også funnet en korrelasjon med LWD og D20-D0 som er nedbøyning 20 cm fra sentrum av platen minus nedbøyningen i sentrum av platen, på -0,574 og -0,503 for henholdsvis veg på mineraljord og myr. Korrelasjonskoeffisienten for D30-D0 som er nedbøyning 30 cm fra platen minus nedbøyningen i sentrum av platen, på -0,636 og -0,470 for henholdsvis veg bygd på mineraljord og myr (Kaakkurivaara et al. 2015).

1.5 Problemstilling

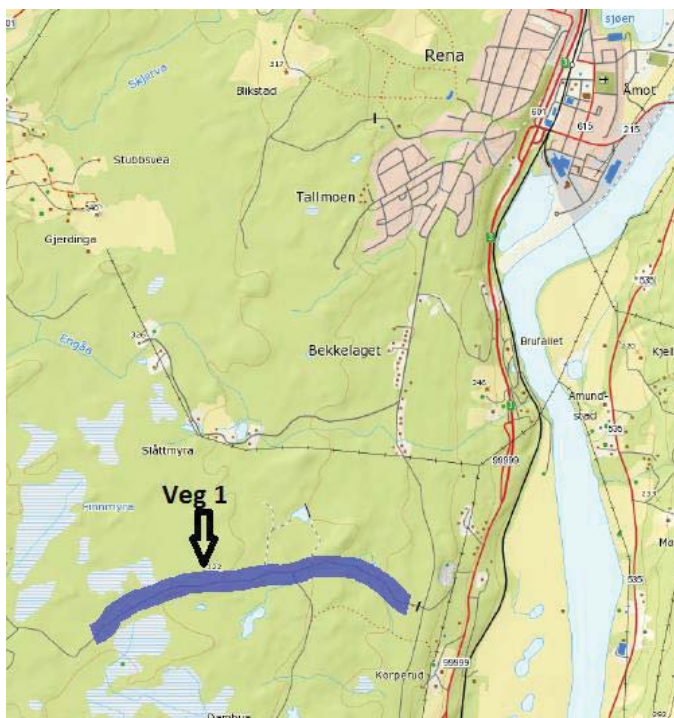
I denne oppgaven skal jeg se på bruk av håndholdt falloddsmåler til beregning av bæreevnen til skogsbilveg. Er det sammenheng mellom håndholdt falloddsmåler og konvensjonell falloddsmåler? Er håndholdt falloddsmåler et godt substitutt til den konvensjonelle falloddsmåleren for bruk på skogsbilveger?

2 Metode

I denne studien er målet å se om Prima 100 kan være et substitutt til beregning av styrken til en skogsbilveg i stedet for bruk av den konvensjonelle falloddsmåleren. Dette ble da gjort ved å måle bæreevnen til skogsbilveger med både lav og høy styrke.

2.1 Studieområde

I denne studien ble målingene utført på tre forskjellige steder i Norge, Åmot, Våler i Østfold og Aurskog-Høland. Målingene i Åmot kommune vil i denne oppgaven bli kalt Veg 1, disse ble utført 27.06.2015 på en skogsbilveg som strekker seg fra 275 meter over havet til 325 meter over havet. Vegens startpunkt er på koordinatene $61^{\circ}6'23''N$ $11^{\circ}21'23''E$.



Figur 3. Kart over Veg 1 i Åmot kommune.

Vegen strekker seg igjennom områder med tykk morene og tynn morene, og er bygd opp av stedege masser som finnes på stedet. Vegen hadde ett slitelag av knust grus, og bar preg av at den ble mye brukt. Vegens lengde er på 3000 meter og dreneringsforholdene på vegen var gode. Det fantes grøfter på begge sider av vegen, og det var stikkrenner som var intakte. Målingene ble utført ved at det ble målt høyre hjulspor først med et markert startpunkt i starten av vegen. Deretter ble det målt for hver 50 meter innover vegen, for så å ta det andre hjulsporet av vegen ut igjen med en forskyvning på 25 meter. Målepunktene av FWD ble markert og deretter målt med LWD i samme punkt som FWD hadde målt.



Figur 4. Kart over Vardeveien, Våler i Østfold.

Målingene i Våler i Østfold ble utført på Vardeveien den 11.11.2015 på en gårdsveg som ligger 120 meter over havet. Vegens startpunkt har koordinatene 59°27'47"N 11°0'10"E og er 750 meter lang. Vegens strekker seg over noe bart fjell og utover i tykke og tynne marine avsetninger med leire innhold. Vegens er bygd opp av stedegne masser, men det har blitt tilkjørt litt knuste masser for å forsterke den. Dreneringsforholdene på vegens var ikke eksisterende og vegens bar preg av at vannet ikke kom seg ut. Slitelaget på vegens var av knust grus, men det var veldig tynt lag, til ikke eksisterende slitelag. Målingene av vegens ble utført for hver 50 meter innover av vegens på venstre side og markert med spray og pinne. Det ble prøvd så godt man kunne og få målingene i hjulsporet av vegens, men på grunn av vegens tilstand og bredden på vegens ble noen målinger utført mer midt i vegens. Etter målingene med FWD, ble det utført målinger med håndholdt falloddsmåler. Der ble det gjort 3 målinger for hvert målepunkt med FWD, der den første målingen var 30 cm før, andre måling i midten av FWD målingene og siste måling 30 cm etter FWD målingene i vegretningen.



Figur 5. Kart over Veg 2 i Aurskog-Høland.

Målingene som ble utført i Aurskog-Høland kommune i Akershus ble gjennomført den 12.11.2015 på en sideveg tilhørende Ringkollveien. I denne studien vil denne vegen bli betegnet som Veg 2. Startpunktet for vegen har koordinatene 59°54'59"N 11°21'31"E. Målingene ble utført med et fast startpunkt i krysset til sidevegen og Ringkollvegen. Sidevegen strekker seg fra 165 meter over havet til 225 meter over havet. Vegen strekker seg fra tykk marine avsetninger ved startpunktet og videre til tynn marine avsetninger og over til bart fjell med stedvis tynt dekke. Vegen er bygd opp av stedegne masser med et slitelag av knust grus. Vegen bar preg av middels bruk med gressgrodde kanter, men hadde god drenering noen steder. Vegen var også delvis bygd i halvskjæring. På denne vegen ble det målt først en serie med målinger fra startpunktet i krysset til Ringkollvegen og innover Veg 2 i høyrehjulspor med 25 meter mellom hvert målepunkt inn til 250 meter. 725 meter inn på vegen ble det utført måling først med Prima 100 på 6 punkter, der de tre første er på indre hjulspor til en halvskjæring og de tre siste i ytre hjulspor til en halvskjæring. For hvert punkt ble det utført 3 målinger i serie med kjøreretningen. Der avstanden var 30 cm mellom hver måling for hvert punkt. Deretter ble det utført måling med FWD plassert i den midterste målingen. Etter at FWD hadde målt, ble det målt med Prima 100 og Terratest 5000 i samme punkt. Målingene ble utført annenhver gang med Prima 100 og Terratest 5000. Hensikten med dette var for å kunne se om den konvensjonelle falloddsmåleren hadde noen innvirkning på vegen før man målte med Prima 100. Det ble også utført 5 målinger etter hverandre i en serie

der avstanden mellom hver måling var 30 cm. Dette ble først utført med FWD, for deretter å utføre målinger annenhver gang med Prima 100 og Terratest 5000 for hvert punkt. Dette ble gjort for å kunne si noe om variasjonen langs med vegen.

2.2 Måleutstyr

I denne studien ble det brukt forskjellige typer av måleutstyr. Ved målingene som ble gjort på Veg 1, ble målingene gjort med en konvensjonell falloddsmåler fra Grontmij (nå SWECO). Den håndholdte falloddsmåleren var en Prima 100 innleid fra Grontmij. Målingene som ble gjort på Veg 2 ble det brukt en konvensjonell falloddsmåler fra Statens vegvesen av typen Dynatest 8002 og to lettere falloddsålere Prima 100 innleid fra Grontmij og en Terratest 5000.

2.2.1 Prima 100



Figur 6. Prima 100 (foto: Jan Bjerketvedt)

Prima 100 er en håndholdt falloddsmåler som er utviklet i Danmark. Falloddsmåleren er en lett versjon av de større falloddsmålerne (FWD). Prima 100 består av en plate med en

diameter på 300 mm. Denne kunne skiftes ut til plater med en mindre diameter 100 mm og 200 mm. Et lodd på 10 kg alternativt 15 kg, med en maks slipp høyde på 85 cm som slippes ned mot platen langsmed en stang. For registrering av nedbøyningen bruker Prima 100 en geofon som er plassert i sentrum av platen og registrerer nedbøyningen under den. Geofonen er av typen seismiske hastighet svingninger (seismic velocity transducer) med en nøyaktighet bedre enn $\pm 2\%$. Alternativt kan Prima 100 utstyres med 2 ekstra geofoner, men i denne studien ble det kun brukt en geofon plassert i sentrum av kontaktplaten med en diameter på 300 mm. I tillegg registrerer Prima 100 lasten som påføres platen ved hjelp av en lastcelle med en nøyaktighet på $\pm 0,1$ kN. For datainnsamlingen ble det brukt en PDA (Personal digital assistant) fra Trimble Juno 3 B, med trådløs overføring av data fra lettvekts fallodds måleren. Prima 100 har et eget dataprogram som samler inn dataene som kan igjen overføres til en Excel fil (Grontmij 2008).



Figur 7. Prima 100 (foto: Henrik Tvengsberg)

Ved gjennomføring av målingene med Prima 100 ble det først sørget for at platen hadde god kontakt med vegbanen. Når platen hadde god kontakt med underlaget ble det gjennomført 5 dropp av loddet, der det siste droppet ble brukt som resultat. Var det stor variasjon mellom det 4 og 5 droppet ble det gjennomført ytterligere flere dropp til resultatene hadde stabilisert seg best mulig.

2.2.2 Konvensjonell falloddsmåler



Figur 8. Dynatest 8002 (foto: Jan Bjerketvedt)

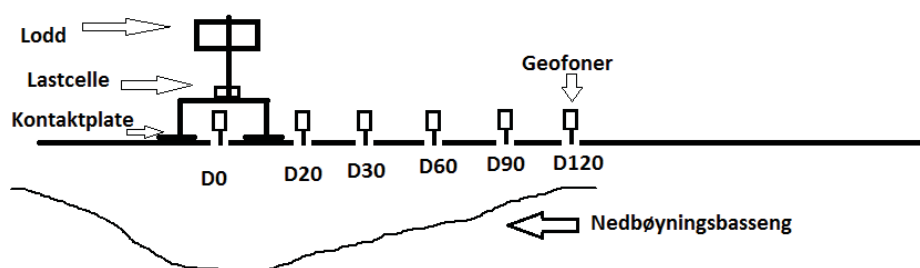
Falloddsmåleren som vegvesenet brukte ved registrering av bæreevne på Vardeveien og Veg 2, var en konvensjonell falloddsmåler som var på en biltilhenger av typen Dynatest 8002.

Dette er en falloddsmåler som kan slippe en kraft på platen med opp til 50 kN. Kraften registreres ved hjelp av en lastcelle. Platen har en diameter på 300 mm og loddet som slippes mot platen dempes av gummibuffere for å kunne få korrekt pulstid. Nedbøyningene registreres ved hjelp av 7 geofoner, der den første er plassert i sentrum av platen, deretter 20, 30, 45, 60, 90 og 120 cm fra platesentrum.



