



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 studiepoeng
Fakultet for realfag og teknologi

Nedbrytning av veg ved bruk av tømmervogntog med totalvekt opptil 74 tonn

Road degradation when using timber lorries with a
total weight up to 74 tonnes

Marit Helene Uppstrøm Kværnmo
Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på det femårige masterstudiet Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Masteroppgaven er skrevet våren 2021 og omfatter 30 studiepoeng.

Tema og problemstilling for oppgaven er valgt på bakgrunn av fordypning i retning vegteknologi. Målet med oppgaven har vært å undersøke konsekvenser knyttet til nedbrytning av veg ved bruk av tømmervogntog med totalvekt opptil 74 tonn.

Å skrive masteroppgave er en lang og intens prosess. Det har vært spesielt utfordrende i en tid med begrenset sosial omgang og et nedstengt samfunn. Heldigvis har gode samtaler via telefon og andre digitale plattformer vært til god hjelp. Det har vært slitsomt, utmattende og frustrerende, men mest av alt lærerikt, både faglig og personlig. Det er en helt egen opplevelse å vie seks måneder av livet til å fordype seg i ett spesifikt tema.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder ved NMBU, Tormod Aurlien, for smittende engasjement rundt valg av oppgave og oppmuntring underveis. Takk også til mine biveiledere i Statens vegvesen, Geir Berntsen og Heine A. Arntzen Toftegaard, for tett oppfølging og faglig støtte. Jeg har satt pris på muligheten til å delta i dette spennende prosjektet. Takk også til Christine Thoresen, Dag Skjølaas, Arne Larsen Island, og Rabbira Garba Saba.

Til slutt må jeg si tusen takk til familien min og vennene mine for all støtte og de mange oppløftende samtale i løpet av studietiden. Jeg klarte det!

Meråker, juni 2021

Marit Helene Uppstrøm Kværnmo

Sammendrag

De siste årene har en utvikling i bruk av tyngre kjøretøy ført til økning i vekt og lengde for vogntog og lastebiler, og det norske vegnettet åpnes stadig for tyngre og lengre transport. Tømmernæringen er en stor del av tungtransporten i Norge, og for å kunne opprettholde en konkurransedyktig og effektiv næring er det framsatt ønske om økning i totalvekt for tømmervogntog – fra 60 tonn til 74 tonn. Sverige og Finland opererer allerede med totalvekter høyere enn dagens norske lover tillater. I 2021 iverksettes en prøveordning på et utvalg norske veger i Innlandet fylke, med den hensikt å utrede det eksisterende vegnettet for eventuelle konsekvenser. Prøveordningen skal spesielt ha fokus på nedbrytning, og om økt tillatt totalvekt vil føre til økt nedbrytning.

Vegens nedbrytning avhenger av en rekke faktorer. Levetid påvirkes ikke bare av klima, oppbygning og materialer, men også kjøretøyenes konfigurasjon og utforming. Antall og type aksler, aksellast, ringtrykk og hjulkonfigurasjon virker inn på vegens skadeutvikling. En økning i totalvekt medfører økt antall aksler, og last per aksel blir lavere. I teorien gir dette en bedre lastfordeling som følge av flere aksler. En hypotese er derfor at økt totalvekt ikke vil bidra til økt nedbrytning. Studier fra Finland peker derimot på at å øke antall aksler, ikke nødvendigvis fører til bedre lastfordeling og mindre nedbrytning av vegen. Repeterende belastning som følge av flere aksler fører til økt poretrykk i vegens granulære lag, og pumpeeffekten blir framtrødende. Pumpeeffekten er effekten av vann som presses oppover i vegkonstruksjonen som følge av gjentakende belastning. Økt vanninnhold gir redusert bæreevne og raskere nedbrytning av vegen.

En del av prøveordningen er arbeidet med å vurdere om tømmervogntog med totalvekt opptil 74 tonn vil forårsake økt nedbrytning av vegnettet. For å sammenlikne nedbrytningseffekt avhengig av totalvekt er det gjennomført to praktiske belastningsforsøk på fylkesveg 2094 i Våler kommune, Innlandet. Ved å måle vegens tilstand før, under og etter belastning var det mulig å se eventuelle endringer i vegens oppførsel. Første forsøk ble gjennomført under gunstige forhold, og viste liten forskjell i nedbrytningseffekt mellom 60 tonn og 74 tonn. Andre forsøk ble gjennomført under ugunstige forhold i teleløsningsperioden. Dette forsøket viste rask skadeutvikling, spesielt i vegens allerede svake partier. Forskjellene mellom 60 tonn og 74 tonn var imidlertid små. I tillegg til belastningsforsøk er det utført teoretiske

modellberegninger for å se etter relativ forskjell i nedbrytningseffekt mellom akselgrupper. Modellberegningene ble gjennomført ved hjelp av ERAPave PP. Modellberegningene så på akselgruppens nedbrytningseffekt i form av spordannelse, relativt til hverandre.

Beregningene viste at det var stor forskjell mellom de ulike akselgruppene, hvor enkel aksel med enkelmontert hjul bidrar til størst spordannelse for både svak veg og normal/sterk veg. Trippel aksel med tvillingmonterte hjul var mest vennlig og bidro minst til spordannelse.

Noe sprikende resultater i belastningsforsøk og modellberegninger gjør det vanskelig å konkludere om det er kjøretøykonfigurasjon eller vegens oppbygning som er mest avgjørende for vegens nedbrytning. Det er imidlertid ingen tvil om at pumpeeffekten eksisterer, og bruk av tunge kjøretøy på svak veg er en større utfordring enn tilsvarende kjøretøy på sterk veg. Kjøretøyenes konfigurasjon har ulik påvirkning, avhengig av vegens klimaforhold, materialer og oppbygning.

Prøveordningen som iverksettes i 2021 vil foregå over en periode på 3-5 år. Måling og testing over en lengre tidsperiode vil kunne gi et tydeligere innblikk i hvilke konsekvenser som kan forventes dersom økt totalvekt for tømmervogntog innføres. For videre arbeid kan det i tillegg være like hensiktsmessig å kartlegge tilstand for eksisterende vegnett, som å undersøke hvilke faktorer som har størst påvirkning på nedbrytning. Utfordringen er konsekvensene knyttet til eksisterende veg, ikke framtidige veger.

NØKKEWORD:

Vegteknologi, nedbrytning, bæreevne, poretrykk, pumpeeffekt, vanninnhold, tømmervogntog, 74 tonn, 60 tonn, tunge kjøretøy, ERAPave, skadeutvikling, teleløsning, enkelmonterte hjul, tvillingmonterte hjul, enkel aksel, dobbel aksel, trippel aksel og kjøretøykonfigurasjon

Abstract

In recent years, a development in the use of heavier vehicles has led to an increase in weight and length for lorries and trucks. The Norwegian road network are constantly opening up to the use of heavier and longer transport. The timber industry is a large part of the heavy transport in Norway. In order to maintain a competitive and efficient industry, a request for an increase in total weight of timber lorries, from 60 to 74 tonnes, has been made. This has already been done in Sweden and Finland, among others. Due to this, a trial scheme will be implanted on a selection of Norwegian roads in 2021. The trial scheme has an intention of investigating the existing road network for consequences an increase may cause, focusing especially on degradation.

Road degradation depends on several factors. The lifetime of a road depends not only on the climate, road structure and materials, but also the configuration and design of the vehicles. The number and type of axles, axle load, wheel pressure and wheel configuration affect the development of damage. An increase in total weight leads to an increased number of axles, and the load per axle becomes smaller. In theory, this gives a better load distribution. One theory is therefore, that an increase in total weight will not contribute to increased degradation. Studies from Finland, however, indicate that an increase in number of axles does not necessarily lead to better load distribution and less degradation. Repetitive load due to several axels leads to an increase of pore pressure in the unbound layers, and the pumping effect becomes prominent. The pumping effect is the effect of water being forced upwards in the construction, due to repeated loading. Increased water content results in reduced load-bearing capacity and a more rapid degradation of the road.

A part of the trial scheme is the work of assessing whether timber lorries with a total weight of up to 74 tonnes will cause an increase in degradation on the road network. In order to compare the degradation depending on total weight, two load-bearing capacity tests found place on a selected stretch of road. By measuring the condition of the road before, during and after loading, it was possible to see changes in the road behavior. The first experiment was carried out under good conditions, on a strong road construction. This experiment showed little difference in degradation effect between 60 tonnes and 74 tonnes. The second experiment was carried out during the spring thaw period, on a weak construction. This

experiment showed rapid damage development, especially on the already weak parts of the road. However, the differences between 60 tonnes and 74 tonnes were minimal. In addition to these two tests, theoretical model calculations looking at the relative difference in degradation effect between axle groups, were done. The calculations were done using ERAPave PP. The focus of the model calculations was the degradation effect of axle groups in form of rutting, relative to each other. Results from the calculations showed that there was a big difference between the various axle groups; a single axle with single-mounted wheel being the biggest contributor of rutting for both weak roads and normal/strong roads. Tridem axle with double-mounted wheels contributed the least to rutting.

Somewhat divergent results in load experiments and calculations make it difficult to conclude whether it is the configuration of the vehicles, or the road construction itself being most decisive in terms of degradation. There is however no doubt about whether the pumping effect exists or not. The use of heavy vehicles on weak roads is a bigger problem than using heavy vehicles on strong roads. The configuration of the vehicles has different impacts, depending on the road's climatic conditions, materials and construction.

The trial scheme that will be implemented in 2021 will take place over a period of 3-5 years. Measurement and testing during a longer period of time will provide a clearer insight into the consequences expected if an increase in total weight is introduced. For further work, it may be just as important to map the status of existing road network, as examining which factors having the greatest impact concerning degradation. The challenge is the consequences associated with existing roads, not future roads.

KEY WORDS:

Road technology, degradation, wear, load-bearing capacity, bearing capacity, pore pressure, pore water pressure, pumping effect, water content, timber lorries, 74 tonnes, 60 tonnes, ERAPave, damage development, spring thaw, thaw-freeze periods, single-mounted wheels, double-mounted wheels, single axle, tandem axle, tridem axle and vehicle configuration

Innhold

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figuroversikt	XI
Tabelloversikt	XIII
Formeloversikt	XIII
Begreper og definisjoner	XV
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.1.1 Dagens situasjon.....	1
1.1.2 Prøveordning og belastningsforsøk	2
1.2 Problemstilling og målsetting.....	3
1.3 Omfang og begrensninger	3
2 Teori	5
2.1 Tømmervogntog	5
2.2 Vegens oppbygging.....	7
2.2.1 Vegdekke.....	8
2.2.2 Bærelag.....	8
2.2.3 Forsterkningslag	9
2.2.4 Frostsikringslag	9
2.2.5 Filterlag/fiberduk.....	9
2.2.6 Undergrunn.....	9
2.3 Bæreevne	10
2.3.1 Vanninnhold	11
2.3.2 Elastisitetsmodul	13
2.3.3 Lastfordelingsevne	14
2.4 Vegens nedbrytning.....	15

2.4.1	Trafikkbelastning	17
2.4.2	Deformasjon	20
2.4.3	Spordannelse	21
2.4.4	Sprekkdannelse.....	22
2.4.5	Klimapåkjenning	23
2.5	Pumpeeffekt	24
2.6	Beregningsmodeller	25
2.6.1	Fjerdepotensregelen	25
2.6.2	ERAPave	26
2.7	Måleutstyr.....	27
2.7.1	Falling Weight Deflectometer	27
2.7.2	Via Pavement Profil System	30
2.7.3	Ground Penetrating Radar	31
3	Metode	33
3.1	Modellberegning: ERAPave	34
3.1.1	Oppbygging – <i>Pavement structure</i>	35
3.1.2	Trafikkdata – <i>Traffic data</i>	36
3.1.3	Klimadata – <i>Climate data</i>	37
3.1.4	Sporutvikling – <i>Rutting</i>	39
3.1.5	Utmatting og piggdekkslitasje – <i>Fatigue cracking og studded tyre wear</i>	39
3.2	Belastningsforsøk	40
3.2.1	Bæreevne	45
3.2.2	Tilstandsutvikling.....	45
3.2.3	Georadar	45
3.3	Prøveordning	45
4	Resultater	49
4.1	Modellberegning: ERAPave	49
4.1.1	Overbygning 1: svak	49
4.1.2	Overbygning 2: normal/sterk	51
4.1.3	Totalt	52
4.2	Forsøk 1 – sterk veg	54
4.2.1	Bæreevne	54
4.2.2	Tilstandsutvikling.....	55

4.3	Forsøk 2 – svak veg.....	58
4.3.1	Bæreevne.....	58
4.3.2	Tilstandsutvikling.....	60
4.4	Visuell skadekartlegging.....	63
5	Diskusjon.....	67
5.1	Modellberegning.....	67
5.2	Bæreevne.....	67
5.3	Spor.....	69
5.4	Jevnhet og tverrfall.....	69
5.5	Sprekkutvikling.....	70
5.6	Pumpeeffekt.....	71
5.7	Resultater vurdert opp mot Skjølaas’ artikkel.....	72
5.8	Noen refleksjoner.....	72
5.9	Usikkerheter og feilkilder.....	74
5.10	Videre arbeid.....	78
6	Konklusjon.....	79
	Referanser.....	81
	Vedlegg 1.....	83
	Vedlegg 2.....	85

Figuroversikt

Figur 2-1: Konfigurasjon fireakslet tømmerbil. Illustrasjon: Marit Helene U. Kværnmo.....	6
Figur 2-2: Akselgrupper tømmervogntog. Illustrasjon: Marit Helene U. Kværnmo.	6
Figur 2-3: Detaljtegning tømmervogntog, totalvekt 60 tonn. Illustrasjon: Arne Larsen Island, Statens vegvesen.	6
Figur 2-4: Detaljtegning tømmervogntog, totalvekt 74 tonn. Illustrasjon: Arne Larsen Island, Statens vegvesen.	7
Figur 2-5: Vegens oppbygging (Yideti, 2018b).....	8
Figur 2-6: Vegens oppbygning og spenningsfordeling. Illustrasjon: Statens vegvesen.	10
Figur 2-7: Vegens bæreevne avhengig av årstid (Berntsen, 2018).	12
Figur 2-8: Tøyning avhengig av tid. Illustrasjon: Geir Berntsen, Statens vegvesen.....	13
Figur 2-9: Vegtilstand/skadeutvikling som funksjon av tid. Illustrasjon: Geir Berntsen, Statens vegvesen.	17
Figur 2-10: Kontaktflate ved ulike ringtrykk (Statens vegvesen, 2016, s. 63).	18
Figur 2-11: Illustrasjon av hvor i konstruksjonen belastningen merkes (Aurstad, 2018).	19
Figur 2-12: Ulike kjøretøys vegvennlighet (Statens vegvesen, 2016, s. 64).....	19
Figur 2-13: Ulike modus av spordannelse (ROADDEX Network, u.å.-b).	21
Figur 2-14: Pumpeeffekten (Berntsen, 2021).....	24
Figur 2-15: Illustrasjon av lodd og geofoner (Statens vegvesen, 2021a, s. 284).	28
Figur 2-16: Målebil fallodd. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.	30
Figur 2-17 og 2-18: Målebil ViaPPS. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.....	31
Figur 3-1 (venstre): Vegtype ved oppstart av ERAPave PP. Skjerm bilde fra ERAPave PP.	35
Figur 3-2 (høyre): Informasjon nytt prosjekt ERAPave PP. Skjerm bilde fra ERAPave PP. .	35
Figur 3-3: Data piggdekkslitasje. Skjerm bilde fra ERAPave PP.	40
Figur 3-4: Kart med forstørret utsnitt av forsøksstrekning. Skjerm bilde fra NVDB.	42
Figur 3-5 og figur 3-6: Deltakende tømmervogntog forsøk 2, totalvekt 60 tonn. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.....	44
Figur 3-7 og figur 3-8: Deltakende tømmervogntog forsøk 2, totalvekt 74 tonn. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.....	44
Figur 3-9: Oversiktsbilde deltakende kommuner prøveordning. Kilde: Statens vegvesen....	46
Figur 4-1: Spordannelse for enkel aksel med enkelmonterte hjul, overbygning 1. Skjerm bilde fra ERAPave PP.	49