Figur 9. Pri 2509 (foto: Jan Bjerketvedt)

Den konvensjonelle falloddsmåleren som ble brukt ved bæreevne målinger på Veg 1 var av typen Pri 2509 innebygd i en bil. Belastningsplaten har en diameter på 300 mm, og kraften som benyttes er opp til 50 kN. Avstandene mellom geofonene er 0, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180 og 210 cm. Siden det er forskjellig antall og plassering av geofoner, vil det i denne studien kun bli brukt geofon plassert i sentrum av platen, 20, 30, 60, 90 og 120 cm fra platesentrum i videre beregninger.



Figur 10. Illustrasjonstegning av konvensjonell falloddsmåler (Tegning: Henrik Tvengsberg).

Nedbøyningsbassenget forklarer hvor svakheten i vegen ligger. Derfor brukes det en nedbøynings bassengindeks til å forklare svakhetene. For beregning av svakheter i bærelaget og dekket blir det brukt D0-D20 og D0-D30. For svakheter lengre ned i vegoverbygningen er det brukt D60-D90 og D90-D120. Som en tommelfingerregel representerer

nedbøyningsavstanden fra sentrum av platen til geofon, stivheten til den samme dybden vertikalt ned i vegen (Kaakkurivaara et al. 2015).

$$\frac{D_0}{D_0 - D_{20}}$$

Formel 1

For å kunne bestemme hvor svakheten i vegen er, ble det brukt Formel 1 fra vegvesenet.

Denne forteller oss hvor i vegoverbygningen man kan forvente å finne svakhetene ved bruk av nedbøyningen D_0 som er nedbøyningen i senter av platen og D_{20} som er nedbøyningen 20 cm fra senter på platen. Ved $D_0/(D_0 - D_{20}) < 3$ er det svakhet i bærelag/dekke, $D_0/(D_0 - D_{20})$ mellom 3 og 5 er det svakhet i forsterkningslaget/bærelaget og $D/(D_0 - D_{20}) > 5$ er det svakhet i undergrunn/forsterkningslag (Aurstad et al. 2011). Ved bruk av denne formelen ble resultater større enn 10 satt til 10 på grunn av at figuren skal bli enklere å lese.

2.2.3 Terratest 5000



Figur 11. Terratest 5000 (Terratest)

Terratest 5000 er en håndholdt falloddsmåler med en platediameter på 300 mm. Loddet som ble benyttet har en vekt på 10 kg. Dette lager da en kraft på 7,07 kN som fører til et kontaktrykk på 100 kPa. Terratest registrerer ikke kontaktrykket, kun den maksimale nedbøyningen (Fleming et al. 2000). Terratest 5000 er en håndholdt falloddsmåler med trådløs overføring av data, og resultatene kan skrives ut. Den er også koblet opp til GPS slik at kartreferanser kan hentes fra hvert målepunkt. Ved gjennomføring av målingene ble det utført 6 slipp, der de 3 første er for kompaktering av underlaget og gjennomsnittet av de 3 siste blir brukt til resultatet.

2.3 Formler

Prima 100 beregner elastisitetsmodulen automatisk når målingene blir utført. Formelen som blir brukt for å beregne elastisitetsmodulen er presentert i Formel 2 (Fleming et al. 2015).

$$E = \frac{A \cdot P \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d}$$

Formel 2

Her er:

E= elastisitetsmodulen i MPa

A= platestivhetsfaktor, standard= 2 for en fleksibel plate og $\pi/2$ for en stiv plate. I denne studien er A=2

P= er det maksimale kontaktrykket i kPa

r= radiusen på platen i meter. I denne studien er den (0,15m)

ν = Poisson's ratio. I denne studien er den satt til 0,35

d= er den maksimale nedbøyningen til D0

$$E_{vd} = \frac{22,5}{s_0}$$

Formel 3

For beregning av resultatene til Terratest 5000 blir de beregnet etter Formel 3. Der E_{vd} er dynamiske elastisitetsmodul og S_0 er nedbøyningen (Tompai 2008). Denne formelen er en forenkling av Formel 2 der kontaktrykket, platediameter og Poisson's ratio er konstante. Ved bruk av denne er Poissons's ratio satt til 0,5, kontaktrykket er 100 kPa og radiusen til platen er 0,15 m.

Ved beregning av bæreevnen til vegen ble det brukt bæreevne formel fra Statens vegvesen.

Formelen som ble brukt er beregnet for grusveger og presentert i Formel 4.

$$B_{grus} = 11 * \left(\frac{225 \cdot p}{D_0 \cdot 150} \right)^{0,6} * \left(\frac{50}{\text{\AA}DT_T} \right)^{0,072}$$

Formel 4

Her er B_{grus} aksellasten/bæreevnen i tonn, D_0 er nedbøyningen i senter av platen i mm og $\text{\AA}DT_T$ er antall tunge kjøretøy per døgn (Aurstad et al. 2011). I denne oppgaven har jeg valgt å bruke $\text{\AA}DT_T=5$, dette er da benyttet for alle beregninger av bæreevnen.

Disse formlene ble videre brukt for beregning av elastisitetsmodul og bæreevnen for både FWD og Prima 100 for alle målingene som ble gjort. Målingene med FWD er det kun det siste slippet av falloddet som ble brukt. For videre beregninger ved Prima 100 brukes også kun det siste slippet av loddet på hvert sted, men på grunn av data trøbbel ved gjennomføring av målingene på Veg 1 kan man kun bruke nestsiste slipp av loddet for Prima 100. Dette er fordi siste måling på forrige sted, hadde helt like verdier som første måling på neste sted.

2.4 Statistikk og beregninger

Resultatene som ble samlet inn fra Prima 100 og den konvensjonelle falloddsmålerene ble det beregnet både elastisitetsmodulen i MPa og bæreevnen i tonn ved bruk av Formel 2 og Formel 4.

Ved beregning av vegparsellens bæreevne ble det brukt kumulativ relativ frekvens, her er den dimensjonerende bæreevne til skogsbilvegen bæreevnen som 90% av vegen oppfyller (Aurstad et al. 2011).

Videre ble det beregnet hvor i vegoverbygningen svakheten ligger ved hjelp av Formel 1. Dette ble satt inn i figurer ved hjelp av Xcel. For målinger gjort på Vardeveien ble det utført 3 målinger i serie for hvert punkt. Her er det beregnet gjennomsnitt for de tre målingene og kun brukt måling nummer 2 som sammenfaller med målingen utført med den konvensjonelle falloddsmåleren til sammenligning. Det ble også beregnet gjennomsnittlig absolutt differanse mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100, og ut i fra differansen ble det funnet standardavvik. Dette ble gjort for hver enkelt veg.

Når det ble sett på sammenhengen mellom falloddsmålerene ble det brukt statistikkprogrammet R-commander versjon 3.2.3 for å kunne se på korrelasjonskoeffisienten mellom falloddsmålerne. Det ble også utført lineære regresjonsmodeller for å kunne vise hvordan sammenhengen mellom falloddsmålerne er.

Regresjonsmodellen ble utført ved hjelp av lineær regresjonsanalyse for å kunne se hvordan sammenhengen er mellom Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler. Ved lineær regresjon estimeres verdien til konvensjonelle falloddsmåleren ved å benytte seg av $y = ax + b$ der a er stigningstallet, b er konstant leddet som ble satt til å starte i origo og x er verdien som man får fra Prima 100. Dette ble utført for alle dataene samlet under ett.

For å kunne si noe om sammenhengen mellom Prima 100 og hvor den påvirker vegoverbygningen er det sett på korrelasjonskoeffisienten mellom Prima 100 og D0, D20, D30, D60, D90, D120, D0-D20, D0-D30, D60-D90, D90-120 og D0/(D0-D20).

For Veg 2 ble det utført 6 målinger før FWD og etter FWD. Der er det sett på differansene mellom målingene og standardavvikene til dem. Dette er gjort for målinger før etter med Prima 100. Målinger utført med Prima 100 før FWD. Målinger med Prima 100 etter FWD. Og gjennomsnittet til tre målinger med 30 cm mellom hver før FWD.

Ved Veg 2 ble det utført en måling i serie med 5 målinger, der avstanden mellom hver måling er 30 cm. Her er det sett på standardavviket til dem langs med vegen og den absolutte differansen mellom FWD og Prima 100.

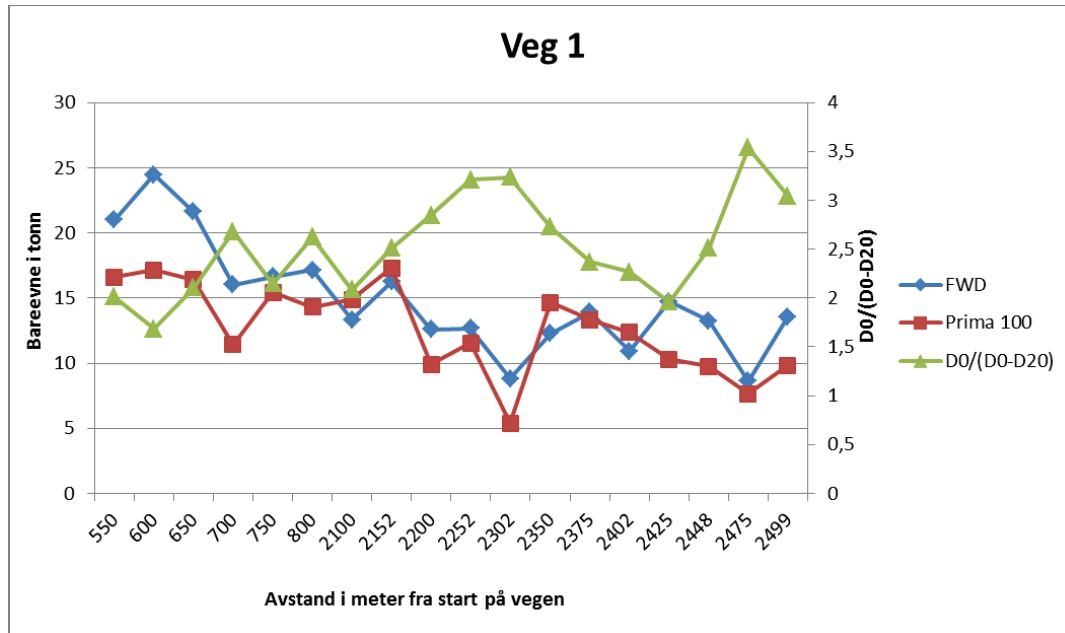
Ved sammenligning av konvensjonell falloddsmåler Terratest 5000 og Prima 100 er det brukt alle målingene utført på Veg 2. For Prima 100 er det kun brukt målingene som ble målt etter den konvensjonelle falloddsmåleren. Det er ved sammenligning sett på korrelasjonskoeffisienten og lineær regresjon.

For å kunne se på variasjonen på vegen, er det brukt måleresultatene fra Vardeveien der det ble utført tre målinger i serie med 30 cm mellomrom for hvert punkt. Her ble det sett på forskjellene for målinger gjort 30 cm fra hverandre og 60 cm fra hverandre. Det ble sett på den gjennomsnittlige absolutte differansen og standardavviket til differansen.

Kostnader er beregnet ut i fra Vardeveien der det er forutsatt 3500 kr for måling av 40 punkter pr. kilometer ved bruk av konvensjonell falloddsmåler. For bruk av Prima 100 er leiekostnaden 20 000 til 25 000 kr pr. måned i følge Ronny Eirik Hansen daglig leder i SWECO Pavement Consultants AS (telefonsamtale, 12.04.2016). Ved beregning av kostnaden for Vardeveien med Prima 100 ble det forutsatt en leiekostnad på 1000 kr pr. døgn og en lønnskostnad på 500 kr/time. Leiekostnaden for Prima 100 ble 200 kr pr. time når man forutsetter 5 timers bruk per dag.

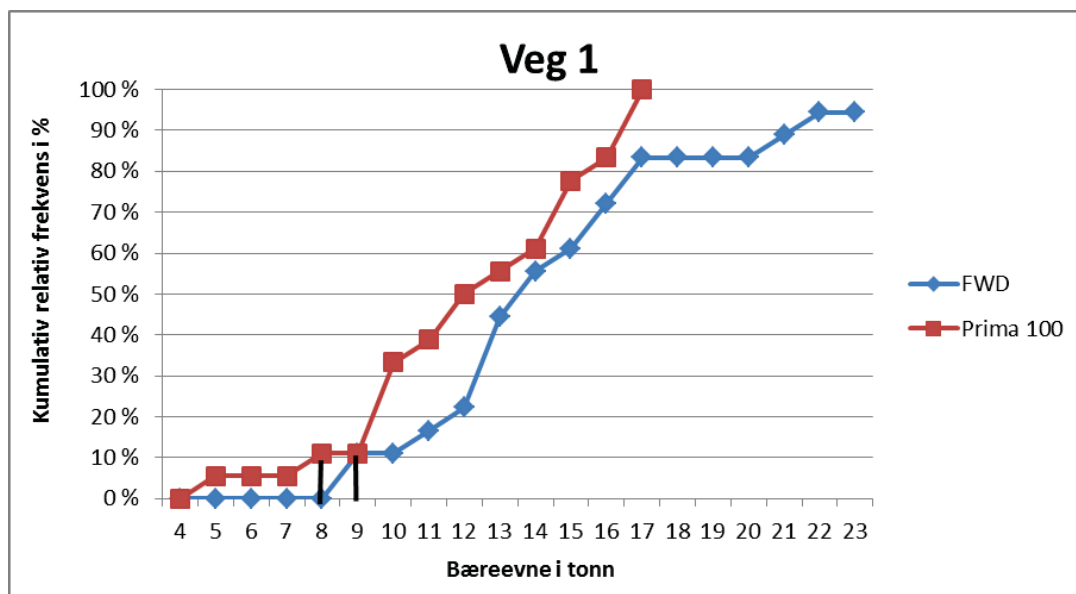
3 Resultater

3.1 Bæreevnen til vegene



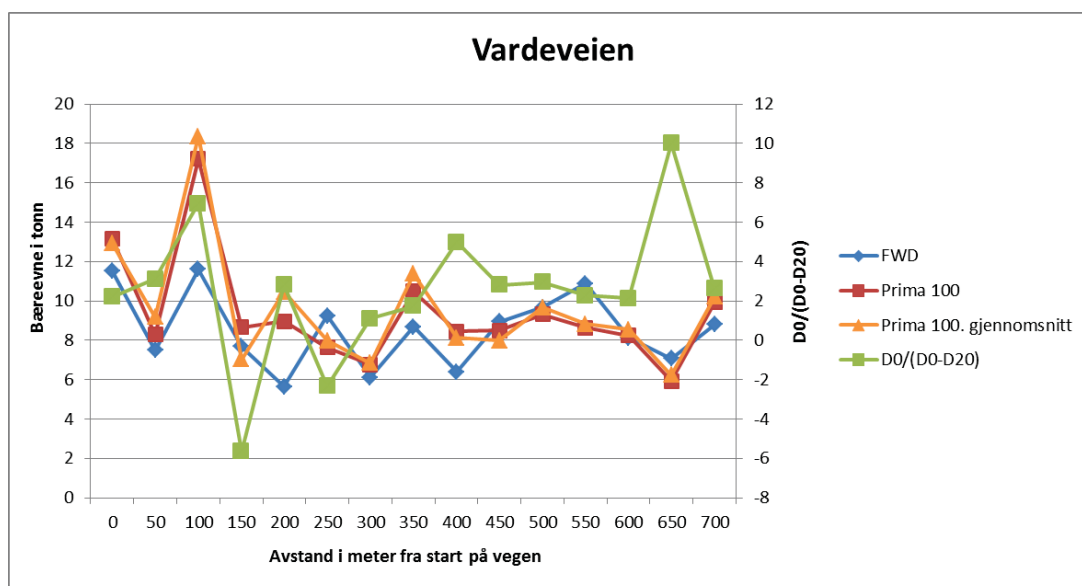
Figur 12. Beregnet bæreevne i tonn ved bruk av FWD og Prima 100 for Veg 1. «D0/(D0-D20)» viser hvor i vegoverbygningen det er behov for forbedringer.

I Figur 12 ser vi beregnet bæreevne for skogsbilvegen på Veg 1. Bæreevnen for FWD varierer mye fra 8 tonn ved 2475 meter til 24 tonn ved 600 meter. For Prima 100 varierer bæreevnen fra 5 tonn ved 2302 meter til 17 tonn ved 600 og 2152 meter. Man kan se at fra 550 meter til 800 meter er $D0/(D0-D20)$ mindre enn 3, som betyr at svakheten ligger i bærelaget eller dekket. Fra 2100 meter ligger også svakheten i bærelaget eller dekket, med unntak av ved 2252, 2302, 2475 og 2499 meter inn på vegen. Der ligger svakheten i forsterkningslaget eller bærelaget. Den absolute differansen mellom konvensjonell fallodds måler og Prima 100 er 2,9 tonn og et standardavvik på 2,7 tonn.



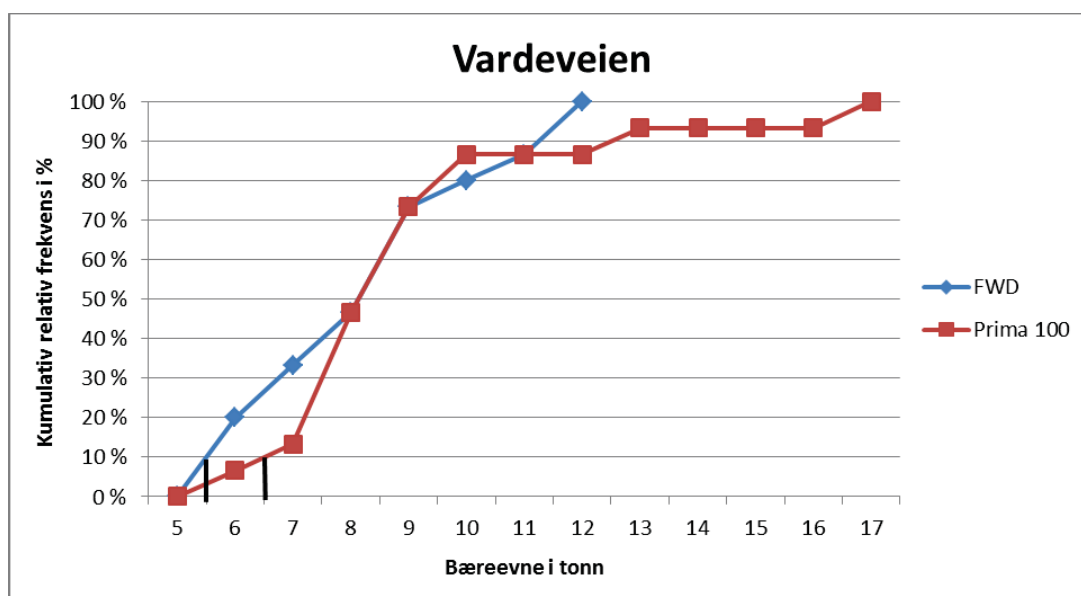
Figur 13. Kumulativ relativ frekvens for bæreevne i tonn for Veg 1, ved bruk av konvensjonell falloddsmåler (FWD) og Prima 100.

I Figur 13 ser man kumulativ relativ frekvens av bæreevnen i tonn for Veg 1. Ved bruk av konvensjonell falloddsmåler vil vegen bli klassifisert til å holde 9 tonn med en middelerdi på 14,9 tonn og minste verdi på 8,6 tonn og største verdi på 24,5 tonn. For Prima 100 vil vegen bli klassifisert til å holde 8 tonn, med en middelerdi på 12,7 tonn, minste verdi på 5,4 tonn og største verdi 17,3 tonn.



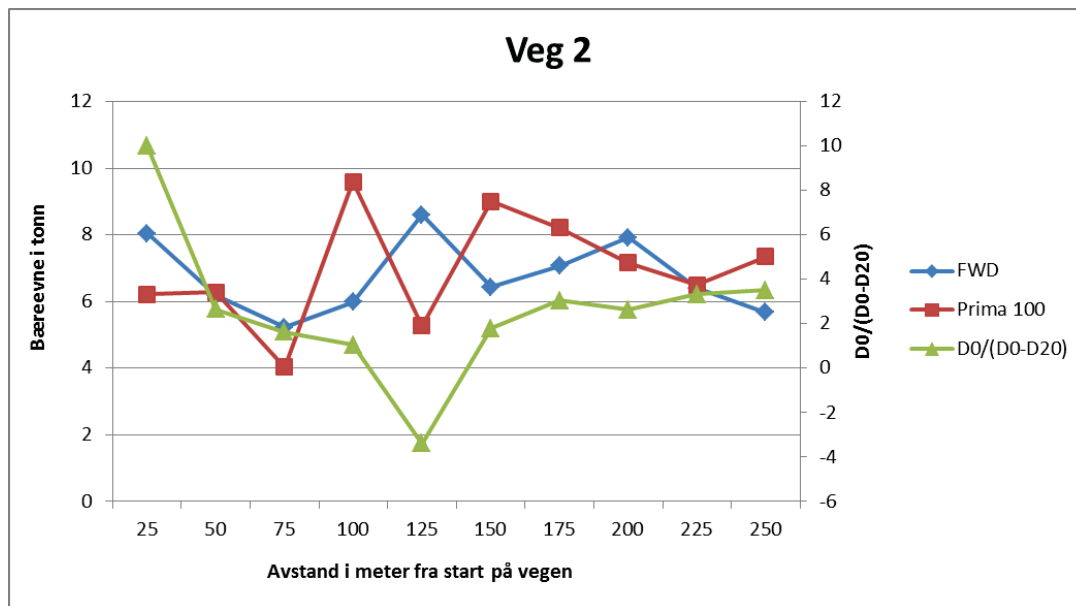
Figur 14. Beregnet bæreevne i tonn ved bruk av FWD og Prima 100 for Vardeveien. «D0/(D0-D20)» viser hvor i vegoverbygningen det er behov for forbedringer. «Prima 100, gjennomsnitt» er gjennomsnittet av bæreevnen i tonn for tre målinger utført i serie.

Resultatene fra Vardeveien viser en varierende bæreevne fra 6 tonn ved 200 meter til 12 tonn ved 0 og 100 meter ved bruk av FWD. For Prima 100 viser den en bæreevne fra 6 tonn ved 650 meter til nesten 17 tonn ved 100 meter. Man ser av Figur 14 at de gjennomsnittlige målingene tatt fra før og etter senter av målepunktet viser til å følge målingen gjort i senter av målepunktet godt. Den absolutt gjennomsnittlige differansen mellom FWD og Prima 100 er på 1,6 tonn og et standardavvik på 2,0 tonn. For den absolutt gjennomsnittlige differansen mellom FWD og Prima 100 gjennomsnitt av tre målinger, er på 1,8 tonn og et standardavvik på 2,4 tonn. D0/(D0-D20) ser man svinger fra -5 til 22, men det meste ligger rundt 2. Dette forteller oss at svakheten til vegen ligger i bærelaget eller dekket. Ved 100, 400 og 650 meter ser man at den er større enn 5. Det betyr at svakhetene ligger i undergrunnen eller forsterkningslaget.