Figur 4-2: Spordannelse for dobbel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 1. Skjerm bilde fra ERAPave PP.....	50
Figur 4-3: Spordannelse for trippel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 1.. Skjerm bilde fra ERAPave PP.....	50
Figur 4-4: Spordannelse for enkel aksel med enkelmonterte hjul, overbygning 2. Skjerm bilde fra ERAPave PP.	51
Figur 4-5: Spordannelse for dobbel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 2. Skjerm bilde fra ERAPave PP.....	51
Figur 4-6: Spordannelse for trippel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 2. Skjerm bilde fra ERAPave PP.....	52
Figur 4-7: Bæreevne forsøk 1 (Berntsen, 2021).....	54
Figur 4-8: Sporutvikling forsøk 1 (Berntsen, 2021).....	55
Figur 4-9: Jevnhetsutvikling forsøk 1 (Berntsen, 2021).	56
Figur 4-10: Tverrfall felt 1, forsøk 1 (Berntsen, 2021).	56
Figur 4-11: Tverrfall felt 2, forsøk 1.....	57
Figur 4-12: Sprekkeutvikling forsøk 1 (Berntsen, 2021).....	57
Figur 4-13: Kumulert bæreevne før forsøk 2.	58
Figur 4-14: Kumulert bæreevne etter forsøk 2.....	59
Figur 4-15: Bæreevne forsøk 2.	59
Figur 4-16: Sporutvikling forsøk 2.	60
Figur 4-17: Jevnhetsutvikling forsøk 2.	61
Figur 4-18: Tverrfall felt 1, forsøk 2.....	61
Figur 4-19: Tverrfall felt 2, forsøk 2.....	62
Figur 5-1: Gunstige og ugunstige forhold for pumpeeffekt (Saarenketo, 2019).....	71

Tabelloversikt

Tabell 1-1: Bruksklasser tunge kjøretøy (Statens vegvesen, 2016, s. 364).....	2
Tabell 2-1: Konfigurasjon tømmervogntog, totalvekt 60 tonn.....	5
Tabell 2-2: Konfigurasjon tømmervogntog, totalvekt 74 tonn.....	5
Tabell 2-3: Vanlige skader og skadeårsak for veger med bituminøst dekke (Statens vegvesen, 2014a, s. 15).	16
Tabell 3-1: Overbygning 1, svak veg.	36
Tabell 3-2: Overbygning 2, normal/sterk veg.	36
Tabell 3-3: Trafikkdata etter akselgruppe.	37
Tabell 3-4: Månedlig middeltemperatur ved Roverud målestasjon Innlandet, 2018. Kilde: Norsk Klimaservicesenter, met.no.	38
Tabell 3-5: Klimadata overbygning 1.	38
Tabell 3-6: Klimadata overbygning 2.	39
Tabell 3-7: Spesifikasjoner for forsøksstrekning (Berntsen, 2021).	41
Tabell 3-8: Kjøretøyegenskaper forsøk 1.....	43
Tabell 3-9: Kjøretøyegenskaper forsøk 2.....	43
Tabell 4-1: Spordannelse avhengig av akselgruppe.	53
Tabell 4-2: Spordannelse avhengig av totalvekt.	53
Tabell 4-3: Bæreevne forsøk 1 (Berntsen, 2021).	55
Tabell 4-4: Sprekkandel forsøk 2.	62
Tabell 4-5: Visuelt registrerte skader etter forsøk 2. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.	63

Formeloversikt

Formel 2-1: Lastfordelingskoeffisient (Statens vegvesen, 2014b, s. 226).....	14
Formel 2-2: Lastfordelingskoeffisient for mekanisk stabilisert materiale (Statens vegvesen, 2014b, s. 226).	14
Formel 2-3: Indeks for lastfordelingsevne (Statens vegvesen, 2018b, s. 174).	15
Formel 2-4: Fjerdepotensregelen (Statens vegvesen, 2016, s. 76).....	25
Formel 2-5: Bæreevne for veg med asfaltdekke (Statens vegvesen, 2021a, s. 285).....	29
Formel 2-6: Dimensjonerende E-modul.....	29

Begreper og definisjoner

<i>Vegkonstruksjon</i>	Summen av alle elementene i vegen; fra underbygning til rekkverk og drensssystem.
<i>Årsdøgnetrafikk, ÅDT</i>	Summen av antall kjøretøy som passerer et visst punkt på en veg i løpet av et år, delt på antall dager i året. Inkluderer kjøretøy i begge retninger.
<i>Telefarlighet, telefarlighetsklasser</i>	Materialer deles inn i fire telefarlighetsklasser etter finstoffmengde og telefarlighet (Statens vegvesen, 2016, s. 273): T1 / T2 – ikke/lite telefarlig T3 / T4 – middels/meget telefarlig
<i>Elastisitetsmodul, E-modul</i>	Forholdet mellom påført spenning /belastning og elastisk deformasjon (Statens vegvesen, 2018b, s. 514).
<i>Spenning</i>	Forholdet mellom påført last og arealet hvor lasten blir påført. Enhet N/m^2 , last pr. areal. ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa.}$)
<i>Tøyning</i>	Forlengelse/deformasjon av et materiale eller gjenstand relativt til opprinnelig form. Kan være elastisk eller plastisk. Elastisk tøyning vil gå tilbake til opprinnelig form, plastisk tøyning er permanent.
<i>Poretrykk</i>	Gasstrykk og/eller væsketrykk i porerom. Gasstrykket neglisjeres i jordmekanisk sammenheng.
<i>Permeabilitet</i>	Et mål for et materiales evne til å transportere væske eller gass. Symbol: k .
<i>Tunge kjøretøy</i>	Kjøretøy med totalvekt over 3,5 tonn.
<i>Ringtrykk</i>	Kalles også <i>dekktrykk</i> . Lufttrykket i et kjøretøys dekk/hjul.
<i>Ubundne materialer</i>	Materialer/masser som ikke er tilsatt eller stabilisert med bitumen. Kalles også <i>granulære</i> materialer. Motsatt finnes <i>bundne materialer/bituminøse lag</i> (Statens vegvesen, 2016, s. 76).
<i>Nasjonal vegdatabank, NVDB</i>	En database med informasjon om Norges vegnett. Inneholder informasjon om drenering og overvannsystem,

vegbredde, vegens tverrprofil, ujevnt telehiv og sprekker (Statens vegvesen, 2016, s. 377).

ROADEX Network

Et samarbeid mellom ulike vegorganisasjoner i Nord-Europa. Opprettet i forbindelse med prosjekter knyttet til vedlikehold og utbedring av lavtrafikkerte veger i klimautsatte områder (ROADEX Network, u.å.-c).

90/10 % - verdi

Styringsverdi. Tilsier at 90 % av verdiene er over, og 10 % er under, angitt verdi.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Dagens situasjon

I en stortingsmelding fra 2017 ble regjeringen bedt om å gjennomføre en prøveordning som omfatter kjøring med tømmervogntog med totalvekt opptil 74 tonn. Det overordnede målet med prøveordningen er å «*gi kunnskap som grunnlag for en anbefaling om hele eller deler av det offentlige vegnettet bør åpnes for 74 tonn tømmervogntog på sikt*» (Statens vegvesen, 2020a). Dette inkluderer kunnskap om trafiksikkerhet, framkommelighet, miljø og klimagassutslipp, vegslitasje og transportkostnader. Per dags dato er høyeste tillatte total for tømmervogntog i Norge 60 tonn, og maksimal vogntoglengde er 24 meter. Maks tillatt aksellast er 10 tonn for frirullende hjul, én drivaksel kan dog ha inntil 11,5 tonn (Forskrift om bruk av kjøretøy, 1990). Sverige og Finland har allerede åpnet sine vegnett for kjøring av tømmervogntog med totalvekt 74 og 76 tonn. Som en del av utviklingen mot bruk av større og tyngre kjøretøy, skal det undersøkes om også Norge kan åpne for dette.

Lover og regler knyttet til transport av tømmer og bruk av tømmervogntog i Norge er beskrevet i egne riksveglister for tømmer, og veglister for fylkes- og kommunale veier. Nærmere bestemmelser finnes i forskrift om bruk av kjøretøy. I (desember) 2020 ble det åpnet for at modulvogntog type 1 og 2 og 24-metersvogntog, som klarer et fastsatt sporingskrav, kan kjøre på deler av vegnettet som er tillatt for 24 m tømmervogntog. Modulvogntog kan ha en total lengde på opptil 25,25 m (Statens vegvesen, 2020b). Dette er et tegn på en transportnæring i utvikling. For videre effektivisering av tømmertransporten er det derfor framsatt ønske om en ytterligere økning i tillatt totalvekt for tømmervogntog. Før en eventuell økning kan vedtas, må vegnettet utredes for mulige konsekvenser. Det skal spesielt undersøkes om økning i totalvekt fra 60 til 74 tonn, vil føre til økt nedbrytning av vegen.

Tømmernæringens transport av tømmer fra hogstplass utgjør en betydelig andel av råvarekostnadene, avhengig av type tømmer (Skjølaas, 2020). En økning i totalvekt fra 60 til 74 tonn, gir mulighet til å frakte mer tømmer per tur. I teorien betyr dette færre transporter for samme mengde tømmer. Dette kan bidra til en reduksjon i kostnader for næringen. Samtidig innebærer det en endring i vegens belastning.

Alle veger som inngår i det norske vegnettet, er klassifisert etter bruksklasser. Per juni 2021 finnes det seks bruksklasser, vist i tabell 1-1. Bruksklassen angir kjøretøyenes tillatte aksellast og totalvekt. Dette bestemmes etter vegens og tilhørende bruers bæreevne.

Tabell 1-1: Bruksklasser tunge kjøretøy (Statens vegvesen, 2016, s. 364).

Bruksklasse	Tillatt aksellast (tonn)	Tillatt totalvekt (tonn)
Bk 10-50	10	50
Bk 10-42	10	42
Bk T8-50	8	50
Bk T8-40	8	40
Bk 8	8	32
Bk 6	6	28

For å hindre skade og nedbrytning av vegen kan det ved behov innføres aksellastbegrensninger. Som regel gjøres dette på grunn av dårlig bæreevne eller svake bruer.

1.1.2 Prøveordning og belastningsforsøk

En del av prøveordningen som ble vedtatt, er arbeidet med å vurdere om tømmervogntog med totalvekt opptil 74 tonn vil forårsake økt nedbrytning av vegnettet. Hensikten er å undersøke muligheten for å øke tillatt totalvekt på tømmervogntog fra 60 til 74 tonn. Prøveordningen skal utrede for eventuelle konsekvenser som følge av økning i tillatt totalvekt, og se på muligheten for å innføre en ny bruksklasse som omfatter en ny totalvekt. For å kunne sammenlikne vegens nedbrytning fra tømmervogntog med totalvekt 60- og 74 tonn, er det som en del av prøveordningen gjennomført to belastningsforsøk. Belastningsforsøkene foretok måling av vegtilstand før, under og etter belastning. Ansvaret for gjennomføring av prøveordning og tilhørende belastningsforsøk ble gitt fra samferdselsdepartementet til Statens vegvesen (SVV).

1.2 Problemstilling og målsetting

Denne masteroppgaven er utformet i forbindelse med den aktuelle prøveordningen. Hensikten med masteroppgaven er å undersøke hvilke konsekvenser en økning i tillatt totalvekt for tømmervogntog vil ha på vegnettet. Oppgaven har spesielt fokus på forskjell i nedbrytning mellom tømmervogntog med totalvekt 60 tonn, og tømmervogntog med totalvekt 74 tonn. Målet med oppgaven er å bidra til å belyse konsekvenser og faktorer avgjørende for vegens nedbrytning. Dette innebærer:

- Studie av litteratur og erfaringer fra tilsvarende undersøkelser gjennomført i andre land, deriblant Sverige og Finland.
- Modellberegning av nedbrytningseffekt for ulike akselgrupper og totalvekter i form av spordannelse.
- Vurdering og analyse av målinger/resultat fra praktiske belastningsforsøk.

Oppgaven skal i tillegg gi økt kjennskap til pumpeeffekten og beskrive denne nærmere.

På bakgrunn av ovennevnte er det formulert følgende problemstilling for denne masteroppgaven: **Har tømmervogntog med totalvekt 60 tonn og tømmervogntog med totalvekt 74 tonn, ulik nedbrytende effekt på vegen?**

1.3 Omfang og begrensninger

I denne masteroppgaven er det sett spesifikt på konsekvenser ved bruk av tømmervogntog med totalvekt 74 tonn, i forhold til tømmervogntog med totalvekt 60 tonn. Det er sett på kjøretøyenes nedbrytning av veger med fast dekke. Alle vegoverbygninger vurdert i oppgaven har asfalt som øverste lag. I modellberegningene er det hovedsakelig sett på nedbrytning i form av spordannelse. Belastningsforsøk og prøveordning ser på nedbrytning per tonn nyttelast.

Det er fokusert på nedbrytning, framfor slitasje. *Nedbrytning* er her definert som alle skader av vegen – uansett karakter, som medfører behov for vedlikehold. Alternativt: en forringelse av vegen som følge av trafikkpåkjenning. *Slitasje* er her definert som en egen type skademekanisme, og går inn under nedbrytning. Slitasje omhandler den fysiske ødeleggelsen av vegkonstruksjonen og/eller vegdekket, gjerne ved direkte kontakt mellom materialer.

Svakheter og begrensninger knyttet til bruer er ikke vurdert i denne oppgaven. Det er heller ikke fokusert på eventuelle miljø- og samfunnsøkonomiske konsekvenser som følge av økt totalvekt.

Prøveordningen og belastningsforsøkene omfatter et fåtall kjøretøy. All kjøring er basert på avtaler og dispensasjoner, og transportørene er gitt tillatelse til å kjøre med totalvekt opptil 74 tonn i perioden prøveordningen og forsøkene finner sted. Kjøretøyene som benyttes er ulike kombinasjoner av tre- og fireakslede tømmerbiler, med fire- og femakslede tilhengere.

Parallelt med første belastningsforsøk, ble det gjennomført tilsvarende forsøk på en skogsveg i nærliggende område. Her deltok kun to tømmervogntog; ett stykk sju-akslet vogntog med totalvekt 60 tonn, og ett stykk ni-akslet vogntog med totalvekt 74 tonn. Også her var hensikten å se på forskjell i nedbrytningseffekt mellom de to totalvektene, men på veg uten fast dekke. Data og resultat fra dette forsøket er ikke gitt plass i denne oppgaven, men nevnes til opplysning.

2 Teori

2.1 Tømmervogntog

Tømmernæringen benytter kjøretøy spesielt utformet til sitt formål. De fleste av dagens tømmervogntog utnytter den maksimale tillatte totalvekten på 60 tonn, og har normalt sju aksler totalt på bil og tilhenger. Dette er fordelt med tre aksler på bilen og fire aksler på hengeren. Enkelte har fire aksler på bilen, og fire eller fem aksler på hengeren.

Tømmervogntog benytter normalt veger klassifisert Bk 10-50. Det er mulig å benytte veg klassifisert lavere enn Bk 10-50, så lenge det er innenfor regelverket. Dette vil gi lavere utnyttelse på grunn av svært lav nyttelast.

Mulig akselkonfigurasjon og utforming av tømmervogntog med totalvekt 60- og 74 tonn, er presentert i tabell 2-1 og 2-2. Individuelle forskjeller mellom kjøretøyene kan forekomme, oppsettet i tabellene er kun et alternativ. Tabell 2-1 viser 60-tonns tømmervogntog med treakslet tømmerbil og fireakslet tilhenger. For tømmervogntog med totalvekt 74 tonn er det hensiktsmessig å benytte fire-akslet bil og fem-akslet tilhenger. Det er foreløpig ingen standard for 74-tonns tømmervogntog i Norge.

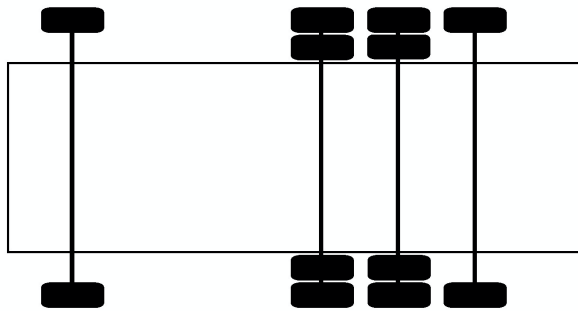
Tabell 2-1: Konfigurasjon tømmervogntog, totalvekt 60 tonn.