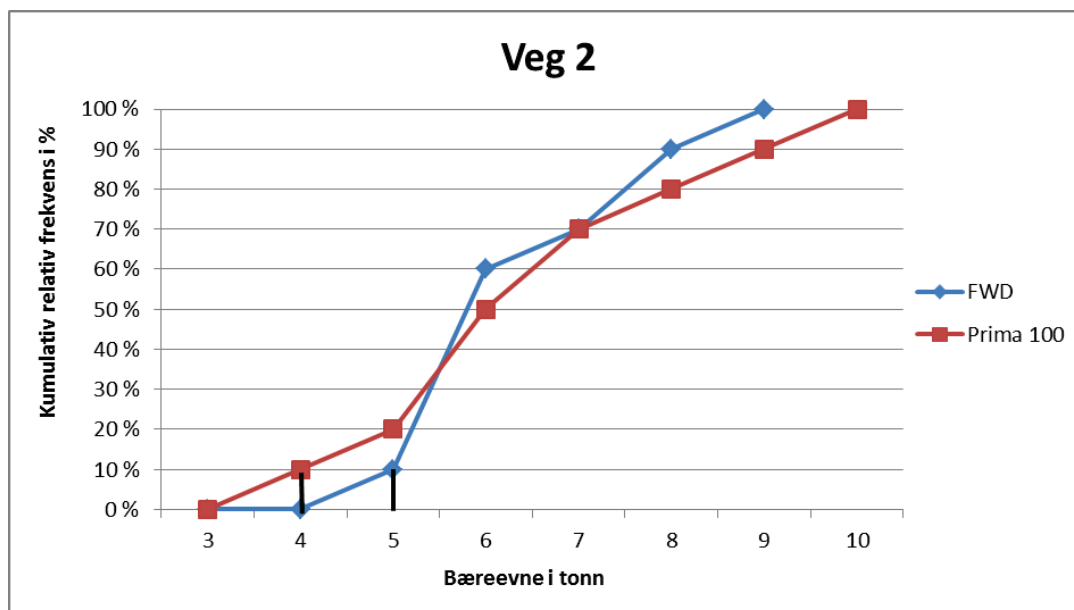
Figur 15. Kumulativ relativ frekvensen for bæreevnen i tonn på Vardeveien, ved bruk av konvensjonell falloddsmåler (FWD) og Prima 100.

Figur 15 viser kumulativ relativ frekvens for bæreevne i tonn for Vardeveien. Man ser at for FWD har veien blitt klassifisert til å holde 5,5 tonn med et gjennomsnitt på 8,5 tonn. Minste verdi er 5,7 tonn og største verdi er 11,6 tonn. Ved bruk av Prima 100 ser man at vegen er blitt klassifisert til 6,5 tonn med et gjennomsnitt på 9,3 tonn. Minste verdi er 5,9 tonn og største verdi er 17,2 tonn.



Figur 16. Beregnet bæreevne i tonn ved bruk av FWD og Prima 100 for Veg 2. «D0/(D0-D20)» viser hvor i vegoverbygningen det er behov for forbedringer.

Figur 16 viser bæreevnen i tonn til Veg 2. Denne vegen varierer bæreevnen fra 5,2 til 8,5 tonn ved bruk av konvensjonell falloddsmåler. Ved bruk av Prima 100 ser man at bæreevnen varierer fra 4,0 til 9,5 tonn. Den absolutte gjennomsnittlige differansen mellom FWD og Prima 100 er 1,6 tonn og et standardavvik på 2,1 tonn. D0/(D0-D20) er ved 25m på over 10 som betyr svakhet i undergrunnen eller forsterkningslaget. For resten av veien ligger svakheten i bærelaget eller dekket frem til 150m. Før svakheten går over til å være i forsterkningslaget eller bærelaget med unntak av måling ved 200m, der er svakheten i bærelaget eller dekket.



Figur 17. Kumulativ relativ frekvens for Veg 2, ved bruk av konvensjonell falloddsmåler (FWD) og Prima 100.

For Veg 2 viser den konvensjonelle falloddsmåleren en bæreevne på 5,0 tonn, mens ved bruk av Prima 100 viser den en bæreevne på 4,0 tonn. Den høyeste målte bæreevnen for konvensjonell falloddsmåler er 8,6 tonn og den minste er 5,2 tonn med et gjennomsnitt på 6,8 tonn. For Prima 100 er den høyeste verdien 9,6 tonn og den minste verdien 4,0 tonn med et gjennomsnitt på 7,0 tonn.

3.2 Sammenhengen mellom falloddsmålerne

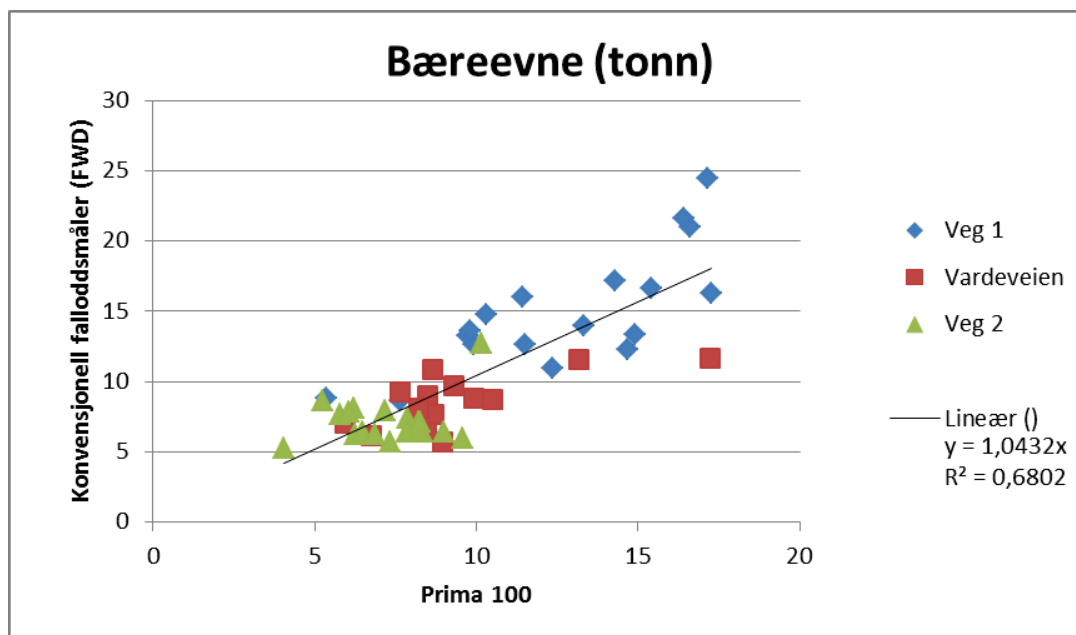
3.2.1 Sammenhengen mellom Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler

Tabell 1. Korrelasjonskoeffisienten til Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler for bæreevne i tonn og elastisitetsmodulen (E-mod) i MPa. Signifikantnivået som er benyttet er 0,05.

	Veg 1, FWD		Vardeveien, FWD		Veg 2, FWD		Samlet FWD	
	E-mod (Mpa)	Bæreevne (tonn)	E-mod (Mpa)	Bæreevne (tonn)	E-mod (Mpa)	Bæreevne (tonn)	E-mod (Mpa)	Bæreevne (tonn)
Prima 100	0,7637		0,703		-0,0132		0,8107	
	0,0002		0,0035		0,9548		<0,0001	
	18		15		21		54	
Bæreevne (tonn)		0,7737		0,6873		0,269		0,8249
		0,0002		0,0046		0,2383		<0,0001
		18		15		21		54

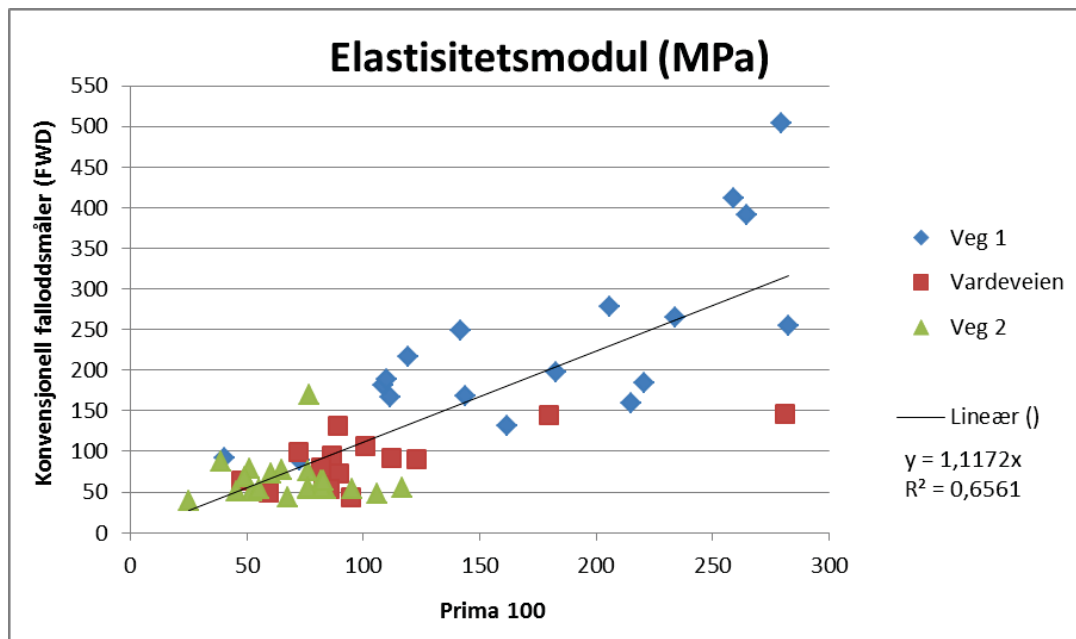
Tabell 1 viser korrelasjonskoeffisienten mellom Prima 100 og den konvensjonelle falloddsmåleren. For alle 54 målingene er den 0,82 når man regner om resultatene til bæreevne i tonn. For elastisitetsmodulen har den en korrelasjonskoeffisient på 0,81 for alle observasjonene. Korrelasjonskoeffisienten for Veg 2 er på -0,161 og -0,091 for elastisitetsmodulen og bæreevne i tonn. Videre viser p-verdien at den ikke er signifikant for

Veg 2. For Vardeveien viser Tabell 1 en korrelasjon mellom Prima 100 og den konvensjonelle falloddsmåleren 0,703 og 0,687 for elastisitetsmodul og bæreevne i tonn. Ved Rena er korrelasjonskoeffisienten på 0,764, for elastisitetsmodulen og 0,774 for bæreevnen i tonn.



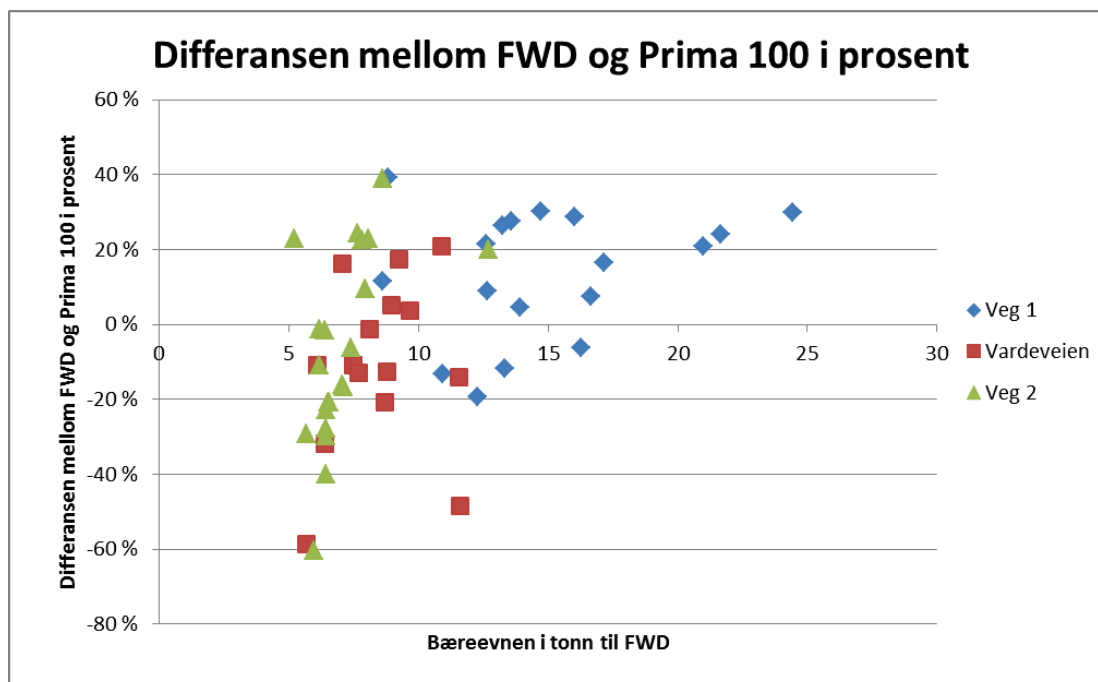
Figur 18. Sammenhengen mellom den konvensjonelle falloddsmåleren (FWD) og Prima 100 ved beregnet bæreevne i tonn.

I Figur 18 ser vi sammenhengen mellom den konvensjonelle falloddsmåleren og Prima 100 for beregnet bæreevne i tonn. Regresjonsmodell viser at $FWD = 1,0432 \cdot (\text{Prima } 100)$ med en R^2 på 0,68 for 54 observasjoner. Ut fra Figur 18 kan man se at det er en klar sammenheng mellom disse falloddsmålerne og at sammenhengen blir svakere ved høyere bæreevne. Standardavviket til differansen mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 er 2,5 tonn.



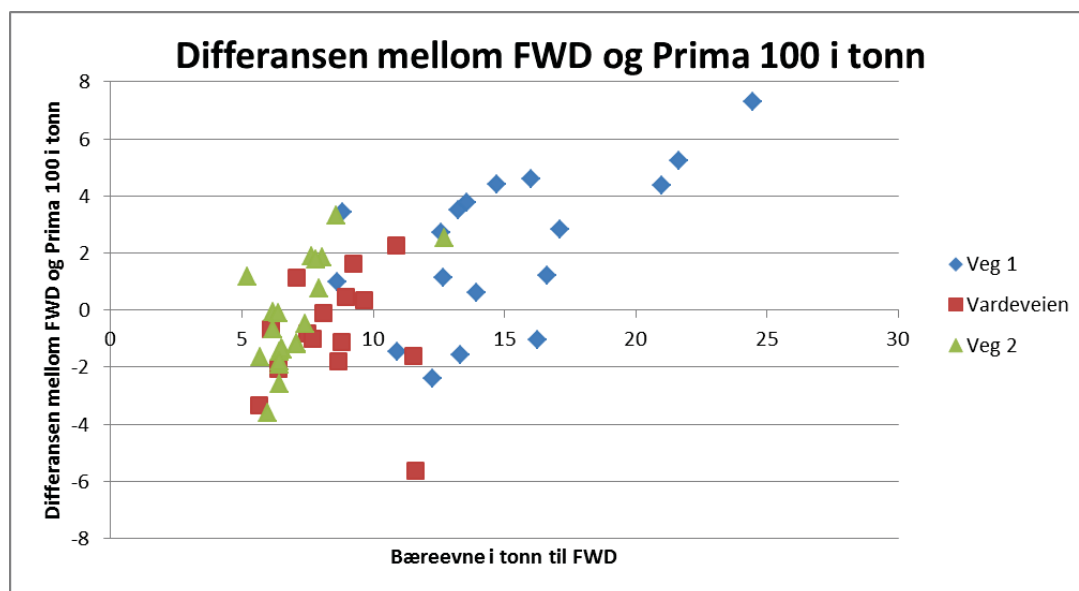
Figur 19. Sammenhengen mellom konvensjonell falloddsmåler (FWD) og Prima 100 ved beregnet elastisitetsmodul (MPa).

I Figur 19 ser man sammenhengen mellom FWD og Prima 100 ved beregnet elastisitetsmodul i MPa. Regresjonsmodellen viser at $FWD = 1,1172 \cdot (Prima\ 100)$ med en R^2 på 0,66. Vi kan se at sammenhengen blir svakere når elastisitetsmodulen øker. Standardavviket til differansen mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 er 59 MPa for elastisitetsmodulen.



Figur 20. Differansen mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 i forhold til beregnet bæreevne for konvensjonell falloddsmåler i prosent.

I Figur 20 ser man differansen til beregnet bæreevne i tonn mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 i forhold til bæreevnen i tonn målt med konvensjonell falloddsmåler. Denne figuren viser at fra bæreevne mellom 5 til 10 tonn, underestimerer Prima 100 fra 40 % til overestimering på 60 %. Når bæreevnen øker fra 10 tonn til 25 tonn går Prima 100 mer og mer over til å underestimere opp til 30 % for lavt.



Figur 21. Differansen mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 i tonn.

I Figur 21 ser man differansen mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 for beregnet bæreevne i tonn. Differansen varierer fra – 6 tonn til + 6 tonn, mens hovedtyngden er fra -2 tonn til +4 tonn.

3.2.2 Påvirkningen i vegoverbygningen

Tabell 2. Korrelasjonskoeffisienten til Prima 100 og D0, SCI20, SCI30, D60-90, D90-120 og D0/(D0-D20). Det er gjort for både bæreevne i tonn og elastisitetsmodulen (E-mod) i MPa. Differansen er forskjellen i bæreevne i tonn mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100. Signifikansnivået som er benyttet er 0,05.

		Konvensjonell falloddsmåler (FWD)										
		D0	D20	D30	D60	D90	D120	D0-D20	D0-D30	D60-D90	D90-D120	D0/(D0-D20)
Prima 100	E-mod (MPa)	-0,7014	-0,6567	-0,5356	-0,3654	-0,2381	-0,3127	-0,3056	-0,424	-0,4141	-0,1342	-0,1284
	P-verdi	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0066	0,083	0,0213	0,0246	0,0014	0,0019	0,3334	0,3549
	Antall	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
	Bæreevne (tonn)	-0,704	-0,669	-0,5432	-0,3862	-0,269	-0,3474	-0,2968	-0,4218	-0,4215	-0,1571	-0,1459
	P-verdi	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0039	0,0492	0,0101	0,0293	0,0015	0,0015	0,2565	0,2925
	Antall	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54

I Tabell 2 ser man korrelasjonskoeffisienten mellom Prima 100 og forskjellig nedbøyningsparametere. For elastisitetsmodulen ser vi at den er best korrelert med D0 (-0,7014). Med D20 har den korrelasjonskoeffisient på -0,6567, D30 på -0,5356, D60 på -

0,3654 og D120 på -0,3127. Korrelasjonen for D0-D20 er på -0,3056 og D0-D30 er på -0,4240. Ved beregning av svakheter lengre ned i vegoverbygningen er korrelasjonskoeffisienten på -0,4141 for D60-D90.

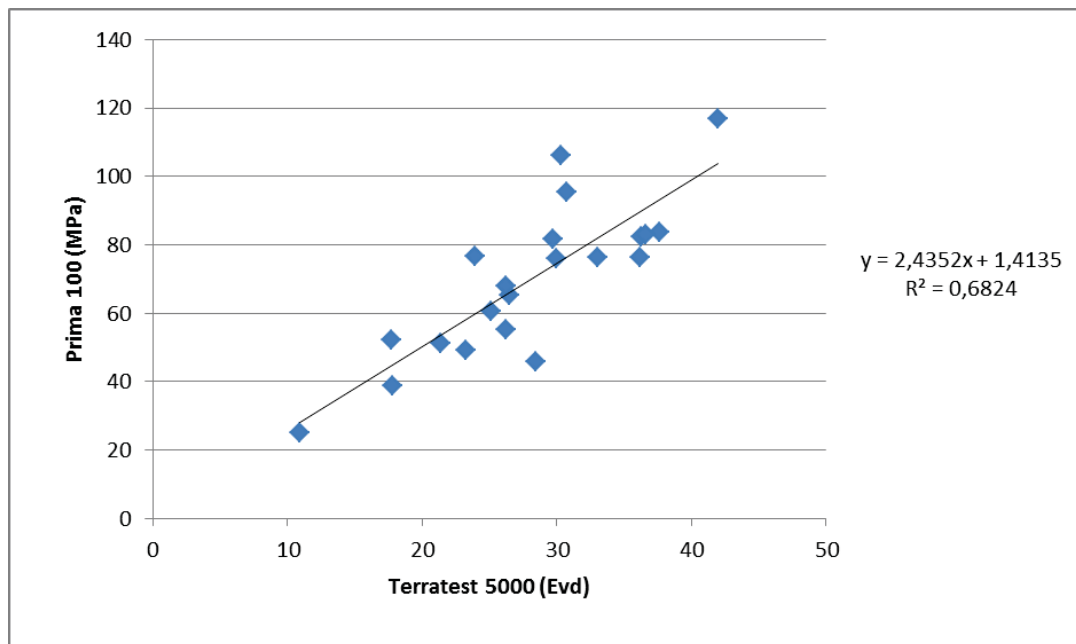
For beregnet bæreevne i tonn kan man se at den har best korrelasjonskoeffisient med D0 på -0,704, deretter følger D20 på -0,669, D30 på -0,5432, D60 på -0,3862, D90 på -0,269 og D120 på -0,3474. D0-D20 har en korrelasjonskoeffisient på -0,2968, D0-D30 er på -0,4218 og for beregning lengre ned i vegoverbygningen har D60-D90 en korrelasjonskoeffisient på -0,4215.

3.2.3 Sammenhengen mellom Terratest 5000, Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler

Tabell 3. Korrelasjonskoeffisienten mellom Prima 100, Terratest 5000 og FWD.