60 tonn	Aksel-konfigurasjon	Hjul-konfigurasjon	Vekt (kg)
Framaksel bil	Enkel	Enkel	8 000
Bakaksel bil	Dobbel	Tvilling	18 000
Framaksel henger	Dobbel	Tvilling	16 000
Bakaksel henger	Dobbel	Tvilling	18 000
Totalt antall	7	26	60 000

Tabell 2-2: Konfigurasjon tømmervogntog, totalvekt 74 tonn.

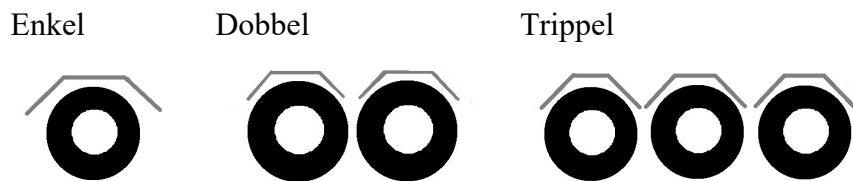
74 tonn	Aksel-konfigurasjon	Hjul-konfigurasjon	Vekt (kg)
Framaksel bil	Enkel	Enkel	8 000
Bakaksel bil	Dobbel (boggi) + enkel	Tvilling + singel	24 000
Framaksel henger	Dobbel (boggi)	Tvilling	18 000
Bakaksel henger	Trippel	Tvilling	24 000
Totalt antall	9	34	74 000

Tømmerbiler med fire aksler skal ha to styringsaksler, disse har enkelmonterte hjul. Øvrige aksler på tømmerbil har tvillingmonterte hjul.



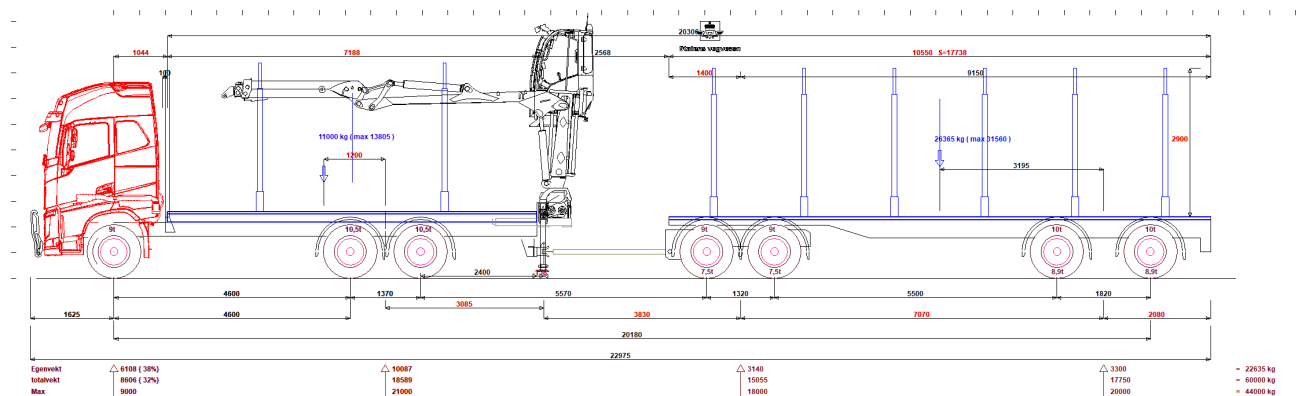
Figur 2-1: Konfigurasjon fireakslet tømmerbil. Illustrasjon: Marit Helene U. Kværnmo.

Figur 2-1 viser et eksempel på mulig aksel- og hjulkonfigurasjon for fireakslet tømmerbil.

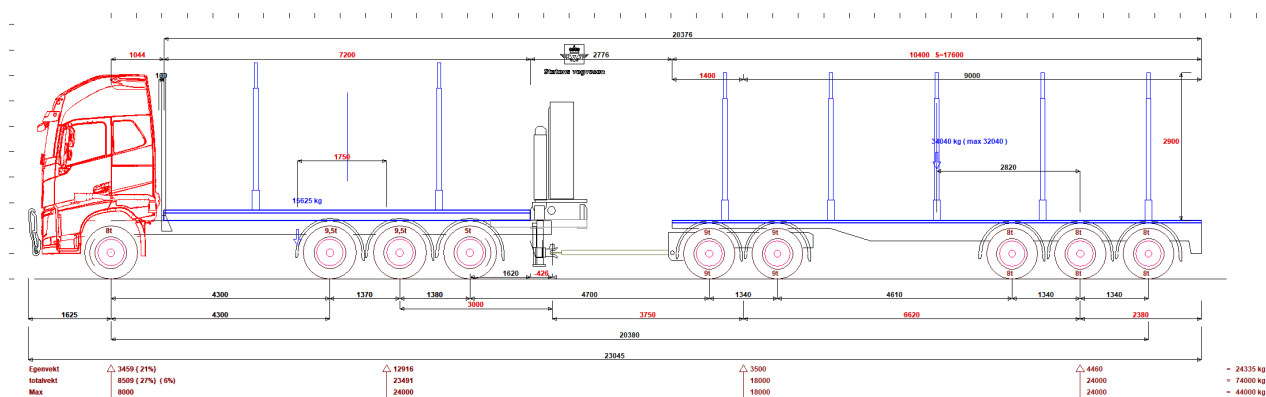


Figur 2-2: Akselgrupper tømmervogntog. Illustrasjon: Marit Helene U. Kværnmo.

Figur 2-2 viser de ulike akselgruppene som normalt benyttes på tømmervogntog. Innbyrdes avstand mellom hjul varierer i praksis.



Figur 2-3: Detaljtegning tømmervogntog, totalvekt 60 tonn. Illustrasjon: Arne Larsen Island, Statens vegvesen.

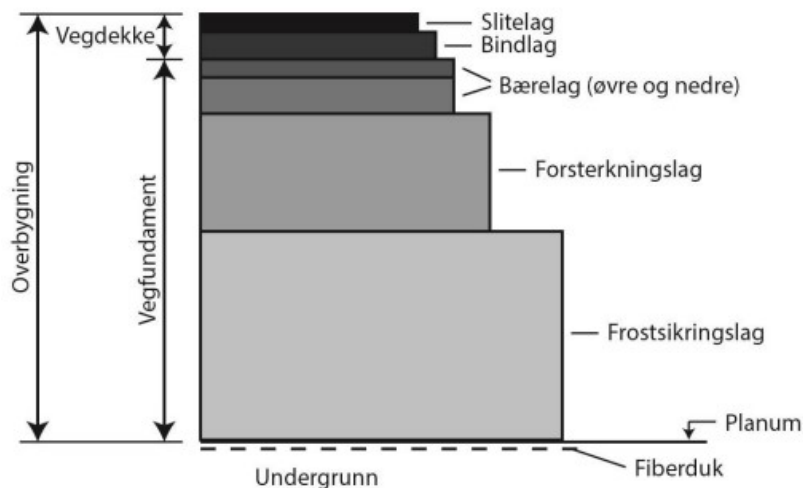


Figur 2-4: Detaljtegning tømmervogntog, totalvekt 74 tonn. Illustrasjon: Arne Larsen Island, Statens vegvesen.

Figur 2-3 og 2-4 viser detaljerte tegninger av 60 tonns- og 74 tonns tømmervogntog, med avstander og vekt. Alle mål er oppgitt i mm, vekt er oppgitt i kg og tonn. Mål og vekt vil variere i praksis. På styringsaksler benyttes enkelmonterte hjul, mens det på øvrige aksler benyttes tvillingmonterte hjul. Boggi er betegnelsen på to (eller flere) aksler som sitter sammen, med relativt kort avstand mellom hver aksel. Boggi brukes gjerne for å fordele vekt bedre, og gi smidigere bevegelse. Dersom avstanden er større enn 1,79 m innad i en akselgruppe, kalles det langboggi. I dette tilfellet betraktes akslingene som enkeltakslinger, og andre regler for maks tillatt aksellast gjelder. Dette er illustrert i figur 2-3, på vogntogets bakerste aksel. Se vedlegg 1 for større figurer.

2.2 Vegens oppbygging

Ifølge Statens vegvesens rapport 626, «Lærebok Vegteknologi», fra 2016 er vegoverbygningens hovedoppgave å bære trafikklaster og fordele belastningene. Overbygningen skal tåle de klimatiske forhold og påkjenninger den utsettes for, i tillegg til å opprettholde tilstrekkelig bæreevne gjennom hele året. Veger dimensjoneres spesielt etter tre faktorer: undergrunnsforhold, trafikbelastning og klima (Yideti, 2018b). Disse faktorene er vanskelig å kontrollere, vegoverbygningen tilpasses derfor etter forholdene. En typisk norsk vegoverbygning består av følgende lag (Statens vegvesen, 2016, s. 73-75): vegdekke, bærelag, forsterkningslag, frostsikringslag, filterlag og undergrunn.



Figur 2-5: Vegens oppbygging (Yideti, 2018b).

Figur 2-5 illustrerer vegens ulike lag og oppbygging. Tykkelse og valg av materiale varierer i praksis, lagrekkefølge er standard. Ikke alle veger har behov for frostsikringslag, og/eller to bærelag. På enkelte veger består vegdekke av kun ett lag bituminøst materiale.

2.2.1 Vegdekke

Vegdekket skal bidra til en jevn og god overflate for alle trafikanter. Dekket har som hensikt å forsegle vegen mot vann, samt gi god friksjon under alle forhold. I Norge brukes utelukkende bituminøse materialer i vegdekket. Det skilles mellom myke og stive dekketyper. Dette velges avhengig av årsgjennomsnittlig trafikklaster (ÅDT). *Myke dekker* er fleksible og sprekker ikke opp like lett ved repeterende nedbøyning. Denne typen dekker er dermed godt egnet for veger med svakt dekkfundament og frost-/ teleproblemer. *Stive dekker* gir god fordeling av trafikklaster ned på bærelaget, og skal alltid legges i to lag.

2.2.2 Bærelag

Bærelaget skal fordele trafikklaster ned til forsterkningslaget, uten at det oppstår deformasjon eller knusing av steinmaterialer. Det stilles høye krav til materialer som brukes i bærelag. Kvalitetssikring av bærelag skjer gjennom sjekk av materialer og fokus på riktig utførelse. Et svakt bærelag er både vanskelig og dyrt å få reparert. For de fleste veger deles bærelaget inn i et øvre- og et nedre bærelag.

2.2.3 Forsterkningslag

Forsterkningslaget skal sørge for lastfordeling uten overbelastning av undergrunn, i tillegg til å bidra til drenering av unødvendig vann. God drenering via forsterkningslag bidrar til lavt vanninnhold i omkringliggende lag. Forsterkningslagets tykkelse bestemmes etter grunnforhold og trafikkmengde. Knuste steinmaterialer er vanligste materiale brukt i forsterkningslag i Norge.

2.2.4 Frostsikringslag

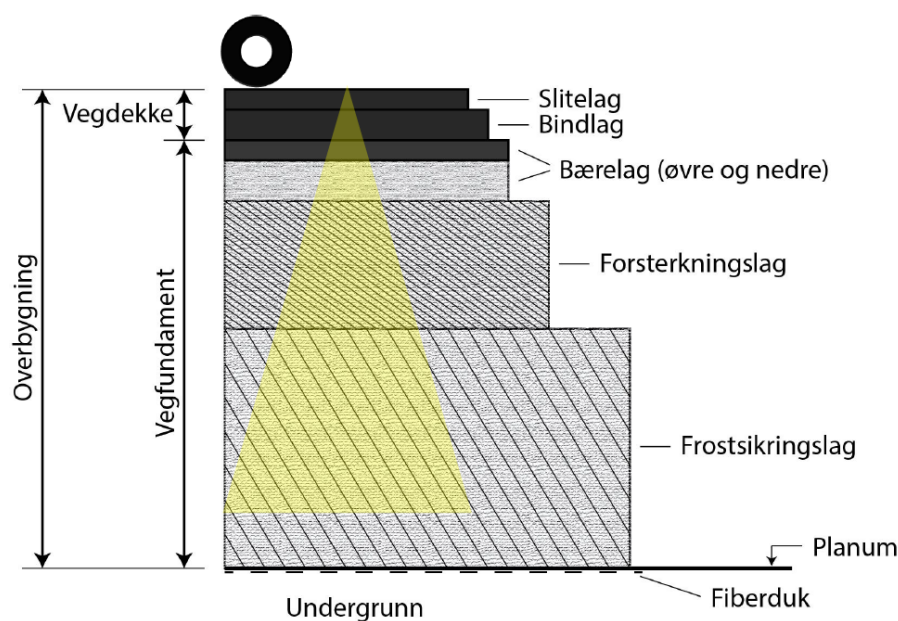
Hensikten med frostsikringslag er å forhindre at frost går ned i undergrunn. Det er derfor krav til frostsikringslag på undergrunn karakterisert som telefarlig (T3 og T4). Lagets tykkelse avhenger av frostdybde og dimensjonerende frostmengde. Vanligste materiale er steinmaterialer, sand og grus. Det kan også benyttes isolasjonsmaterialer som ekstrudert polystyren (XPS) og skumglass. Det er ingen krav til mekanisk styrke på steinmaterialer i frostsikringslag, da det så langt nede i konstruksjonen er relativt lave spenninger og lav fare for nedknusing av svake bergarter (Statens vegvesen, 2016, s. 288).

2.2.5 Filterlag/fiberduk

Filterlaget skiller undergrunn og vegoverbygning. Det kan benyttes både filtrerende masser og fiberduk. Hensikten er å hindre sammenblanding av de fine materialene i undergrunnen og de grove materialene i overbygningen. Filterlaget skal i tillegg drenerer og gi avløp for vann; både nedenfra og ovenfra (Statens vegvesen, 2016, s. 314).

2.2.6 Undergrunn

Undergrunnen er nederst i vegkonstruksjonen. I enkelte tilfeller er det hensiktsmessig å bearbeide undergrunnen for å forbedre styrke og bæreevne. Avhengig av geografisk beliggenhet, vil grunnforholdene ha naturlig variasjon. Undergrunnen deles derfor inn i bæreevnegrupper etter styrke. En stabil undergrunn skal redusere spenninger og tøyninger, sikre gode kjøreforhold og begrense skadeutvikling. Undergrunnens bæreevne er avgjørende for utformingen av overbygningen. En undergrunn med dårlig bæreevne er avhengig av en sterkere overbygning for å redusere tøyninger/spenninger, sammenliknet med undergrunn med god bæreevne.



Figur 2-6: Vegens oppbygning og spenningsfordeling. Illustrasjon: Statens vegvesen.

Figur 2-6 illustrerer hvordan spenning (gul trekant) fra trafikkbelastning kan fordeles nedover i vegkonstruksjonen. Spenningene fordeles over et større areal jo lengre ned i konstruksjonen de kommer, og belastning per areal avtar. Vinkel (på trekant) varierer avhengig av materialenes lastfordelende evner. Normal vinkel er ca. 45° .

2.3 Bæreevne

Bæreevne er et uttrykk for hvor mye belastning et materiale eller gjenstand tåler. Bæreevne er derfor også et uttrykk for hva som kan forventes av nedbrytning. Vegens bæreevne uttrykkes i tonn, og defineres som den største aksellasten vegen kan utsettes for over en gitt dimensjoneringsperiode, uten at vegens tilstand faller under en akseptabel grense (Statens vegvesen, 2019). Den totale bæreevnen til en veg avhenger av undergrunnen og materialene i vegkroppen, det stilles derfor krav til materialer i vegoverbygningen ved dimensjonering. Dimensjonerende bæreevne er et uttrykk for vegens antatte bæreevne. Statens vegvesen har følgende definisjon: «Dimensjonerende bæreevne tilsvarer bæreevnen som 90 % av strekningen oppfyller (...).» (2016, s. 256). Med andre ord tillates det at 10 % av strekningen er svakere.