		Terratest	FWD	Prima 100
Prima 100	E-mod (Mpa)	0,8261		
	P-verdi	<0,0001		
	Antall	21		
Terratest	Evd (Mpa)		-0,1659	
	P-verdi		0,9449	
	Antall		21	
FWD	E-mod (Mpa)			-0,0132
	P-verdi			0,9548
	Antall			21

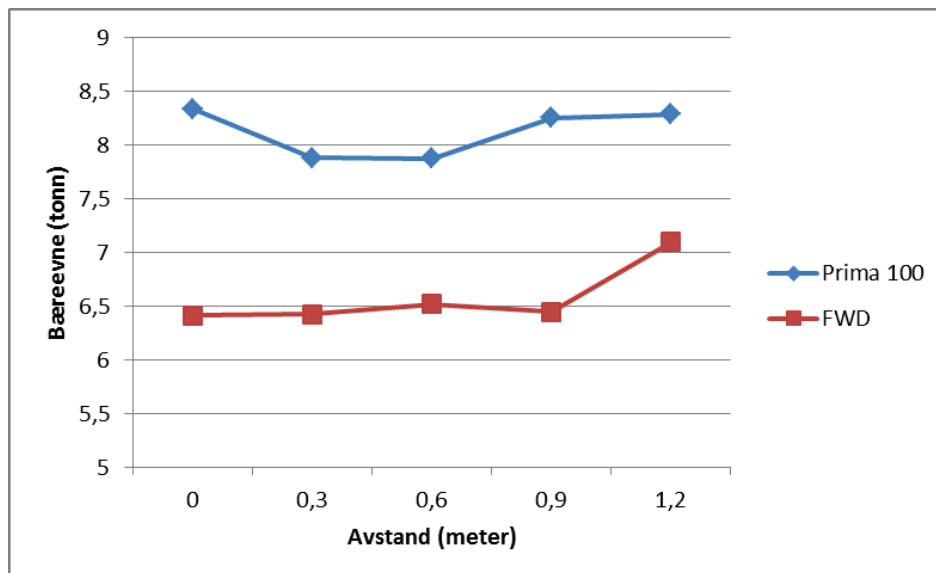
I fra Tabell 3 kan vi se at Prima 100 og Terratest 5000 har en korrelasjonskoeffisient på 0,8261. Sammenhengen mellom Terratest og FWD har en korrelasjonskoeffisient på -0,1659 som ikke er signifikant. For Prima 100 og FWD er korrelasjonskoeffisienten på -0,0132 som ikke er signifikant.



Figur 22. Sammenhengen mellom Terratest 5000 og Prima 100. Terratest 5000 måler Evd i MPa og Prima 100 måler Elastisitetsmodulen i MPa.

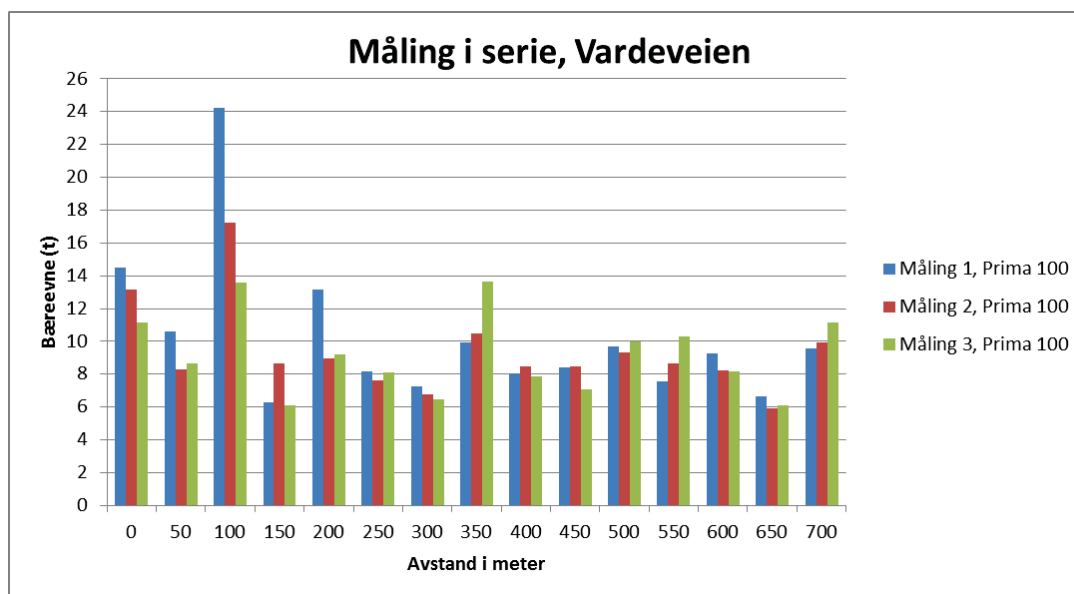
I Figur 22 ser man sammenhengen mellom Terratest 5000 og Prima 100, estimert lineær regresjonslinje er $\text{Prima100} = 2,4352 \cdot (\text{Terratest 5000}) + 1,4135$ med en R^2 på 0,68.

3.3 Kontrollmålinger



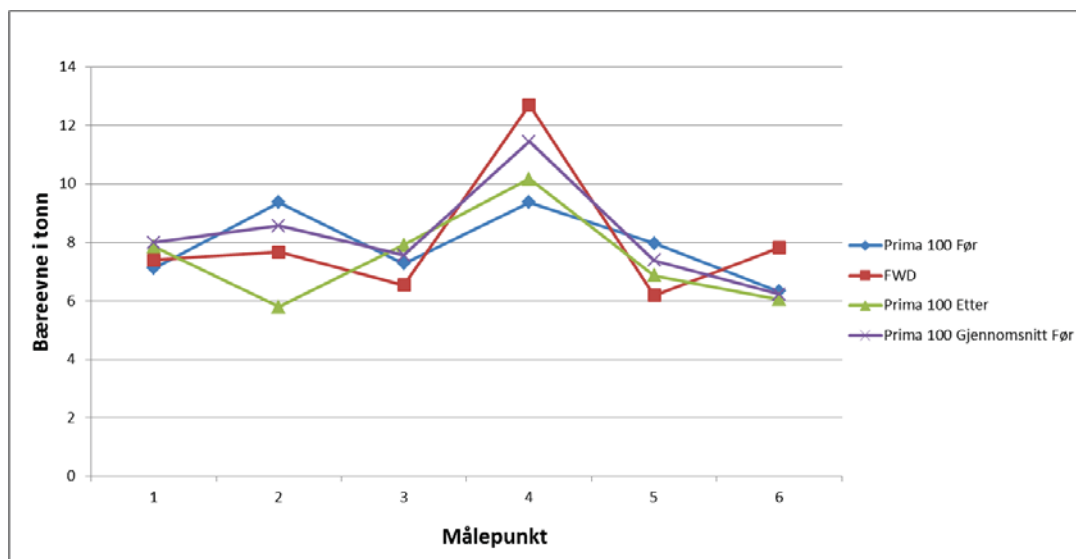
Figur 23. Resultatene av den målte bæreevnen i tonn for 5 målinger etter hverandre med avstand 30 cm mellom hver måling, for konvensjonell falloddmåler (FWD) og Prima 100.

I Figur 23 ser vi resultatene av fem målinger gjort etter hverandre. FWD sine 4 første målinger er på 6,5 tonn før den femte målingen er på 7,1 tonn. Prima 100 sin første er på 8,3 tonn for deretter å ha to målinger på 7,8 tonn og to målinger igjen rundt 8,2 tonn. Prima 100 viser å måle i gjennomsnitt 1,5 tonn for mye i bæreevne. FWD har et standardavvik på 0,3 tonn på fem målinger, mens Prima 100 har et standardavvik på 0,2 tonn. Standardavviket til differansen mellom FWD og Prima 100 er 0,3 tonn.



Figur 24. Bæreevnen i tonn for hvert målepunkt med 3 målinger etter hverandre med en avstand på 30cm. Måling 1 er -30 cm, måling 2 er 0 cm og måling 3 er +30 cm. Alle målinger er utført med Prima 100.

I Figur 24 ser man 3 målinger gjort hver 50. meter på vegen, der avstanden mellom hver måling var 30 cm. Man kan se at det er variasjon mellom målingene. For målinger gjort med 30 cm avstand er den gjennomsnittlige absolutte differansen på 1,4 tonn og et standardavvik på 2,0 tonn for 30 observasjoner. For målinger gjort med 60 cm avstand er den gjennomsnittlige absolutte differansen på 2,2 tonn og et standardavvik på 3,3 tonn for 15 observasjoner.



Figur 25. Bæreevnen i tonn til 6 målepunkter målt med Prima 100 før og etter konvensjonell falloddsmåler (FWD). «Prima 100 Før» er målingene med Prima 100 gjort i samme punkt som FWD før måling med FWD. «Prima 100 Etter» er målinger gjort med Prima 100 i samme punkt som FWD etter måling med FWD. «Prima 100 gjennomsnitt Før» er gjennomsnittet av 3 målinger for hvert punkt gjort med 30 cm mellom hver måling før konvensjonell falloddsmåler.

I Figur 25 ser man resultatene av målingene med Prima 100 gjort før og etter konvensjonell falloddsmåler. Forskjellen mellom målingene gjort før og etter med Prima 100 hadde en absolutt gjennomsnittlig differanse på 1,2 tonn og et standardavvik på 1,7 tonn. Forskjellen på FWD og «Prima 100 før» hadde en absolutt gjennomsnittlig differanse på 1,6 tonn og et standardavvik på 2,0 tonn. Forskjellen på FWD og «Prima 100 etter» hadde en absolutt gjennomsnittlig differanse på 1,4 tonn og et standardavvik på 1,6 tonn. Den absolutte gjennomsnittlige differansen mellom FWD og «Prima 100 gjennomsnitt før» er på 1,1 tonn med et standardavvik på 1,2 tonn.

3.4 Kostnader

Ved bruk av konvensjonell falloddsmåler er kostnaden 3000-4000 kr pr. km ved måling av 40 punkter pr. km. I tillegg kommer reisen til og fra Trondheim ved bruk av Rambøll sin konvensjonelle falloddsmåler.

Tabell 4. Kostnader ved bruk av konvensjonell falloddsmåler (FWD) og Prima 100 for Vardeveien.

	FWD	Prima 100
Lengde (Km)	0,7	0,7
Kr/km	1750	
Tidsforbruk (T)		2,25
Leie Kr/time		200
Lønn Kr/time		500
Kostnad (kr)	1225	1375

Ved bruk av Prima 100 ble det brukt 1 time og 15 minutter ved måling av Vardeveien. I tillegg kommer det ca. 1 time i bearbeiding av dataene. Kostnadene ved å bruke konvensjonell falloddsmåler til å måle Vardeveien er 1 225 kr + reise og overnatting. For bruk av Prima 100 kom Vardeveien på 1 375 kr, når det beregnes 500 kr pr. time i lønn og en leiekostnad på 1000 kr per døgn.

4 Diskusjon

4.1 Bæreevnen til vegene

Skogsbilvegene som ble målt var generelt svake. Veg 1 var vegen med den høyeste bæreevnen på 9 tonn ved bruk av konvensjonell falloddsmåler. På grunn av tap av data er det ikke brukt alle målepunktene for hele vegen, kun der det er data fra Prima 100. Prima 100 viste en god sammenheng med klassifiseringen av bæreevne til vegen. Den viste 8 tonn som altså er ett tonn mindre enn det man fikk med den konvensjonelle falloddsmåleren. Grunnen til at Prima 100 viser for lite kan være fordi den ikke er så god når det blir høye bæreevнемålinger. Med et standardavvik på 2,7 tonn viser det store forskjeller mellom dem.

For Vardeveien var bæreevne kun på 5,5 tonn ved bruk av konvensjonell falloddsmåler. Denne vegen lå mye under marine grense og det var forventet en lav bæreevne. Her viste Prima 100 en bæreevne på 6,5 tonn. På denne vegen ble det målt få punkter. Det gjør at når man bruker kumulativ relativ frekvens, vil den laveste målingen bli klassifiseringen til vegen. I dette tilfellet er det 15 målepunkter som gjør at det punktet med lavest bæreevne har veldig stor innvirkning på bæreevnen. Det punktet med lavest bæreevne kan være en feilmåling og dermed gjøre at veien blir klassifisert til en lavere bæreevne enn det den burde ha vært. På Vardeveien ble det i tillegg målt tre målinger i serie med Prima 100. Den gjennomsnittlige bæreevnen til disse målingene har et standardavvik på 2,4 tonn, mens måling gjort i samme punkt som konvensjonell falloddsmåler har standardavvik på 2,0 tonn. Selv om gjennomsnittet av de målingene gjort i serie følger godt målingen gjort i samme målepunkt, viser det at det er variasjon mellom punkt en til tre.

Veg 2 ble klassifisert til 5 tonn med konvensjonell falloddsmåler og til 4 tonn ved bruk av Prima 100. Dette er også en veg som ligger under marine grense og derfor inneholder den en del leire som har gjort at det blir lav bæreevne. Man kan se ut i fra Formel 1 at vegen har svakheten sin i bærelaget eller dekket. Dette kan være på grunn av leire i øverste laget. Differansen mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100 har standardavvik på 2,1 tonn og den absolutte gjennomsnittlige differansen er på 1,6 tonn.

Ved beregning av en vegstrekning sin styrke ved bruk av Statens vegvesenets metode med 90% av vegen skal være bedre enn det den klassifiseres til (Aurstad et al. 2011). Kan man se at for vegene som er målt med håndholdt falloddsmåler havner rundt 1 tonn over og 1 tonn under den konvensjonelle falloddsmåleren. Det er for disse vegene få målepunkter, noe som

gjør at vegen sin bæreevne blir den laveste målte bæreevnen. Det vil ved korte veger være lurt å legge inn kortere avstand mellom målepunktene for å kunne få flere målepunkter. Dette er fordi det vil bli en bedre klassifisering av vegens bæreevne, ett målepunkt vil ikke telle så mye. I dette studiet ble det brukt 50 meter avstand mellom målepunktene. Dette vil kanskje være for lang avstand ved måling av skogsbilveg. Her vil det være interessant med kontinuerlig måling av vegen ved bruk av vegvals for å kunne kartlegge styrken langs med hele vegen (Rahman et al. 2007). Da vil man kunne fange opp variasjonene langs med skogsbilvegen bedre enn det man gjør med punktvis måling med fallodds måler.

Standardavviket til differansen mellom konvensjonell fallodds måler og Prima 100 er 2,5 tonn for alle observasjonene. Dette gjør at man innenfor 2,5 tonn kan være rimelig sikker på å ha funnet samme bæreevnen som den konvensjonelle fallodds måleren.

4.2 Sammenhengen mellom FWD og Prima 100

Ved beregning av elastisitetsmodul er korrelasjonskoeffisienten på 0,81 mellom Prima 100 og konvensjonell fallodds måler. Kaakkurivaara et al. (2015) fant en korrelasjonskoeffisient mellom 0,44 og 0,91 for Loadman der den laveste korrelasjonskoeffisienten ble målt på mineraljord og den høyeste på myr. Steinert et al. (2005) fant ut at korrelasjonskoeffisienten mellom konvensjonell fallodds måler og håndholdt fallodds måler var i mellom 0,5 og 0,86. Whaley (1994) fant en korrelasjonskoeffisient på 0,78. Fleming et al. (2000) fant en korrelasjonskoeffisient på 0,97 ved sammenligning av Prima 100 og konvensjonell fallodds måler. Dette viser at det er variasjon i hvor god sammenhengen er mellom fallodds målerne. Noe av variasjonen kan komme av hvor det har blitt målt. Er vegoverbygningen bygget opp av homogene masser kan det virke til at sammenhengen er sterkere. En korrelasjonskoeffisient på 0,81 som er gjort i dette studiet er helt innenfor det som er funnet i tidligere studier. Målingene i dette studiet er gjort på veger som er bygget opp av stedegne masser. Det vil derfor være naturlig med variasjoner innenfor målingene.

I dette studiet ble det funnet en regresjonsmodell for elastisitetsmodulen der $FWD = 1,1172 * (Prima\ 100)$ med R^2 på 0,66. Nazzal et al. (2007) fant en regresjonsmodell der $FWD = 0,964 * (Prima\ 100)$ med en R^2 på 0,94 i sin studie utført på høytrafikkerte veger og med homogen oppbygging av vegoverbygningen med klar laginndeling. I dette studiet er vegene bygget opp av stedegne masser som kan påvirke resultatene. Sammenhengen for bæreevne i tonn har en R^2 på 0,68, det vil si at Prima 100 forklarer 68 % av variasjonen til den konvensjonelle fallodds måleren. I Figur 19 ser man at sammenhengen mellom Prima 100 og

konvensjonell falloddsmåler for elastisitetsmodulen blir svakere når den øker. Dette kan være på grunn av at kontaktrykket til Prima 100 blir for lite når det skal beregnes elastisitetsmodul på over 100 MPa. Det samme ser man når man beregner bæreevnen i tonn. Her blir også sammenhengen svakere når bæreevnen øker over 10 tonn. Dette er fordi ved bruk av elastisitetsmodul og bæreevneformel er det de samme inngangsvariablene kontaktrykk og nedbøyningen i senter av kontaktplaten. Grunnen til at modellen blir svakere ved høyere bæreevne kan ha sammenheng med at ved bruk av Prima 100 i dette studiet ble kontaktplaten belastet med 8-9 kN, mens ved bruk av konvensjonell falloddsmåler blir platen belastet med ca. 30-50 kN avhengig av materialet i vegoverbygningen. For å få et høyere kontaktrykk kan man gå ned på størrelsen til kontaktplaten eller øke loddet til 15 eller 20 kg. Dette vil da kanskje føre til mer nøyaktige resultater for veger der bæreevnen er over 10 tonn. Videre studier er nødvendig. I denne oppgaven er den konvensjonelle falloddsmåleren brukt som fasit på vegens bæreevne. Dette studiet er ikke laboratoriestudie og derfor kan man ikke med sikkerhet si at den konvensjonelle falloddsmålerens målte bæreevne er den virkelige bæreevnen til vegen. Dette er kun en metode til å kunne estimere bæreevnen til vegen.

4.3 Påvirkningen i vegoverbygningen

For å kunne si noe om hvor langt ned i vegoverbygningen Prima 100 påvirket ble det i denne studien sett på korrelasjonskoeffisienten mellom elastisitetsmodulen til Prima 100 og forskjellige nedbøyningsparametere. Siden lengden fra platesentrum og ut til geofonen blir brukt som en tommelfingerregel om hvor langt ned man er i vegoverbygningen (Kaakkurivaara et al. 2015). I denne studien kan man se at korrelasjonskoeffisienten er høyest med D0 for deretter bli svakere og svakere for geofonene lengre i fra kontaktplatens sentrum. Korrelasjonskoeffisienten er på 0,5 for D30, som kan være et akseptabelt nivå. Tidligere studier viser også at Prima 100 har en påvirkning ned til ca 30 cm fra vegoverflaten. Nazzal et al. (2007) viser til en påvirkningsdybde på 27 til 28 cm for sine laboratorieforsøk. Dette ser man i dette studiet også, Prima 100 har best korrelasjonskoeffisient med de geofonene som er fra D0 til D30. Kaakkurivaara et al. (2015) fant en god korrelasjon mellom Loadman og nedbøyningene til D30. I det studiet hadde den håndholdte falloddsmåleren en platediameter på 13,2 cm og vil dermed ikke være helt sammenlignbar med dette studiet. Vi kan allikevel se tendenser til at lette falloddsålere ikke påvirker vegoverbygningen lengre ned enn 30 cm. Det kan være en løsning for å komme lengre ned i vegoverbygningen med et større lodd enn 10 kg. Videre studier er nødvendig for å kunne se nærmere på loddvekt, platediameter og antall geofoner.

4.4 Sammenhengen mellom Terratest 5000, Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler

Det ble funnet en korrelasjonskoeffisient på 0,83 og R^2 på 0,68 for Prima 100 og Terratest 5000. Det viser til en god sammenheng mellom de håndholdte falloddsmålerne. For disse resultatene er det kun utført 21 målinger, som gjør det til et lite datagrunnlag. For samme målinger ble det ikke funnet noen sammenheng mellom Terratest og den konvensjonelle falloddsmåleren. Det er ikke funnet sammenheng mellom Prima 100 og den konvensjonelle falloddsmåleren. Dette kan være på grunn av metoden som ble utført ved denne vegen. Vegen var veldig svak og det ble først målt med konvensjonell falloddsmåler for deretter å måle annenhver gang med Prima 100 og Terratest 5000. Dette kan da skape forstyrrelser i vegen når målingene med de håndholdte falloddsmålerne utføres så raskt etter hverandre. Vegen blir utsatt for høye belastninger og rekker dermed ikke å returnere til sin opprinnelige styrke.

4.5 Kontrollmålinger

Målingene som er gjort i serie med fem målinger etter hverandre, viser at Prima 100 i gjennomsnitt måler 1,5 tonn for mye. Dette kan være litt tilfeldig siden det kun er tatt 5 målinger etter hverandre. Vi ser også av Figur 23 at måling nummer fem til den konvensjonelle falloddsmåleren er 0,6 tonn høyere enn de fire første målingene. Dette gjør da at den konvensjonelle falloddsmåleren får høyere standardavvik enn det Prima 100 fikk. Prima 100 fulgte ikke den konvensjonelle falloddsmåleren sin bæreevne. Målingene ble gjort på en grusveg bygd opp av stedege masser som gjør at det vil være en naturlig variasjon mellom målingene, selv om det ble prøvd å tatt ut et mest mulig homogent sted. Vi ser ikke hva som er under overflaten av vegen, dermed kan det gjemme seg steiner eller andre lignende ting som kan påvirke måleresultatene.

For å kunne si noe mer om variasjonen man har langs med en veg ble det utført målinger i serie med Prima 100 på Vardeveien. Der ble det funnet en absolutt gjennomsnittlig differanse på 1,4 tonn med standardavvik på 2,0 tonn for målinger utført 30 cm fra hverandre. Det ble også sett på målinger utført 60 cm fra hverandre. Der ble det funnet en absolutt gjennomsnittlig differanse på 2,2 tonn og standardavvik på 3,3 tonn. Dette viser at variasjonen blir større når avstanden mellom målepunktene øker, som er helt naturlig siden vegen er bygd opp av stedege masser og man kan dermed ikke si hva som befinner seg under vegoverflaten. I målepunkt nummer tre var det en stikkrenne under vegen. Dette kan ha ført til den høye variasjonen mellom målingene for dette punktet. Siden variasjonen er så stor på kort

avstand, vil det være interessant å se videre på kontinuerlig måling. Den vil da fange opp variasjoner langs med vegen (Rahman et al. 2007).