Effektivspenning er differansen mellom totalspenning (jordmassenes vekt) og poretrykk. Vann har høy elastisitetsmodul, men lav skjærstyrke. Dette medfører at vannet reduserer *effektivtrykket* (effektivspenningen) i granulære materialer, og dermed også skjærstyrken. Jordmasser som sand og silt, som har null effektivspenning, gir kvikksandforhold og tilnærmet null bæreevne. For tette masser med lav *permeabilitet* vil belastning medføre økt poretrykk i området rett under og rundt lasten. Økt poretrykk reduserer effektivtrykket og skjærstyrke/friksjon. Så lenge vann beveger seg fritt øker poretrykket lineært med dybden (Statens vegvesen, 2018a, s. 14-10). I tette masser kan belastning føre til overtrykk, hvor jordmassenes permeabilitet avgjør hvor lang tid overtrykket trenger for å diffundere.

Bæreevne kan bestemmes gjennom belastningsforsøk, og beregnes ved hjelp av empiriske formler. Bæreevne kan også beregnes ut fra lagdeling og materialtyper bestemt ut fra oppgravingsprøver.

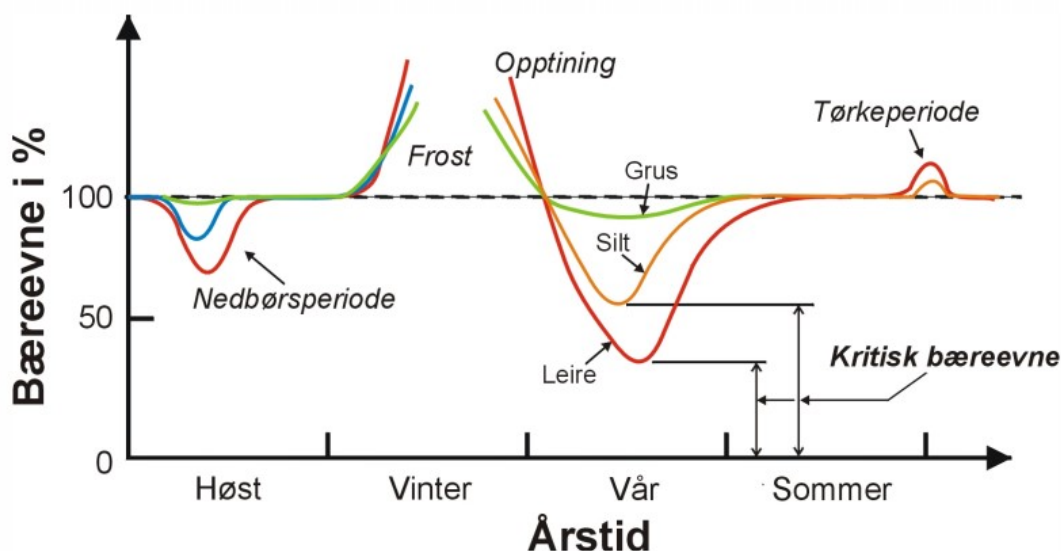
2.3.1 Vanninnhold

Massene i vegkonstruksjonen deles inn i to soner når det gjelder vann; den mettede sonen og den umettede sonen. Den mettede sonen ligger under grunnvannets overflate og betegner området hvor porene er helt fylt med vann. Den umettede sonen ligger over grunnvannsoverflaten, og betegner området hvor porene er fylt med både vann og luft. I den umettede sonen er vannet knyttet til jordmassene ved hjelp av kapillær- og absorpsjonskrefter. Vann absorberes lettere av/til jordpartikler enn luft, spesielt når jordmassene inneholder både vann og luft. På grunn av dette vil vannet ligge rundt jordpartiklene, og midt i porevolumet er det kun luft (Statens vegvesen, 2018a, s. 14-6). En viktig egenskap hos vann er dets evne til å binde seg på mineraloverflaten. En gitt mengde finkornet materiale har større overflate enn samme mengde grovkornet materiale, og vil derfor kunne binde større mengder vann. Vanninnhold varierer med materialets/jordartens minerale sammensetning, finstoffinnhold og organisk innhold (Statens vegvesen, 2018a, s. 2-8).

På samme måte som mellom vann og luft, eksisterer det en overflatespenning mellom vann og jord. Dersom vanntrykket er lavere enn atmosfæretrykket (lufttrykket) vil vannet som befinner seg i jordmassenes porer, stige. Vannet vil stige helt til trykkforskjellen er balansert. Den totale høyden vannet har steget, kalles stigehøyde. Fine masser har stor kapillær

stighøyde – stor oppsugingskraft – og lav permeabilitet (Statens vegvesen, 2018a, s. 14-8). For grove masser er det omvendt.

Metningsgrad er et uttrykk for forholdet mellom vannvolum og porevolum i et materiale. Metningsgrad varierer med tilgang til vann, som avhenger av nedbør, årstid og vegetasjon (Statens vegvesen, 2018a, s. 14-6). Materialer med høy metningsgrad er vanskelig å komprimere. Vanninnhold kan derfor gi en god indikasjon på et materiales egnethet til bruk i vegbygging. Bæreevnen til vegens bituminøse lag avhenger av temperatur, mens de granulære lagene avhenger av vanninnhold. Ifølge Berntsen (2018) er ubundne materialers bæreevne en funksjon av vanninnhold.

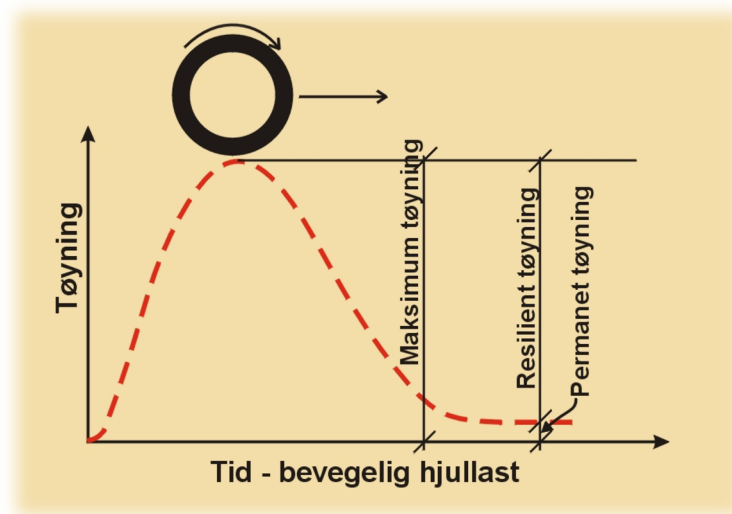


Figur 2-7: Vegens bæreevne avhengig av årstid (Berntsen, 2018).

Figur 2-7 illustrerer vegens variasjon i bæreevne avhengig av årstid. Om vinteren vil frost og tele bidra til økt bæreevne, mens teleløsning og økt vanninnhold om våren gir en reduksjon. Overgangen mellom sommer og vår er spesielt kritisk. Store mengder frost vil gi tilsvarende stort vanninnhold ved teleløsning. Jo finere materialer, desto verre. Leire (rødt) gir dårligst bæreevne ved høyt vanninnhold, men god bæreevne ved frost og tørke. Ifølge Statens vegvesen (2016, s. 285) skjer hoveddelen av nedbrytningen av det lavtrafikkerte vegnettet i Nordkalotten, under teleløsning. Dette som en følge av redusert bæreevne.

2.3.2 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul (E-modul) angir et materiales evne til motstand mot elastiske deformasjoner. E-modul er en viktig del av vegens bæreevne og motstand mot permanent deformasjon. Jo større E-modul, desto større motstand mot elastisk deformasjon og tøyning som følge av belastning (ROADEX Network, u.å.-a). I tillegg til elastisk deformasjon, finnes plastisk deformasjon. Plastisk deformasjon er permanent, og er en funksjon av den elastiske deformasjonen og type materiale.



Figur 2-8: Tøyning avhengig av tid. Illustrasjon: Geir Berntsen, Statens vegvesen.

Som vist på figur 2-8, er permanent tøyning liten i forhold til *resilient tøyning*. *Resilientmodul* beskriver den gjenvinnbare tøyningen, en avhengighet mellom spenninger og resilient (elastisk) deformasjon. Den permanente tøyningen er normalt liten i forhold til den gjenvinnbare (resiliente) tøyningen, E-modul brukes derfor som en tilnærming til resilientmodul.

Under optimale forhold bør lagenes E-modul avta med konstruksjonens dybde. De største spenningene og belastningen fra hjullasten finner sted øverst i vegkonstruksjonen, og avtar nedover mot undergrunn. Et stivt materiale vil fordele lasten bedre til lagene under. Siden spenningene og tøyningene avtar nedover i lagene, kan det benyttes materialer med lavere E-modul lenger ned.

E-modulen for granulære materialer er avhengig av spenningsnivået, mens for asfalt regnes E-modul normalt som spenningsuavhengig. Dvs. om det brukes en bærelagsgrus høyt oppe i vegoverbygningen vil denne være stivere (høyere E-modul) enn om det brukes samme materiale langt nede (Berntsen, e-post 10. mai 2021). Belastning kan ikke overstige det aktuelle lagets kapasitet uten skader som følge av brudd. Dette gjelder både ved dimensjonering av ny veg og forbedring av eksisterende veg.

En av hovedutfordringene er de horisontale strekkreftene (tøyningene) som oppstår i underkant av asfalten/vegdekket. Her er stivheten for underlaget avgjørende. Dersom det er stor forskjell i E-modul mellom to lag i øvre del av konstruksjonen, vil det oppstå store spenningskonsentrasjoner som er skadelig for vegen. Dette kan sammenliknes med belastning av et flatbrød. Dersom flatbrødet ligger på et mykt underlag, for eksempel en svamp, vil det knekke. Ligger det på et relativt stivt underlag, et kjøkkenbord, vil det være mulig å unngå. Et lags tykkelse og E-modul kan påvirke bæreevnen til både laget over og under.

2.3.3 Lastfordelingsevne

Alle materialer har en lastfordelingskoeffisient, a . Lastfordelingskoeffisienten uttrykker materialets styrke og evne til å fordele last i forhold til et referansemateriale.

Referansematerialet er av grus, og har lastfordelingskoeffisient 1,0 (Statens vegvesen, 2015, s. 121). Koeffisienten beregnes etter følgende formel:

$$a = 0,21 * \sqrt[3]{E}$$

Formel 2-1: Lastfordelingskoeffisient (Statens vegvesen, 2014b, s. 226).

For mekanisk stabiliserte materialer benyttes

$$a = 0,17 * \sqrt[3]{E_{200}}$$

Formel 2-2: Lastfordelingskoeffisient for mekanisk stabilisert materiale (Statens vegvesen, 2014b, s. 226).

hvor

a: lastfordelingskoeffisient

E: E-modul (MPa) ved temperatur 25 ° C og belastningsfrekvens 10 Hz.

E₂₀₀: elastisitetsmodul ved 200 kPa middelspenning (bestemt ved sykliske treaksialforsøk), uttrykt i MPa.

Et alternativ for å sikre nødvendig bæreevne ved dimensjonering, er å benytte indeksmetoden.

Etter formel 2-3 beregnes en indeks som gir uttrykk for et lags evne til fordeling av last.

$$I_{i,n} = \sum_{j=1}^n a_{i,j} * h_{i,j}$$

Formel 2-3: Indeks for lastfordelingsevne (Statens vegvesen, 2018b, s. 174).

hvor

I_{i,n}: indeksverdi for lag *n+1* i punkt *i*

a_{i,j}: lastfordelingskoeffisient til materialet i lag *j* i punktet *i*

h_{i,j}: lagstykkelse (cm) til lag *j* i punkt *i*

Et lag med a = 2 og tykkelse h = 10 cm, vil fordele trafikklasten like godt som et materiale med a = 1 og h = 20 cm.

2.4 Vegens nedbrytning

Statens vegvesen har utarbeidet en egen skadekatalog med oversikt over de vanligste skadene for veger med bituminøst dekke. En oversikt over disse skadene og skadeårsak er her framstilt i tabell 2-3.

Tabell 2-3: Vanlige skader og skadeårsak for veger med bituminøst dekke (Statens vegvesen, 2014a, s. 15).

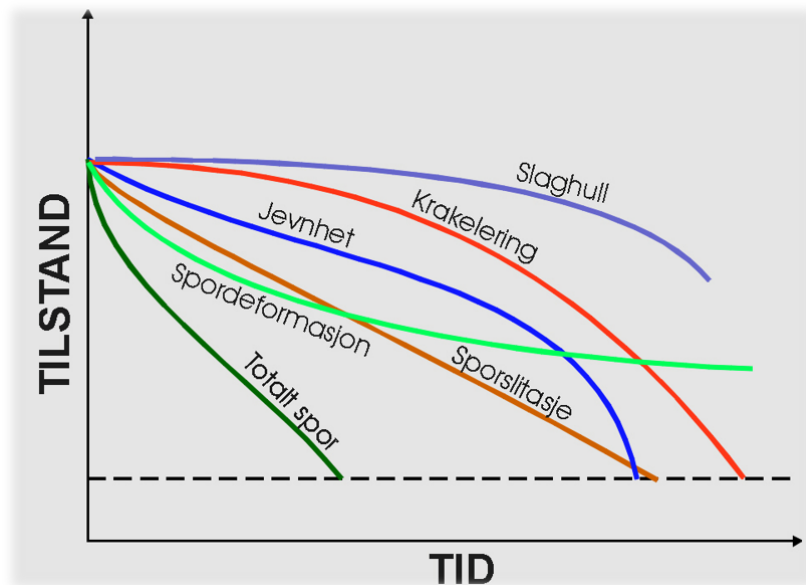
Type skade	Årsak
Langsgående sprekker	- Telehiv - Breddeutvidelse - Svake kanter / smal skulder - Dårlige dekkeskjøter
Tversgående sprekker	- Telehiv - Svinn (krymping)
Krakelering	- Ustabilt bærelag - Bæreevnesvikt - For tynt dekke
Slaghull	- Videreutvikling av krakelering - Lokale feil i materialer eller utførelse ved legging
Overflateskader	- Dårlig utførelse / legging - Ikke tilstrekkelig materialkvalitet - Mekaniske skader - Dårlig dreneringsforhold - Aldring
Ujevnheter i vegens lengdeprofil	- Telehiv - Setninger - Etterkomprimering
Spor i vegens tverrprofil	- Piggdekksslitasje - Ustabilt dekke - Ustabilt bærelag og/eller forsterkningslag - Svak undergrunn

Vegens varierende grunnforhold er ofte en utfordring, og normal slitasje og skadeutvikling som følge av vanlig bruk er unngåelig. Ifølge Varin & Saarenketo (2014) kan vegens utmattelse og skademekanismer klassifiseres etter opprinnelse, i følgende fem kategorier:

1. Utmattelse av dekke og underliggende ubundne lag, som følge av gjentatt belastning.
2. Permanente deformasjoner i vegens strukturelle lag. Denne typen deformasjoner kan oppstå selv etter lite belastning, og de fleste oppstår under vårens teleløsningsperiode.
3. Skader knyttet til frost og dårlig dreneringsforhold. Frostskader er ofte årsaken til problemene i kategori 2.
4. Geotekniske problemer. Det vanligste eksempelet er setningsskader.
5. Dimensjonerings- og konstruksjonsfeil, problemer knyttet til for eksempel utførelse av kulverter, overganger og refleksjonssprekker.

Dersom det legges ny asfalt over eksisterende sprekk i gammelt asfaltlag, uten videre forbedring, vil sprekkene forplante seg (reflekteres) i det nye asfaltlaget. Dette kalles

refleksjonssprekker. Ved utmatting vil dannelsen av sprekker normalt starte i underkanten av asfaltlaget og forplante seg oppover.



Figur 2-9: Vegtilstand/skadeutvikling som funksjon av tid. Illustrasjon: Geir Berntsen, Statens vegvesen.

Figur 2-9 viser forskjellige skader og deres utvikling avhengig av tid. Total spordannelse er mest kritisk, med en relativ rask utvikling og hurtig reduksjon i vegetilstand. På motsatt side krever slaghull en mer langsom utvikling før det når et kritisk nivå.

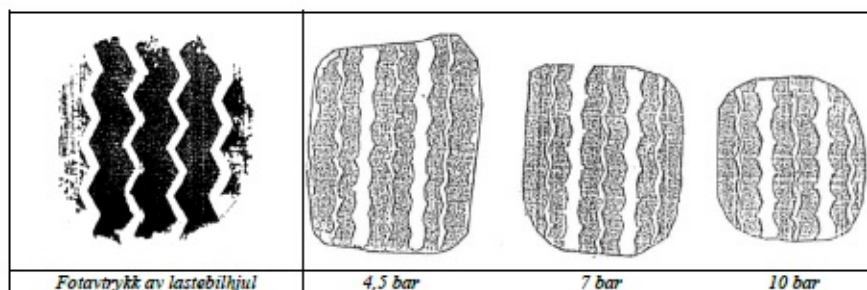
Det er grenser for hvor mye et asfaltdekke tåler av tøyninger før det sprekker opp. Vegdekket skal være fleksibelt og elastisk. Høyt innhold av mykt bindemiddel gir større elastisitet og dekket tåler større bevegelser. Til gjengjeld vil varme sommerdager og høye temperaturer redusere dekkets motstand mot deformasjon. Stivt bindemiddel gir mindre rom for bevegelse, men vil ha større motstand mot deformasjon ved varme temperaturer.

2.4.1 Trafikkbelastning

Tunge kjøretøy står for majoriteten av trafikkbelastningen og den strukturelle nedbrytingen av vegen (Statens vegvesen, 2016, s. 76). Kjøretøyenes nedbrytende effekt avhenger av aksellast, akselkonfigurasjon, hjulkonfigurasjon, ringtrykk og totalvekt. Et kjøretøy i fart skaper spenning og tøyning i vegen, som følge av dets belastning.

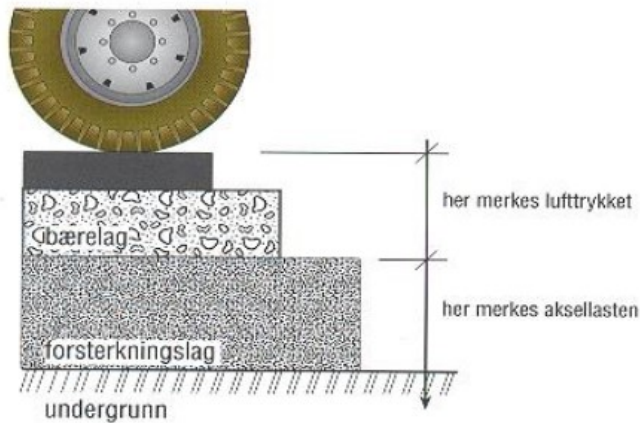
Kjøretøyets *hjulkonfigurasjon* beskriver hvilke type hjul som er benyttet og hvordan de er montert på kjøretøyet. Dagens tunge kjøretøy og vogntog benytter enkelmonterte bredbanedekk på de fleste aksler. Bredbanedekk har i mange tilfeller økonomiske- og praktiske fordeler, blant annet lavere drivstofforbruk. De gir forøvrig noe større påkjenning på vegdekket (Statens vegvesen, 2016, s. 63). Ringtrykket er normalt større for enkelmonterte hjul, enn for tvillingmonterte hjul, og derfor mer skadelig (Berntsen, 2021).

Aksellast er kjøretøyets last per aksel, uttrykt i tonn. *Akselkonfigurasjon* er sammensetningen av type aksler. Et kjøretøys aksler monteres som enkle, doble (tandem aksel) eller triple (tridem aksel), i boggi eller langboggi.



Figur 2-10: Kontaktflate ved ulike ringtrykk (Statens vegvesen, 2016, s. 63).







Kjøretøyets hjullast overføres fra kjøretøyet til vegdekket ved hjelp av trykket som oppstår mellom kontaktflaten til hjulet, og underlaget. Dette kalles *kontakttrykk*. Høyt ringtrykk gir størst kontakttrykk midt på kontaktflaten, lavt ringtrykk gir størst kontakttrykk ut mot kanten på kontaktflaten (Yideti, 2018b). Figur 2-10 viser størrelse på kontaktflate avhengig av ringtrykk, hvor 1 bar tilsvarer 100 kPa. Kontaktflatens størrelse avhenger også av hjulets stivhet og kjøretøyets hastighet. Ringtrykket påvirker kjøretøyets rullemotstand og friksjon mot underlaget, som igjen påvirker drivstofforbruk og trafiksikkerhet. Større rullemotstand gir økt drivstofforbruk, lavere friksjon gir større bremselengde ved oppbremsing.



Figur 2-11: Illustrasjon av hvor i konstruksjonen belastningen merkes (Aurstad, 2018).

Figur 2-11 viser ringtrykkets og aksellastens påvirkning i vegkonstruksjonen. Ringtrykket merkes best på vegdekke og bærelag, aksellast og hjullast påvirker forsterkningslag og undergrunn. Ifølge Aurstad (2018) vil totalvekten hovedsakelig påvirke undergrunn.

Tunge kjøretøy utformes for å frakte størst mulig nyttelast, med minst mulig nedbrytende effekt. Dette kan uttrykkes som et kjøretøys *vegvennlighet*. Vegvennlighet er forholdet mellom kjøretøyet medbrakte nyttelast og relative nedbrytende effekt. Lav relativ nedbrytende effekt gir høy vegvennlighet.

Mest vegvennlige vogntog	Relativ nedbrytende effekt	Vegvennlighet	Minst vegvennlige vogntog	Relativ nedbrytende effekt	Vegvennlighet
 Slepevogn	2,5	12,8	 Påhengsvogn	6,2	5,4
 Semitrailer	2,4	12,6	 Semitrailer	5,4	5,9
 Slepevogn	3,1	10,8	 Slepevogn	4,9	6,8

Figur 2-12: Ulike kjøretøys vegvennlighet (Statens vegvesen, 2016, s. 64).

Ifølge Statens vegvesen (2016, s. 64) øker vegvennlighet ved bruk av boggi og/eller trippel boggi, sammenliknet med enkle aksler. Figur 2-12 viser vegvennlighet avhengig av antall og type aksler. Figuren viser at vegvennlighet øker med antall aksler og tilsvarende reduksjon av antall enkle aksler med enkelmonterte hjul. Alle hjul markert med rød ring er enkelmontert.

2.4.2 Deformasjon

Deformasjon skyldes volumreduksjon i underliggende lag, hovedsakelig reduksjon av porevolum. Dette avhenger av styrke (stivhet) og materialenes beliggenhet i konstruksjonen. Svake materialer langt opp i vegkonstruksjonen gir størst volumreduksjon. Dersom spenninger som følge av trafikk overskrider materialets grenseverdier for hvor mye belastning det tåler, oppstår permanente deformasjoner. Permanent deformasjon oppstår når skjærspenninger i materialet overstiger 70 – 80 % av materialets skjærstyrke (ROADEX Network, u.å.-b). Ved dynamisk belastning av materialer uten elastisk reaksjonsevne er dette problematisk. Materialene vil ikke ha mulighet til å restituere umiddelbart etter belastning, og ved repeterende belastning kan det føre til økt ikke-reversibel tøyning. Dette gjelder spesielt i ubundne materialer, men deformasjon kan oppstå i både vegdekke, bærelag, forsterkningslag og undergrunn.

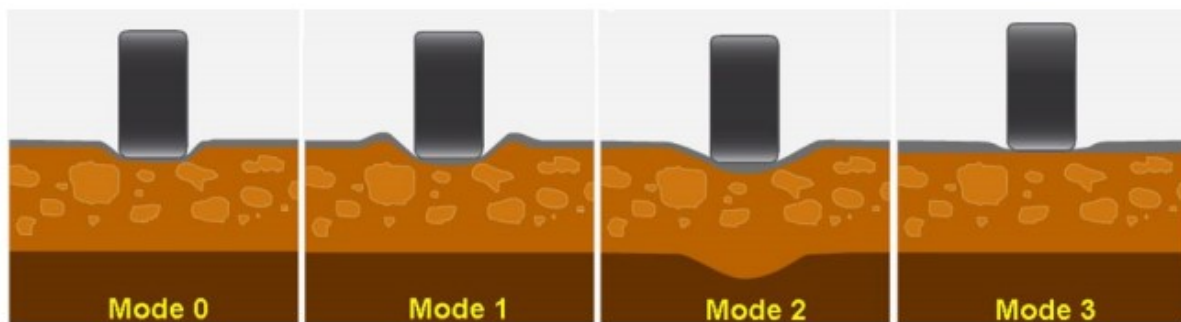
Vann og finstoffinnhold påvirker vegkonstruksjonens motstand mot deformasjon. Typisk for gamle veger er varierende materialkvalitet og høyt finstoffinnhold. I kombinasjon med dårlig drenering vil dette skape utfordringer. Nye veger har materialer etter strengere krav, og forutsatt riktig legging og tilstrekkelig komprimering, bedre kvalitet. Det kan likevel oppstå uforutsette forhold som bidrar negativt, for eksempel separasjoner og opphoping av finstoff. Uansett forhold er deformasjon og telehiv skadelig. Vegens grunnforhold er varierende selv over en kort strekning. Like grunnforhold vil gi en jevn skadeutvikling med få eller ingen ujevnheter. I en godt dimensjonert veg er spenningene som forplanter seg nedover i konstruksjonen så små at de ikke forårsaker deformasjoner i undergrunnen. Også der det er svake materialer. For en veg bygd på dårlig grunn, med utilstrekkelig kvalitet i bære- og forsterkningslag, vil mangelfull og/eller dårlig undergrunn medføre spordannelse.

For å unngå permanente deformasjoner er det viktig med tilstrekkelig komprimering under vegens bygging og utførelse. Tilstrekkelig komprimering før bruk vil bidra til å unngå ytterligere komprimering etter den er tatt i bruk, og skader som følge av dette unngås. I tillegg

til komprimering vil riktig type, og mengde, bindemiddel i asfalten sørge for tilstrekkelig motstand mot deformasjon i vegdekket. Deformasjon i asfaltmaterialet er i stor grad avhengig av temperatur og belastning (Statens vegvesen, 2015, s. 136). Både ustabil kornkurve og feil type – eller mengde – bindemiddel, bidrar til deformasjon i asfaltmaterialet.

2.4.3 Spordannelse

Årsaken til spordannelse er plastisk deformasjon i de bundne lagene, komprimering som følge av trafikkbelastning, slitasje på vegdekket, og/eller permanente deformasjoner i bærelag, forsterkningslag eller undergrunn. For å bedre forstå hvilken effekt tunge kjøretøy har hva angår sporutvikling, er det definert ulike modus (typer) spordannelse og sporutvikling. Modusene er knyttet til permanent deformasjon, og utarbeidet i arbeid med ROADEX (Varin & Saarenketo, 2014).



Figur 2-13: Ulike modus av spordannelse (ROADEX Network, u.å.-b).

Figur 2-13 er en illustrasjon av de ulike spormodusene/typene. ROADEX Network (u.å.-b) forklarer det på følgende måte:

Spor av type 0: spordannelse oppstår som følge av komprimering i vegkonstruksjonens forskjellige lag. I en ferdig bygd veg, vil det i praksis alltid oppstå noe etterkomprimering som følge av belastning. For å unngå spordannelse er det derfor viktig med tilstrekkelig komprimering før vegen tas i bruk. Spordannelse type 0 kan også oppstå når fryste, ubundne materialer tiner om våren. Denne typen spordannelse vil normalt stabilisere seg selv, ved at komprimering under trafikkbelastning hindrer ytterligere komprimering. Vann har liten effekt på spordannelse type 0, men med økende vanninnhold kan denne typen spordannelse forekomme.

Spør av type 1: I svake granulære materialer oppstår lokale skjærspenninger i nærheten av kjøretøyenes hjul. Dette fører til at asfaltdekket i umiddelbar nærhet til hjulsporet presses til siden, hvor ekstra materiale medfører en heving av vegbanen (se figur 2-14). De granulære materialene gjennomgår plastiske skjærtøyninger og kjevles slik at massene presses til side. Massene opplever en forflytning. En konsekvens av dette er løse materialer. Spordannelse av type 1 kan derfor betraktes som en konsekvens av utilstrekkelig skjærstyrke i de granulære lagene. Økende volumetrisk vanninnhold reduserer materialets skjærstyrke.

Spør av type 2: spordannelsen skyldes deformasjon i overflaten av undergrunnen. Til tross for bruk av materialer med tilstrekkelig kvalitet, kan det oppstå deformasjoner i undergrunnen som følge av for små lagstykkelser. Nedbøyningen kommer til syne som et bredt spor med små hevelser på kantene. Hevelsene forårsakes av massenes forflytning, på samme måte som spor av type 1. Vanninnhold vil også i dette tilfellet ha stor påvirkning på undergrunnens skjærstyrke og spordannelse.

Spør av type 3 forekommer som følge av trafikkbelastning, slitasje forårsaket av kjøretøyenes hjul. Også her kan økt vanninnhold medføre økt spordannelse, spesielt på bituminøse dekker. Spordannelse type 3 er eneste type som ikke relatert til permanent deformasjon som følge av bruk av tunge kjøretøy. I Norden skyldes denne spordannelsen historisk sett bruk av piggedekk. Denne typen spordannelse blir kun vurdert dersom årsdøgntrafikk er over 3000 (ÅDT > 3000).

2.4.4 Sprekkdannelse

Langsgående sprekker er en større utfordring enn tversgående sprekker, spesielt med tanke på kjørekraft til kjøretøy på to hjul. Det er også et problem med tanke på videre sprekke- og sporutvikling. Videre skadeutvikling av krakelering og slag hull er ofte en konsekvens av langsgående sprekker, hovedsakelig forårsaket av vann som trenger inn i vegkroppen. Gjentakende tung belastning over tid bidrar til utmatting av vegdekket og dannelsen av utmattingsprekker. I starten oppstår små mikrosprekker, som etter repeterende belastning utvikler seg. Allerede eksisterende sprekker øker faren for økt sprekkutvikling.

Ved høye temperaturer blir asfalten myk og utvider seg. Ved lave temperaturer blir asfalten stiv og sprø, og trekker seg sammen. Når asfalten trekkes sammen dannes strekkspenninger

og *lavtemperatursprekker* kan oppstå (Statens vegvesen, 2015, s. 139). Ved raske temperaturfall vil ikke asfalten få tid til å tilpasse seg for å utjevne spenningene, og det dannes sprekker. I kombinasjon med høy strekkstyrke dannes lavtemperatursprekker på tvers av vegen.

2.4.5 Klimapåkjenning

I tillegg til trafikkbelastning, utsettes vegen daglig for klima- og miljøpåkjenninger. Nedbør, UV-stråling, temperatur og fryse/tine sykluser endrer konstruksjonens (og vegdekkets) egenskaper over tid. Ved å velge egnede materialer og gode dreneringsløsninger kan skadeomfanget begrenses og forebygge unødvendig skadeutvikling.

Våt vegbane gir høyere piggdekkslitasje og tap av vedheft, mens snø og is beskytter, da slitasje først og fremst vil gå på dette og ikke selve vegdekket. Det vil til gjengjeld gi lavere trafiksikkerhet og fare for glatt vegbane.

Vann som blir liggende på vegdekket reduserer også trafiksikkerheten ved økt fare for vannplaning, vannsprut og glatt vegbane. Sistnevnte både på grunn av lav friksjon, og vann som fryser til is. Vann bidrar også til økt erosjon og dannelse av grøfter og sprekker i og rundt vegen.

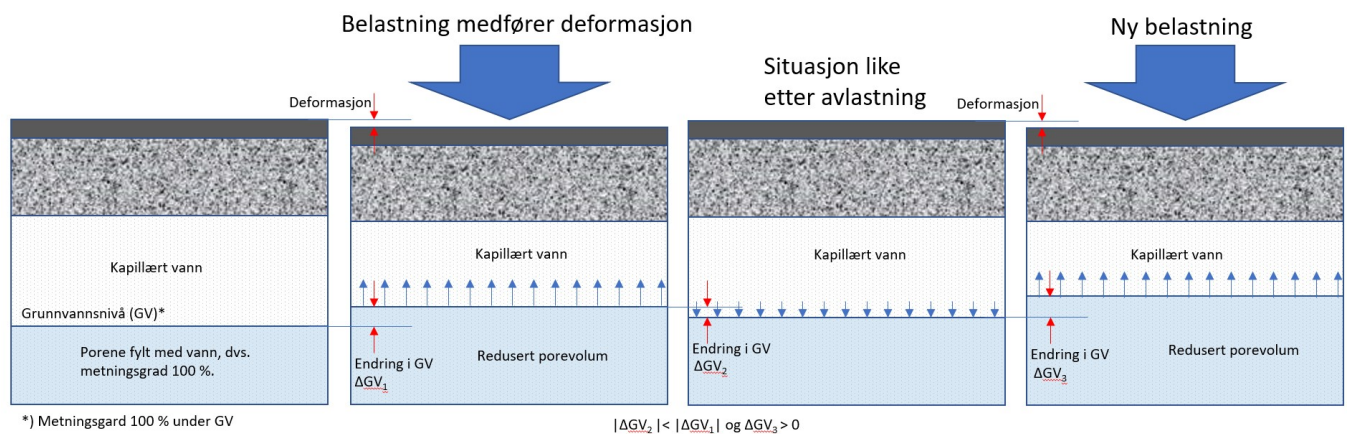
Dersom vegen har høyt innhold av finstoff, vil materialets kapillærsug bidra til transport av vann til frysefronten. Når frosten går ned i et telefarlig materiale oppstår krefter som suger vannet opp til frysefronten og danner islinser. Disse kreftene kommer i tillegg til kappilærkreftene. Islinjene kan bli flere centimeter tykke og kreve stor plass, som fører til hevelser på vegoverflaten; telehiv. Ved teleløsning fører de smeltede islinjene til et overskudd av vann. Vannet blir stående «fanget» mellom vegdekke og det fryste laget, to lag som begge er tilnærmet tett.

For asfaltens motstand mot spordannelse er dekketemperatur relevant. Høy temperatur gjør asfalten mykere og øker fare for deformasjon. På samme måte blir den hardere og mer sprø ved lave temperaturer. Type asfalt velges derfor etter belastning og klimaforhold. UV-stråler bidrar også til å gjøre asfaltdekket stivt og hardt. Dekket «eldes». Dette går spesielt på bindemiddelet. Aldring av asfalt bidrar til lettere oppsprekking.

2.5 Pumpeeffekt

I sin artikkel «Vegslitasje fra tømmervogntog» (2020), beskriver Skjølaas pumpeeffekten som et fenomen som oppstår på vegger hvor flere hjul passerer i samme spor etter hverandre i løpet av kort tid. Med vann i vegkroppen vil poretrykket øke for hvert hjul som passerer, spesielt i de granulære materialene. Dette fører til mindre friksjon mellom gruskornene, og gradvis reduksjon av vegens bæreevne (Skjølaas, 2020).

I alle materialer, bortsett fra rent fjell, finnes et porevolum som fylles av luft og/eller vann. Ved repeterende belastning komprimeres massene, og porevolumet reduseres. I motsetning til luft, har vann stor motstand mot deformasjon og er derfor vanskelig å komprimere. Luften som befinner seg i porevolumet vil derfor presses ut først. Ved ytterligere komprimering vil det ikke være plass til vannet. Under grunnvannstanden er materialenes porer fylt med vann, og reduksjon i porevolum medfører at vannet presses ut. Dette vannet beveger seg oppover i vegkonstruksjonen og inn i porer som inneholder kapillært vann og luft (Berntsen, 2021). På denne måten vil repeterende belastning føre til at vannet «pumpes» oppover i vegkonstruksjonen.



Figur 2-14: Pumpeeffekten (Berntsen, 2021).

Figur 2-14 illustrerer pumpeeffekten som man tenker seg at den fungerer, og mekanismen bak. Før belastning er porevolumet i den mettede sonen fylt med vann. Ved belastning komprimeres massene og det oppstår deformasjon. Som følge av dette presses vannet oppover. Etter avlastning vil vannet bruke noe tid før det er tilbake ved utgangspunktet. Dersom vegen utsettes for gjentatt belastning innen kort tid, presses vannet ytterligere

oppover. I verste fall vil vannet kunne nå undersiden av vegdekket og pumpes opp av eventuelle sprekker.

Vanninnhold har som nevnt stor betydning for bæreevne, og det er derfor viktig å ha kjennskap til og ta hensyn til pumpeeffekten. Pumpeeffekten avhenger av tilstedeværelse av vann, og vil først og fremst være et problem i veger med dårlige materialer i undergrunnen. Effekten er forventet spesielt framtreddende ved teleløsning, på grunn av økt vanninnhold.

2.6 Beregningsmodeller

Dimensjoneringsystemene som brukes i Norge i dag er semi-empirisk og bygger på teori i tillegg til erfaring. Dimensjoneringsystemet baserer seg på omfattende feltforsøk (AASHTO-forsøkene) som ble gjennomført i USA på 1950- og 1960-tallet. Systemet gjaldt opprinnelig for vanlig trafikkgruppe, men har senere blitt komplettert med teoretiske beregninger og utvidet til å gjelde alle trafikklasser.

2.6.1 Fjerdepotensregelen

Det norske dimensjoneringsystemet baserer seg i stor grad på fjerdepotensregelen, en formel utviklet for å kunne beregne antatt nedbryting som følge av kjøretøyenes aksellast. Formelen benyttes for å beregne ekvivalensfaktor, E, for hver enkelt aksel. Ekvivalensfaktoren er et uttrykk for akselens nedbrytingseffekt i forhold til referanseaksel. Referanseaksel i Norge er 10 tonn.

Formelen indikerer at vegens nedbryting som følge av aksellast, øker med fjerde potens av aksellasten – i forhold til standard aksellast. Jo tyngre aksellast, P, desto større nedbrytende effekt har kjøretøyet. Fjerdepotensregelen kan derfor benyttes til å beskrive relativ nedbrytende effekt av ulike akselgrupper (Thoresen, 2020). Fjerdepotensregelen uttrykkes følgende:

$$E = \left(\frac{P}{P_0}\right)^4 = \left(\frac{P}{10}\right)^4$$

Formel 2-4: Fjerdepotensregelen (Statens vegvesen, 2016, s. 76).

hvor

E: nedbrytningseffekt, ekvivalensfaktor

P: aktuell aksellast (tonn)

P₀: referanseaksel med nedbrytningseffekt = 1,0. I Norge gjelder 10 tonn.

Ekvivalensfaktoren for lette kjøretøy (totalvekt < 3,5 tonn) blir svært liten, og fjerdepotensregelen tar derfor kun hensyn til tunge kjøretøy med totalvekt over 3,5 tonn (Statens vegvesen, 2016, s. 76).

2.6.2 ERAPave

ERAPave (Elastic Response Analysis of Pavements) er et beregningssystem for analytisk (mekanisk-empirisk) dimensjonering av vegoverbygninger. Systemet eksisterer som et beregningsprogram; ERAPave PP, *Elastic Response Analysis of Pavements – Performance Predictions*. Det er utviklet av *Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI)* i Sverige, og under utvikling for bruk i Norge. Det understrekes at systemet ikke er ferdig utviklet for norske forhold, det gjenstår enda validering/kalibrering av systemet før endelig versjon er klar. Nåværende versjon innehar svenske standardverdier og har engelsk som bruksspråk.

Beregningsprogrammet benytter en mekanistisk-empirisk modell til å beregne antatt nedbrytning til en gitt vegoverbygning. Ved hjelp av mekanistisk-empiriske modeller er det mulig å inkludere effekten av klimafaktorer ved beregning av tilstandsutvikling. Denne typen modeller bruker grunnleggende mekanistiske/teoretiske prinsipper i kombinasjon med materialegenskaper, til å beregne spenninger og tøyninger. Disse brukes videre til beregning av framtidig nedbrytning (Statens vegvesen, 2016, s. 256).

I ERAPave beregnes nedbrytning ut ifra trafikkbelastning og primærresponser; spenning og tøyning i underkant av asfaltdekket og i overkant av undergrunn. Modellen benytter inngangsdata om vegens oppbygning, materialer, klima, trafikkbelastning og akselkonfigurasjon til å beregne deformasjon, spordannelse og utmatting. Programmet tillater beregning av vegoverbygninger som lineært elastiske lag eller ikke-lineære (ubundne) lag (Swedish National Road and Transport Research Institute, 2021a).

ERAPave PP består av to hovedkomponenter; en responsmodell og en ytelsesmodell (Swedish National Road and Transport Research Institute, 2021b). Responsmodellen er basert på elastisitetsteori for flere lag (*MLET – Multi Layered Elasticity Theory*), og beregner påkjenninger og belastninger i vegstrukturen som følge av trafikkbelastning under gitte klimaforhold. Ytelsesmodellen forutsier vegens (vegdekkets) ytelse eller nedbrytning som funksjon av tid.

Deformasjonsmodellen som benyttes krever inngangsdata om vegens materialer. Dette inkluderer materialenes tyngdetetthet, tverrkontraksjonstall og E-modul. Tyngdetettheten er den samlede vekten av materialets faste partikler og vann per enhet volum. Luft anses som vektløs. Tverrkontraksjonstallet uttrykker materialets evne til utvidelse/deformasjon vinkelrett på belastningsretning. Tverrkontraksjonstallet er enhetsløs, og ligger normalt mellom 0,1 – 0,5.

Ved beregning av spordannelse benyttes optimal metningsgrad for overbygningens ubundne lag. Optimal metningsgrad er materialets prosentvise vanninnhold som gir optimal komprimering. Optimal metningsgrad har betydning for beregning av lagenes stivhet, da materialenes stivhet avhenger av vanninnhold. For bituminøse lag oppgis dekketemperatur. da denne har stor påvirkning på lagets motstand mot deformasjon.

ERAPave PP krever inngangsdata for både spordannelse, utmatting og piggdekkslitasje for å kunne foreta beregninger. Det vil si at det ikke er mulig å kun beregne spordannelse, uten å få resultater også for utmatting og piggdekkslitasje.

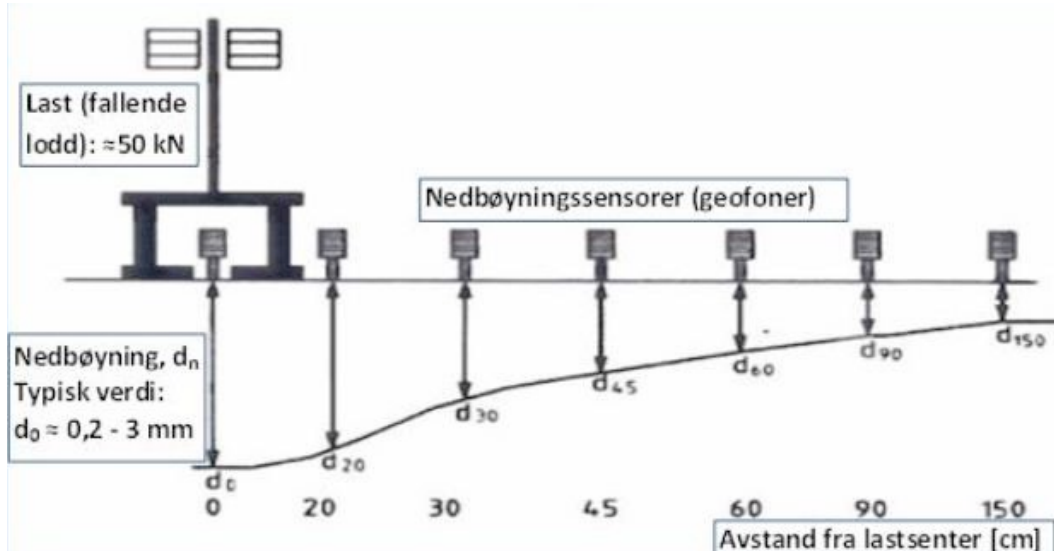
2.7 Måleutstyr

2.7.1 Falling Weight Deflectometer

For måling av vegens bæreevne, brukes *Falling Weight Deflectometer (FWD)*, eller fallodd. Fallodd måler responsen til vegkonstruksjonen i form av nedbøyning og krumming på vegdekket. Dette gjøres ved støtvis belastning (Statens vegvesen, 2021a, s. 284). Belastningen simulerer passering av hjullast.

Måleutstyret består av to hoveddeler; et lodd og en rekke geofoner. Loddet slippes fra en bestemt høyde, ned på en belastningsplate med diameter 30 cm. Lasten varierer fra 0 – 125 kN etter behov. En belastning på 50 kN tilsvarer en hjullast på 5 tonn (Yideti, 2018a). Når

vekten slippes settes vegbanen i bevegelse, og kraften som overføres mellom platen og underlaget blir målt av en kraftcelle. Den elastiske responsen til vegen blir registrert av geofoner.



Figur 2-15: Illustrasjon av lodd og geofoner (Statens vegvesen, 2021a, s. 284).

Figur 2-15 viser en illustrasjon av falllodd med tilhørende geofoner. Geofonene er små sensorer, montert i lastsenter (d_0) og forskjellig avstand fra lastsentrum (Yideti, 2018a). Geofonene registrerer vegens nedbøyning på de ulike punktene. Antall geofoner og deres plassering kan variere avhengig av utstyrets merke og produsent.

Før måling plasseres falllodd i vegens ytre hjulspor, dvs. høyre hjulspor. Målingene blir normalt utført hver 50. meter, og i minste fall skal sensor 1 – 7 benyttes. På hvert målepunkt slås tre slag. Alle måledata lagres, men kun siste slag rapporteres. Målingene legges inn i NVDB.

På grunnlag av målingene beregnes bæreevne i målepunktene. For veger med asfaltdekke gjelder følgende formel:

$$B_{asfalt} = 11 * \left(\frac{E_{dim}}{200}\right)^{0,6} * \left(\frac{50}{\ddot{A}DT_T}\right)^{0,072} \quad (\text{tonn})$$

Formel 2-5: Bæreevne for veg med asfaltdekke (Statens vegvesen, 2021a, s. 285).

hvor

$$E_{dim} = \frac{110 * p}{\sqrt{d_0 * (d_0 - d_{20})}} \quad (\text{MPa})$$

Formel 2-6: Dimensjonerende E-modul

p: flatetrykk (MPa)

$\ddot{A}DT_T$: gjennomsnittlig årsdøgntrafikk tunge kjøretøy

d_0 : nedbøyning i lastsentrum (mm)

d_{20} : nedbøyning 20 cm fra lastsentrum (mm)

(Gjelder for platediameter 30 cm.)

Målingene angir vegens bæreevne, hvor i konstruksjonen eventuelle svakheter befinner seg, og hvor de svakeste punktene på vegstrekningen er. Størrelsen og formen på nedbøyningene som registreres, gir opplysninger om vegens tilstand (Statens vegvesen, 2015, s. 148). Svake materialer i undergrunn vil gi stor deformasjon langt fra lastsenter. Dersom det er svake materialer øverst i vegkonstruksjonen, er krummingen ($d_0 - d_{20}$) stor. Forholdstallet mellom maksimal deformasjon og deformasjonens krumming under fallodets lastsenter gir en indikasjon på hvor i vegkonstruksjonen svakheten befinner seg.

Er laginndeling kjent, kan data fra fallodd brukes til beregning av elastisitetsmodul for de ulike lagene.



Figur 2-16: Målebil fallodd. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.

Figur 2-16 viser bil med måleutstyr under måling.

2.7.2 Via Pavement Profil System

Via Pavement Profil System, forkortet ViaPPS, er et norskutviklet system som benyttes for å måle overflatetilstand på et vegdekke. Målesystemet foretar måling av spor, jevnhet, tverrfall og struktur i vegen, for hvert kjørefelt (Statens vegvesen, 2021a, s. 288). Målingene gjøres ved hjelp av laser(e) festet til et kjøretøy, en *målebil*. Målebilen trafikkerer en gitt vegstrekning mens laser(n)e foretar kontinuerlige målinger/registreringer. Utstyret består av en 360 ° roterende laser (plassert på biltaket) som måler 1 000 000 målepunkt pr. sekund og 200 omdreininger pr. sekund (Statens vegvesen, 2016, s. 245). Denne måler spor, jevnhet og tverrfall. En punktlaser foran på bilen måler tekstur og ujevnheter på langs. Målehastighet kan variere.

Utstyret registrerer tverrprofil, lengdeprofil, tekstur/ruhet, hastighet under måling, kurvdata, høydeprofil og vegmerking. All registrert måledata overføres til NVDB ved hjelp av et eget program knyttet til systemet. Målinger skjer normalt hver 20. meter. Måledata bearbeides og lagres i NVDB, slik at det er mulig å sammenlikne med tidligere målinger. På denne måten oppdages eventuelle endringer og avvik i vegtilstand.

Målinger kan utføres både i vegens lengdeprofil og vegens tverrprofil.



Figur 2-17 og 2-18: Målebil ViaPPS. Foto: Marit Helene U. Kværnmo

Figur 2-17 og 2-18 viser en ViaPPS-målebil fra Statens vegvesen.

2.7.3 Ground Penetrating Radar

Innen vegteknologi brukes *georadar*/*Ground Penetrating Radar (GPR)* til kartlegging av laginndeling og/eller grunnforhold i vegkonstruksjonen. Utstyret varierer i størrelse og utseende avhengig av produsent, men består normalt av en georadar-antenne, en sentralenhet (mottaker), batteri og PC. Ved hjelp av en antenne sendes det ut elektromagnetiske signaler med varierende frekvens mellom 10 MHz og 3000 MHz ned i veggen. Nøyaktighet/oppløsning og dybde vil variere med frekvens. Signalene reflekteres av materialene i veggen, avhengig av materialenes permittivitet (dielektrisk verdi) og konduktivitet (ledningsevne). Alle materialer har unike verdier, basert på mineralsammensetning, porøsitet og vanninnhold. Refleksjonene kan på denne måten brukes for å danne et bilde av laginndelingen under vegdekket.

Georadaren sender ut kontinuerlige signaler og produserer hele profiler av vegkonstruksjonen etter hvert som den skanner det aktuelle området. Målingene framstilles grafisk i radargram, hvor grafens amplitude gir uttrykk for vanninnhold. For optimale resultater bør målingene suppleres med grunnboringer eller oppgraving. Ved riktig bruk kan en georadar avdekke dybde til fjell, lagstykkelser, teledybde, variasjon i materialtyper og vanninnhold. Det er ikke mulig å bruke georadar til å bestemme detaljerte materialegenskaper.

3 Metode

I arbeidet med denne oppgaven er det benyttet ulike metoder, avhengig av hensikt. For sammenlikning av nedbrytningseffekt mellom totalvekt 60 tonn og totalvekt 74 tonn er det gjennomført praktiske forsøk med måling av vegtilstand før og etter belastning. For egen dataproduksjon er det valgt å benytte teoretisk modellberegning for å se på ulike akselgruppers nedbrytende effekt relativ til hverandre. Belastningsforsøkene var under planlegging, og første forsøk var allerede gjennomført, da arbeidet med masteroppgaven startet januar 2021.

For innsamling av litteratur og erfaring fra andre land, ble det sommeren 2020 gjennomført en litteraturstudie av en student ansatt i sommerjobb hos Statens vegvesen. Litteraturstudiet ble brukt som utgangspunkt for teori og diskusjon i denne masteroppgaven. Hensikten med litteraturstudiet var å gi en kort oppsummering av litteratur på tema knyttet til prøveordningen, spesielt ut fra erfaringer gjort i Finland, Sverige og Norge. Det ble benyttet søkeord som «bæreevne», «vegslitasje», «pumpeeffekt», «deformasjon», «drenering/drenasje», «74 tonn», og «spordannelse». I tillegg ble det benyttet personlig kommunikasjon med fagpersonell fra Norge, Sverige og Finland.

Teori er hentet fra pensum i vegteknologifag undervist ved NMBU, Statens vegvesens publiserte håndbøker og rapporter, og gjennom personlig kommunikasjon. De aktuelle fagene – THT251 og THT330, ble undervist høsten 2018 og 2019. Håndbøker og rapporter har vært tilgjengelige via Statens vegvesens egne nettsider, «vegvesen.no». Personlig kommunikasjon har bestått av e-post, telefonsamtaler og videomøter. Ved å benytte ulike anskaffelsesmetoder og direkte kommunikasjon, var hensikten å unngå indirekte kilder og redusere usikkerhet knyttet til dette. Deltakelse på praktisk belastningsforsøk i to omganger gav mulighet for interaksjon med prosjektets forskjellige parter; yrkessjåfører, fagpersonell og ufaglærte. Dette var nyttig for å danne et realistisk situasjonsbilde rundt prosjektet. All kommunikasjon og informasjon er vurdert etter kildens gyldighet og pålitelighet. Dette medførte vurdering av de enkeltes intensjon og personlig innstilling til prosjektet.

Fagartikler og informasjonsskriv knyttet til prøveordningen ble direkte tilsendt fra deltakere av prosjektgruppa. Det har i tillegg vært tilgang på faglitteratur gjennom Statens vegvesens interne systemer.

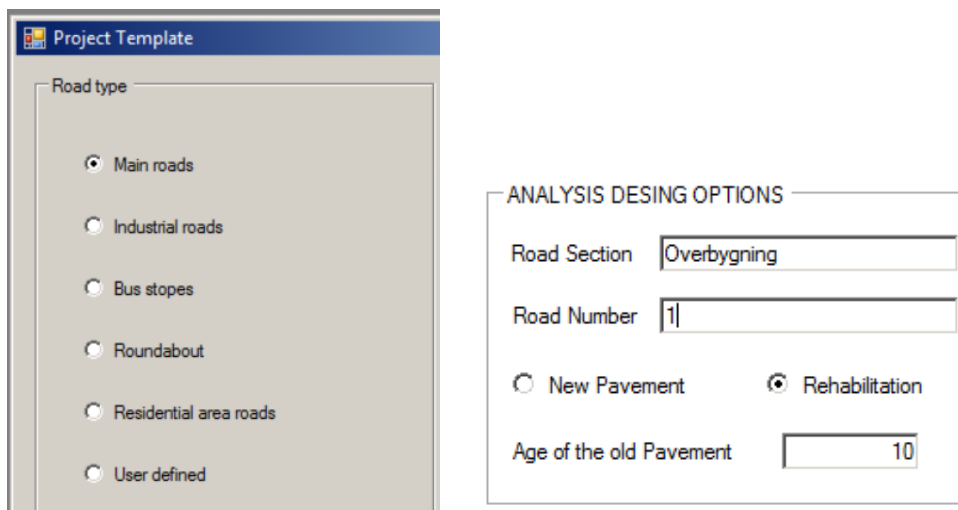
3.1 Modellberegning: ERAPave

For egen produksjon av data ble det valgt å foreta modellberegninger ved bruk av ERAPave PP. Hensikten med modellberegningene var å se på ulike akselgruppers nedbrytende effekt på svak og sterk veg, for deretter å regne om dette til å gjelde de respektive kjøretøyenes nedbrytende effekt i form av spordannelse per tonn nyttelast. På denne måten var det mulig å både vurdere kjøretøyets totale nedbrytende effekt som følge av totalvekt, og de enkelte akselgruppens påvirkning.

Motivasjon for bruk av ERAPave var muligheten til å teste programmet før ferdigstillelse, med håp om å kunne avdekke eventuelle utfordringer/problemer og bidra i utviklingen. Det ble også valgt på grunn av tilgjengelighet. Det understrekes at programmet ikke er ferdig utviklet for norske forhold. Det er på grunn av dette knyttet stor usikkerhet til modellberegningene.

Det ble totalt gjennomført seks beregninger, 2 x 3 stk. Én beregning for hver akselgruppe, på to ulike overbygninger.

Programmets språk er engelsk, alle figurer direkte gjengitt fra programmet er derfor engelsk. Der det ikke er lagt inn selvvalgte verdier, er programmets standardverdier benyttet. I enkelte tilfeller ble det vurdert hensiktsmessig å benytte standardverdier på grunn av begrensninger knyttet til kompetanse.



Figur 3-1 (venstre): Vegtype ved oppstart av ERAPave PP. Skjermbilde fra ERAPave PP.

Figur 3-2 (høyre): Informasjon nytt prosjekt ERAPave PP. Skjermbilde fra ERAPave PP.

I alle beregningen ble det ved oppstart av programmet, valgt hovedveg (*Main roads*) og rehabilitering (*Rehabilitation*) med dekkealder 10 år. Dette er gjengitt i figur 3-1 og 3-2. De fleste veger i Norge har relativt gammelt dekke, og fylkesvegene (som er mest aktuell for åpning) kategoriseres som hovedveg.

3.1.1 Oppbygging – Pavement structure

For å konstruere representative overbygninger, ble det innhentet informasjon fra oppgravingsregisteret i NVDB. Oppgravingsregisteret inneholder data fra prøver tatt på ulike deler av vegnettet i hele Norge. I dette tilfellet ble det hentet ut oppgravingsdata fra fylkesveger i tidligere Hedmark fylke, tatt i tidsrommet 1976 – 2004. Valget om å benytte data fra tidligere Hedmark fylke, begrunnes med tømmertransportens tilstedeværelse og utbredelse i området. Hedmark (nå Innlandet) er et fylke med utbredt tømmer næring. Prøveordning og belastningsforsøk finner også sted her.

Oppgravingsregisteret gir informasjon om materialer brukt på stedet prøven er tatt, antall lag og lagstykkelse. Denne informasjonen ble kategorisert og sortert ved hjelp av Microsoft Excel. Informasjonen ble sortert etter bæreevnegruppe på undergrunn, materialer i overbygning, antall lag og lagstykkelse. Ut ifra forekomst, ble det satt opp to eksempler på vegoverbygninger; en svak overbygning, og en normal/sterk overbygning.

Overbygning 1 er gjengitt i tabell 3-1, og består av et bituminøst dekke, knust fjell, naturgrus og undergrunn av leire/silt. Overbygning 2 har to lag bituminøst materiale, øvrig materialer er identisk (gjengitt i tabell 3-2). Materiale og lagstykkelse er valgt ut fra hyppigste forekomst av informasjon hentet fra oppgravingsregisteret. E-modul er beregnet ved hjelp av formel 2-2 og 2-3, i kombinasjon med verdier fra figur 513.3 s. 231 i N200 (Statens vegvesen, 2014b).

For å oppnå ulik styrke, er det valgt ulike verdier for E-modul i overbygningene. E-modul for leire/silt er valgt med utgangspunkt i figur 513.1 s. 230 i N200 (Statens vegvesen, 2014b), men noe høyere. For tverrkontraksjon og tyngdetetthet er det benyttet verdier basert på erfaring (normalverdier). Overbygningene med tilhørende materialdata er utarbeidet i samråd med Geir Berntsen.

Tabell 3-1: Overbygning 1, svak veg.

Lag	Materiale	Tykkelse (cm)	E-modul (MPa)	Tverrkontraksjon	Tyngdetetthet (kN/m ³)
1	Bituminøse matr.	10	900	0,35	25
2	Knust fjell	15	250	0,35	20
3	Naturgrus	30	90	0,35	19
4	Leire / silt	1E+300	40	0,40	20

Tabell 3-2: Overbygning 2, normal/sterk veg.

Lag	Materiale	Tykkelse (cm)	E-modul (MPa)	Tverrkontraksjon	Tyngdetetthet (kN/m ³)
1	Bituminøse matr. 1	5	3000	0,35	25
2	Bituminøse matr. 2	10	900	0,35	25
3	Knust fjell	15	275	0,35	20
4	Naturgrus	50	110	0,35	19
5	Leire / silt	1E+300	70	0,40	20

For øvrig materialdata ble programmets standardverdier benyttet. Lagene har like verdier for lik type materiale.

3.1.2 Trafikkdata – Traffic data

Trafikkdata er valgt med utgangspunkt i Skjølaas' rapport «Vegslitasje fra tømmervogntog» (2020). Verdier for kontaktradius er generert av ERAPave PP, på bakgrunn av ringtrykk og aksellast. Ringtrykk ble satt til 900 kPa for enkelmonterte hjul, og 800 kPa for tvillingmonterte hjul. Aksellastverdiene som er benyttet er maks tillatt aksellast for de

forskjellige akselgruppene. Dekkavstand gjelder kun for hjul som er tvillingmonterte, da dette er avstanden mellom tvillinghjulene. Her er programmets egen verdi benyttet.

Vegtype ble satt til alternativet mest likt de faktiske forhold for belastningsforsøkene.

Tungtrafikkvandring er et uttrykk for trafikkenes bevegelse på tvers av vegens retning. Også her ble standardverdi benyttet.

Informasjon om årsdøgntrafikk for forsøksrekning benyttet under belastningsforsøk er utgangspunkt for valg av ÅDT. Valgt verdi for ÅDT per felt tar ikke hensyn til lett trafikk, da det var ønskelig å kun vurdere nedbrytning som følge av tungtrafikk. Prosent tungtrafikk ble derfor satt til 100 % og ÅDT per felt er antall tunge kjøretøy. Lastekvivalensfaktor ble satt til 1, og trafikkvekst 0 %. Dimensjoneringsperiode ble satt til 20 år. All trafikkdata er gjengitt i tabell 3-3.

Tabell 3-3: Trafikkdata etter akselgruppe.

		Enkel aksel / enkelmontert	Dobbel aksel / tvillingmontert	Trippel aksel / tvillingmontert
Akselkonfigurasjon	Ringtrykk (kPa)	900,0	800,0	800,0
	Kontaktradius (cm)	5,95	18,92	10,93
	Aksellast (kN)	80,0	180,0	240,0
	Dekkavstand (cm)	-	35	35
	Akselavstand (cm)	-	135	135
	Vegtype	Conventional 3,2	Conventional 3,2	Conventional 3,2
	Tungtrafikkvandring (cm)	21,6	21,6	21,6
Trafikkvolum	ÅDT per felt	20	20	20
	Lastekvivalensfaktor	1	1	1
	Trafikkvekst (%)	0	0	0
	Prosent tungtrafikk (%)	100	100	100
	Dimensjoneringsperiode (år)	20	20	20
	Beregnet ESALs	146000	146000	146000

3.1.3 Klimadata – *Climate data*

Klimadata ble valgt ut ifra målte temperaturer ved målestasjon Roverud i Kongsvinger, Innlandet, i 2018. Målingene er hentet fra Norsk Klimaservicesenter. Middeltemperaturer for den enkelte måned er presentert i tabell 3-4.

Tabell 3-4: Månedlig middeltemperatur ved Roverud målestasjon Innlandet, 2018. Kilde: Norsk Klimaservicesenter, met.no.

Måned	Temperatur (° C)
Jan	-4,1
Feb	-6,3
Mars	-5,1
Apr	4,2
Mai	15,1
Juni	15,9
Juli	20,4
Aug	14,6
Sept	11,2
Okt	5,6
Nov	1,4
Des	-4,4

For valg av dekketemperatur ble verdiene i tabell 3-4 rundet av til nærmeste hele grad, og justert med hensyn til forskjell mellom lufttemperatur og dekketemperatur. Justeringen er foretatt med skjønn, med tanke på snømengde, nedbør og tid på året. Temperatur mellom luft og vegbane vil avvike noe, da lufttemperatur er målt en høyde over vegoverflaten. For overbygning 2, med to lag asfalt, er det antatt at asfaltlag 2 er noe kaldere enn lag 1. Det er derfor 2 °C forskjell i temperatur.

Klimadata for overbygning 1 er gjengitt i tabell 3-5, klimadata for overbygning 2 er gjengitt i tabell 3-6. Verdier for metningsgrad er valgt på bakgrunn av materialenes optimale metningsgrad (Sopt) og periodenes variasjon i nedbør og vannmengde. Metningsgrad er høy i perioder rundt teleløsning, og noe lavere i sommerhalvåret og de kaldeste vintermånedene.

Tabell 3-5: Klimadata overbygning 1.

Periode	Antall dager	Temperatur (°C)		Metningsgrad (%)	
		Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4
1	31	-5	65	54	60
2	28	-5	65	54	60
3	31	5	75	65	70
4	30	5	75	65	70
5	31	15	68	54	63
6	30	15	68	54	63
7	31	15	65	52	58
8	31	15	65	52	58
9	30	5	68	58	65
10	31	5	68	58	65
11	30	0	65	54	60
12	31	0	65	54	60

Tabell 3-6: Klimadata overbygning 2.

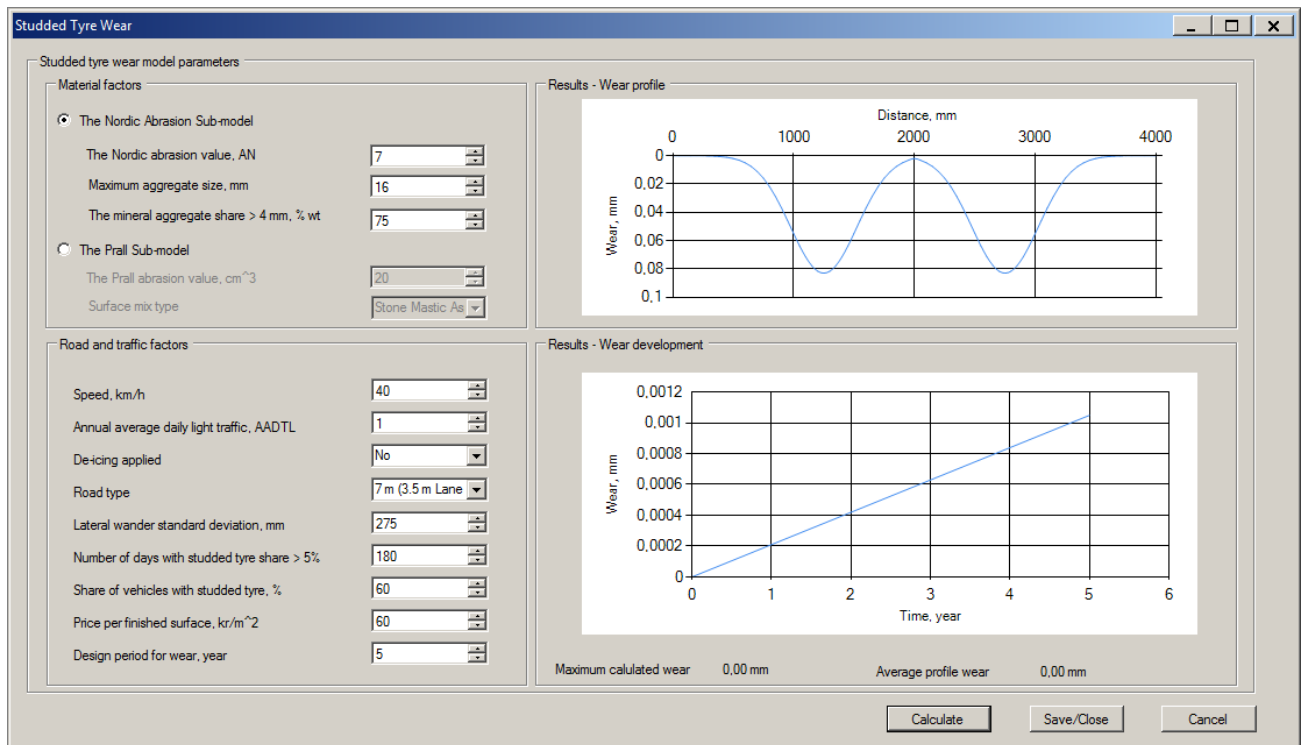
Periode	Antall dager	Temperatur (°C)		Metningsgrad (%)		
		Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5
1	31	-5	-7	65	54	60
2	28	-5	-7	65	54	60
3	31	5	3	75	65	70
4	30	5	3	75	65	70
5	31	15	13	68	54	63
6	30	15	13	68	54	63
7	31	15	13	65	52	58
8	31	15	13	65	52	58
9	30	5	3	68	58	65
10	31	5	3	68	58	65
11	30	0	-2	65	54	60
12	31	0	-2	65	54	60

3.1.4 Sporutvikling – Rutting

I denne oppgaven ble det valgt å benytte deformasjonsmodell 1 for bituminøse lag, og modell 4 for resterende lag. Modell 1 tar hensyn til bitumeninnhold, modell 4 gjelder for ubundne materialer utsatt for syklisk last av varierende størrelse (Ahmed & Erlingsson, 2013).

3.1.5 Utmatting og piggdekkslitasje – Fatigue cracking og studded tyre wear

Det valgt å ikke fokusere på utmatting og piggdekkslitasje, det er derfor også her benyttet standardverdier generert av programmet. Det var nødvendig å inkludere inngangsdata under alle faner for å gjennomføre beregningene.



Figur 3-3: Data piggdekkslitasje. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

Figur 3-3 viser data for piggdekkslitasje. Her er alle verdier programmets egne, bortsett fra vegtype (road type) og hastighet. Vegtype ble satt til 7m, beste alternativ med tanke på de faktiske forhold. Hastighet ble satt til 40 km/t, noe lavere enn normal fartsgrense. Her er det tatt utgangspunkt i farten kjøretøyene faktisk greide å holde under belastningsforsøkene.

3.2 Belastningsforsøk

Forsøksplanlegging direkte knyttet til gjennomføring av prøveordning og belastningsforsøk er et samarbeid mellom Statens vegvesen i dialog med berørte vegeiere (Innlandet fylkeskommune og øvrige kommuner), Norges Skogeierforbund og Norges Lastebileierforbund. Helhetlig ansvar er hos Statens vegvesen.

Det ble vedtatt å gjennomføre to belastningsforsøk, heretter kalt forsøk 1 og forsøk 2. Forsøk 1 ble gjennomført under gunstige forhold, på sterk veg. Forsøk 2 ble gjennomført under ugunstige forhold, på svak veg. Her er bæreevne brukt for å bestemme om vegen er sterk eller svak. God bæreevne tilsvarer sterk veg, dårlig bæreevne tilsvarer svak veg. Med dette som utgangspunkt ble september 2020 valgt for gjennomføring av forsøk 1, hvor vær og føre tilsier at vegen normalt har god bæreevne. Teleløsningsperioden i april 2021 ble valgt for

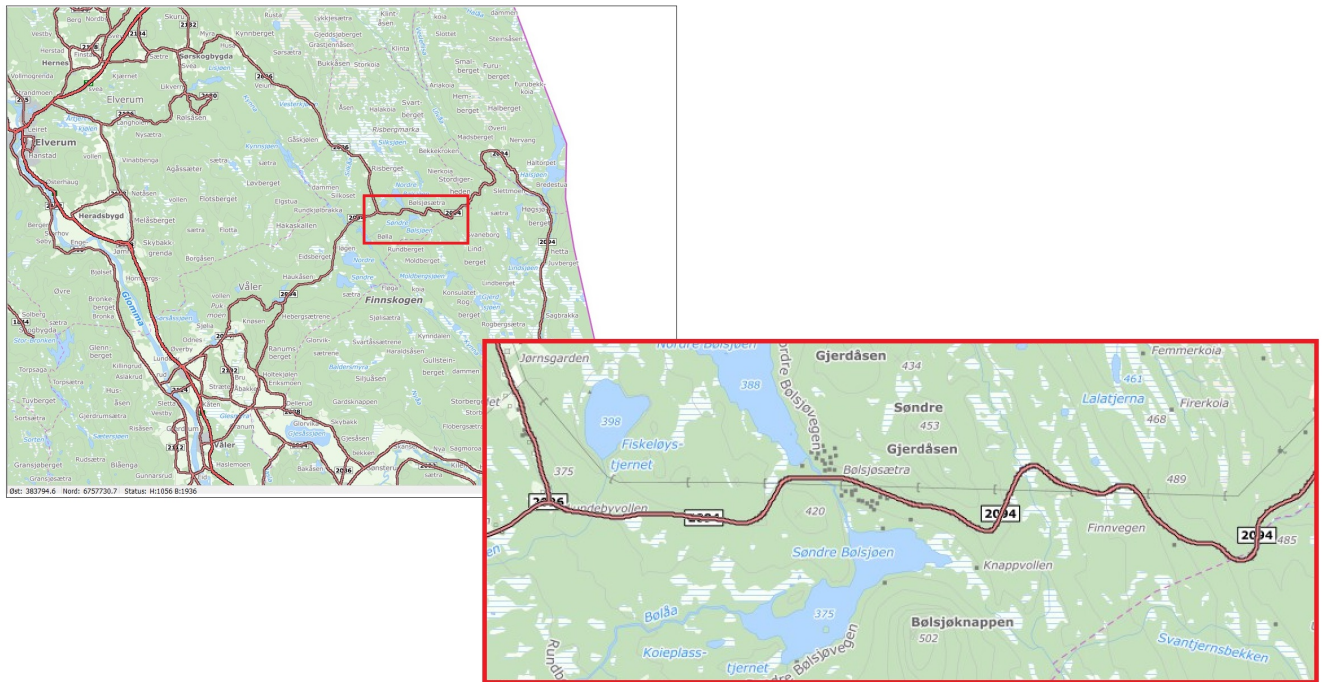
gjennomføring av forsøk 2. I teleløsningsperioden er veggen normalt svakere og har dårlig bæreevne som følge av økt vanninnhold.

Valg av metode og gjennomføring av forsøkene begrunnes med forsøkene hensikt; å sammenlikne vegens nedbrytning fra tømmervogntog med totalvekt 60 tonn, med tømmervogntog med totalvekt 74 tonn. Samme vegstrekning ble trafikkert av to konvoier med kjøretøy av ulik totalvekt, hver konvoi i hvert sitt felt. Tømmervogntog med totalvekt 60 tonn i det ene feltet, og tømmervogntog med totalvekt 74 tonn i det andre. Vogntogene benyttet samme felt i begge retninger. Vegens tilstand ble målt før, under og etter forsøkene. Ved å gjennomføre to forsøk på veg av ulik styrke, var det mulig å – i tillegg til å sammenlikne nedbrytning som følge av totalvekt – se kjøretøyenes påvirkning ved ulike bæreevneforhold. Forsøk 2 ble også benyttet til å teste om vogntogene bidrar til økt pumpeeffekt.

Begge forsøkene fant sted på en del av fylkesveg 2094 ved Lundebyvollen i Innlandet fylke. Det ble benyttet samme forsøksstrekning i begge forsøk. Forsøksstrekningens spesifikasjoner er gjengitt i tabell 3-9; asfalttype, alder på vegdekke, vegbredde, trafikkmengde og lengde.

Tabell 3-7: Spesifikasjoner for forsøksstrekning (Berntsen, 2021).

Forsøksstrekning	
Vegident	fv2094, S4D1, m 0-3400
Vegdekketype	Ag 16
År siste legging av vegdekke	2014
Gjennomsnittlig dekkebredde (m)	5,5
ÅDT	125
Ca. total lengde (m)	3400



Figur 3-4: Kart med forstørret utsnitt av forsøksstrekning. Skjerm bilde fra NVDB.

Forsøksstrekningen strakte seg fra et vegkryss ved Lundebyvollen og østover på Gravbergsvegen. Figur 3-4 viser et detaljert kartutsnitt av den aktuelle vegstrekningen.

Kjøretøyene som deltok var delt inn i to konvoier, avhengig av totalvekt. I hvert av forsøkene deltok totalt ni tømmervogntog. Konvoi 1 bestod av tømmervogntog med ni aksler og totalvekt 60 tonn. Disse kjøretøyene trafikkerte felt 1. Konvoi 2 bestod av tømmervogntog med sju og aksler totalvekt 74 tonn. Disse kjøretøyene trafikkerte felt 2.

Forsøk 1 startet morgenen 22. september 2020 og ble avsluttet ettermiddagen 23. september. I løpet av denne tidsperioden trafikkerte kjøretøyene hvert sitt felt ved å kjøre fram og tilbake så mange ganger som mulig. Spesifikasjoner for deltakende kjøretøy er gjengitt i tabell 3-8. Gjennomsnittlig nyttelast for totalvekt 60 tonn var 38,3 tonn, og tilsvarende 50,0 tonn for vogntogene med totalvekt 74 tonn. De tyngste kjøretøyene hadde i gjennomsnitt 4,5 % mer nyttelast enn de lette kjøretøyene. På grunn av manglende drivstoff på et av kjøretøyene ble det noe forskjell i antall passeringer.

Tabell 3-8: Kjøretøyeigenschaften forsøk 1.

	Kjøretøy 60 tonn (konvoi 1)	Kjøretøy 74 tonn (konvoi 2)
Antall kjøretøy	5	4
Gjennomsnittlig nyttelast (tonn)	38,3	50,0
Total nyttelast (tonn)	191,4	200,1
Antall passeringer	36,0	36,0
Totalt antall kjøretøypasseringer	180,0	139,0
Kjørebane	Felt 1	Felt 2
Totalt antall tonn transportert	38,3 * 180 = 6889	50,0 * 139 = 6950

Forsøk 2 ble gjennomført 19. – 20. april 2021. Kjøretøyspesifikasjoner for deltakende kjøretøyene er gjengitt i tabell 3-9. Det er operert med tilnærmet lik gjennomsnittlig nyttelast som i forsøk 1; 38,0 tonn for kjøretøy med totalvekt 60 tonn, og 50,0 tonn for kjøretøy med totalvekt 74 tonn. På grunn av hurtig skadeutvikling ble det gjennomført betydelig færre passeringer i forsøk 2. Kjøretøyene med totalvekt 60 tonn hadde også to passeringer mer enn kjøretøyene med totalvekt 74 tonn.

Tabell 3-9: Kjøretøyeigenschaften forsøk 2.

	Kjøretøy 60 tonn (konvoi 1)	Kjøretøy 74 tonn (konvoi 2)
Antall kjøretøy	5	4
Gjennomsnittlig nyttelast (tonn)	38,0	50,0
Total nyttelast (tonn)	190,0	200,0
Antall passeringer	6,0	4,0
Totalt antall kjøretøypasseringer	30,0	16,0
Kjørebane	Felt 1	Felt 2
Totalt antall tonn transportert	38,0 * 30 = 1140	50,0 * 16 = 800



Figur 3-5 og figur 3-6: Deltakende tømmervogntog forsøk 2, totalvekt 60 tonn. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.



Figur 3-7 og figur 3-8: Deltakende tømmervogntog forsøk 2, totalvekt 74 tonn. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.

Figur 3-5 og 3-6 viser et tømmervogntog med totalvekt 60 tonn som deltok på forsøk 2. Figur 3-7 og 3-8 viser tilsvarende deltakende tømmervogntog med totalvekt 74 tonn.

Forsøk 1 ble gjennomført før offisiell oppstart av masteroppgaven, mens forsøk 2 ble gjennomført mot slutten av arbeidet med oppgaven. Gjennomføringen av forsøkene er tilstrebet å være så identisk som mulig. I begge forsøkene ble det foretatt måling av vegens bæreevne og tilstandsutvikling. I forsøk 2 ble det i tillegg benyttet georadar for kartlegging av vanninnhold og pumpeeffekt. For måling av bæreevne ble det brukt fallodd (FWD), og for måling av tilstandsutvikling ble utstyr av typen ViaPPS benyttet. Alle målingene ble utført av fagpersonell fra egen avdeling i Statens vegvesen, Drift og Vedlikehold.

For å hindre stor forskjell i total belastning, var det ønskelig å holde oversikt over antall passeringer i hvert forsøk, og tilnærmet lik kjørehastighet på kjøretøyene.

En hurtigere skadeutvikling enn antatt førte til at ble forsøk 2 avbrutt tidligere enn planlagt. Skadene som oppstod gjorde det uforsvarlig å fortsette videre gjennomføring.

3.2.1 Bæreevne

Vegens bæreevne ble målt første gang i teleløsning 15.04.2020, deretter gjentatt før og etter begge belastningsforsøkene. Målingene ble utført av fagressurs Drift- og Vedlikehold (DoV) i Statens vegvesen.

Vegdekket ble påført en last på 50 kN, som tilsvarer en aksellast på 50 tonn. Alle målinger ble foretatt i vegens lengderetning, hver 50. meter. Felt 1 ble målt først, ved strekningens startpunkt tilsvarende meter 0. Felt 2 ble målt i motsatt retning, med en forskyvning på 25 m i forhold til målingene i felt 1.

3.2.2 Tilstandsutvikling

Vegens tilstand ble målt ved hjelp av ViaPPS-utstyr i regi av Geomatikk DoV i SVV. Målingene ble foretatt hver 10. meter.

3.2.3 Georadar