Alle målingene ble utført etter at den konvensjonelle falloddsmåleren hadde vært der og målt som kan ha påvirket resultatene til Prima 100. Det ble derfor anlagt seks målepunkter langs Veg 2 der det ble målt før og etter med Prima 100. Målingene gjort med Prima 100 før det ble målt med konvensjonell falloddsmåler, har en større absolutt differanse på 1,6 tonn og standardavvik på 2 tonn. Mens målingene foretatt med Prima 100 etter den konvensjonelle falloddsmåleren har en absolutt gjennomsnittlig differanse på 1,4 tonn og et standardavvik på 1,6 tonn. Ut i fra disse resultatene ser man at det har vært en betydning av at konvensjonelle falloddsmåleren har vært på stedet føre. Når man måler med Prima 100 før man måler med den konvensjonelle falloddsmåleren, er den absolutte gjennomsnittlige differansen 0,2 tonn høyere enn målinger utført etter. Standardavviket er 0,4 tonn høyere for målinger utført før den konvensjonelle falloddsmåleren har vært der. Dette kan komme av at målingene ble foretatt under den marine grense og vegoverbygningen inneholdt en del leire. Som kan gjøre at når man banker på leiren kommer opp litt vann og vil med det bli svakere. En annen grunn kan være at når man bruker den konvensjonelle falloddsmåleren først får man kompaktert vegoverbygningen før man måler med den håndholdte falloddsmåleren. Disse resultatene er kun fra 6 målinger og dermed kan man ikke med sikkerhet si at den konvensjonelle falloddsmåleren ikke har hatt noen påvirkning på resultatene. Man kan også se ut i fra Figur 25 at det ikke er noen trend til at den håndholdte falloddsmåleren måler for høyt eller for lavt når det ble målt før og etter den konvensjonelle falloddsmåleren. Resultatene viser at det er tilfeldig om den måler for høyt eller for lavt. Ut i fra dette studiet kan man ikke si noe om hvordan resultatene har blitt påvirket av at en konvensjonell falloddsmåler har målt før den håndholdte falloddsmåleren, men man ser en antydning til at spredningen og differansen mellom dem blir mindre når man måler først med den konvensjonelle falloddsmåleren.

4.6 Kostnader

Når man ser på kostnadene ved bruk av håndholdt falloddsmåler kontra konvensjonell falloddsmåler, ser man at kostnadene for måling av Vardeveien er ca. 1 225 kr + reise og overnatting fra Trondheim ved bruk av Rambøll. Ved bruk av Prima 100 kom kostnaden til Vardeveien på 1 375 kr. Her er det da lagt til en ekstra time til bearbeiding av data. Det kan være litt for mye, for det er muligheter for å lage standardisert Excel ark som dataene føres rett inn i. Når Vardeveien ble målt med Prima 100 var vi to stykker som målte. Det gjorde at det gikk litt raskere, men det ble også målt flere punkter enn det ble med den konvensjonelle

falloddsmåleren. I disse beregningene er det ikke lagt inn noen reisekostnader. I Norge finnes det kun fire konvensjonelle falloddsmålere, derav tre stykker hos statens vegvesen og en hos Rambøll. I tillegg har SWECO tilgang på konvensjonell falloddsmåler, men den er ikke stasjonert hovedsakelig i Norge. Dette gjør at reisekostnadene vil utgjøre en stor del av totalkostnaden ved få kilometers måling. Man kan også risikere og måtte vente lenge før man får målt. Det er derfor en fordel med en håndholdt falloddsmåler som er mer fleksibel enn den konvensjonelle falloddsmåleren. Den håndholdte falloddsmåleren er rask å sette seg inn i og man kan lese av resultatene på en PDA der og da. Dette gjør den til en fleksibel måleenhet for bruk på skogsbilveger i Norge. Man kan også ved å bruke den håndholdte falloddsmåleren måle så mange punkter man ønsker. I tillegg kan man for eksempel måle under anleggsfasen. Der kan den brukes til kontrollering etter at det er grøftet eller forsterket for å se om oppnådd styrke er nådd.

Kostnadene ved bruk av håndholdt falloddsmåler er antagelig billigere enn ved bruk av konvensjonell falloddsmåler. Bruken av falloddsmåler trenger videre studier for å kunne bestemme hvor lang avstand det skal være mellom målingene. Dette studiet viser til stor variasjon på kort avstand. Videre studier med kontinuerlig måling langs skogsbilvegen ved bruk av vegvals vil være interessant å se på. Vegens styrke er også veldig avhengig av hvor stort vanninnhold det er i vegen (Salour & Erlingsson 2013). Da vi vet at vanninnholdet kan påvirke styrken til veg med ca. 50%, er det viktig å måle bæreevnen til skogsbilvegen på riktig tid og med riktig utstyr. Oppfølgingsmålinger over flere år i Åmot kommune viser også til variasjoner fra år til år. Høstregnet i 2014 viste til en stor reduksjon i bæreevnen til vegen med ca. 25% i forhold til målingene utført sommeren 2014 (Bjerketvedt 2016). Derfor må man se videre på om dette er riktig metode for å måle bæreevnen på skogsbilveg og eventuelt når det skal gjøres.

5 Konklusjon

Regresjonslinjen til Prima 100 og konvensjonell falloddsmåler viser en regresjonsmodell på $y = 1,0482 * (\text{Prima 100})$ med en R^2 på 0,68 for bæreevne i tonn. Det viser til at Prima 100 forklarer 68% av den konvensjonelle falloddsmåleren. Variasjonene mellom målepunkter på 30 cm og 60 cm viser et standardavvik på henholdsvis 2,0 tonn og 3,3 tonn. Det er store variasjoner i bæreevnen til vegene som er bygd opp av stedegne masser. Ved beregning av en hel vegstrekning under ett viser Prima 100 til å klassifisere vegen innenfor +/- 1 tonn. Det er antagelig mulig å bruke Prima 100 til å klassifisere veger når man bruker flere målinger, men når man bruker kun en måling blir avvikene for store mellom konvensjonell falloddsmåler og Prima 100. Det er også stor variasjon fra målepunkt til målepunkt som vil gjøre at flere målinger med tettere avstand enn 25 meter vil kunne gi et bedre bilde av vegen. Hvor tett målepunktene skal være er det nødvendig med videre studier.

Terratest 5000 viste sammenheng med Prima 100, men ikke med konvensjonell falloddsmåler. For samme målinger viste Prima 100 ikke en signifikant sammenheng med konvensjonell falloddsmåler.

Prima 100 viser svakere sammenheng med geofonene til den konvensjonelle falloddsmåleren jo lengre fra kontaktplaten de kommer. Korrelasjonskoeffisienten er 0,70 for D0 og 0,53 for D30. Det viser til god sammenheng ned til 30 cm i vegoverbygningen.

Kostnadene for bruk av Prima 100 kom på 1 375 kr for Vardeveien, mens for konvensjonell falloddsmåler kom det på 1 225 kr. Her tilkommer det reisekostnader og siden det er få konvensjonelle falloddsmålere i landet vil reisekostnadene variere mye. Prima 100 er et godt alternativ til konvensjonell falloddsmåler for å finne svake punkter i vegen, men kartlegging av vegens nøyaktige styrke er det nødvendig med videre studier.

6 Referanser

- Andreassen, L. M., Beldring, S., Bjune, A., Breili, K., Dahl, C. A., Dyrrdal, A. V., Isaksen, K., Haakenstad, H., Haugen, J. E., Hygen, H. O., et al. (2015). Klima i Norge 2100, 2015:2. 204 s.
- Aurstad, J., Larsen, Ø., Refsdal, G., Berntsen, G., Hoff, I. & Lerfald, B. O. (2011). *Lærebok Drift og vedlikehold av veger*: Statens vegvesen Vegdirektoratet. 314 s.
- Bergum, J., Lyshaug, S., Nordli, H. A. & Sanness, B. (2014). *Registrering av skogsbilveier i Oppland*. Tilgjengelig fra:
<https://www.fylkesmannen.no/PageFiles/78514/Vegrapport%202012%20Endelig.pdf> (lest 11.04.2016).
- Bjerketvedt, J. & Gjerdtnet, A. M. F. (2003). *Driftsteknikk*. Oslo: Gan Forlag AS. 328 s.
- Bjerketvedt, J. (2016). Enkel forsterkning av skogsbilveg? *Norsk skogbruk*, 61 (4): 39-39.
- Bohn, A. O. *The history of the falling weight deflectometer (FWD)*. Tilgjengelig fra:
http://www.pavement-consultants.com/media/6042/HistoryOfFWD_AxelOBohn.pdf (lest 22.02.2016).
- Christoffersson, P. & Johansson, S. (2012). Rehabilitation of the Timmerleden Forest Road-Condition Survey, Design Proposals, Construction and Quality Control. *A ROADEX demonstration report, The Swedish Transport Administration, Northern Region, Sweden*.
- Fleming, P., Frost, M. & Lambert, J. (2015). Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness. *Transportation research record: journal of the Transportation Research Board*.
- Fleming, P. R., Frost, M. W. & Rogers, C. (2000). A comparison of devices for measuring stiffness in situ.
- Glommen-skog. (2012). *Skogsbilveger i de tradisjonelle skogstrøk - trenger vi et løft?*: Glommen Skog BA. Tilgjengelig fra: http://www.glommen-skog.no/wp-content/uploads/Rapport_vegprosjekt.pdf (lest 22.02.2016).
- Grontmij. (2008). *Prima 100 LWD, user manual*. Kolding: Grontmij A/S, Pavement Consultants. 64 s.
- Kaakkurivaara, T., Vuorimies, N., Kolisoja, P. & Uusitalo, J. (2015). Applicability of portable tools in assessing the bearing capacity of forest roads. *Silva Fennica*, 49 (2).
- Landbruksdirektoratet. (2016). *Skogsveier*: Landbruksdirektoratet. Tilgjengelig fra:
<https://www.slf.dep.no/no/statistikk/skogbruk/skogsveier> (lest 22.02.2016).
- LMD. (2013). *Normaler for landbruksveier med byggebeskrivelse*: Landbruks- og matdepartementet. Tilgjengelig fra:
http://www.skogkurs.no/vegnormaler/pdf/Normaler_for_landbruksveier_2013.pdf (lest 20.02.2016).

- Mohtashami, S., Bergkvist, I., Löfgren, B. & Berg, S. (2012). A GIS approach to analyzing off-road transportation: a case study in Sweden. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33 (2): 275-284.
- Nazzal, M., Abu-Farsakh, M., Alshibli, K. & Mohammad, L. (2007). Evaluating the light falling weight deflectometer device for in situ measurement of elastic modulus of pavement layers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2016): 13-22.
- Ormestad, H. (2009). *Elastisitettsmodul*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/elastisitettsmodul> (lest 25.04.2016).
- Rahman, F., Hossain, M., Hunt, M. & Romanoschi, S. (2007). *Intelligent compaction control of highway embankment soil*. 86 th Annual Meeting of the Transportation Research Board: Citeseer.
- Salour, F. & Erlingsson, S. (2013). Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Materials and Pavement Design*, 14 (1): 141-158.
- SSB. (2016). *Skogavvirkning for salg 2015, foreløpige tall*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/statistikker/skogav> (lest 10.04.2016).
- Steinert, B. C., Humphrey, D. N. & Kestler, M. A. (2005). Portable falling weight deflectometer study.
- Steinert, B. C., Humphrey, D. N. & Kestler, M. A. (2006). *Portable falling weight deflectometers for tracking seasonal stiffness variations in asphalt surfaced roads*. Transportation Research Board Meeting, National Research Council, CD-ROM, Washington DC.
- SVV. (2013). *60 tonns tømmervogntog*: Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: <http://www.vegvesen.no/hovedside/60-tonns-t%C3%B8mmervogntog> (lest 22.02.2016).
- Terratest. *Terratest 5000*: Terratest. Tilgjengelig fra: <https://www.terratest.de/leichtes-fallgewichtsgeraet-shop/>.
- Tompai, Z. (2008). Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic target values. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 52 (2): 97.
- Whaley, A. M. (1994). Non-Destructive Pavement Testing Equipment: Loadman, Falling Weight Deflectometer, Benkelman Beam, Clegg Hamer. *Christchurch, University of Canterbury, Department of Civil Engineering*, 19.



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway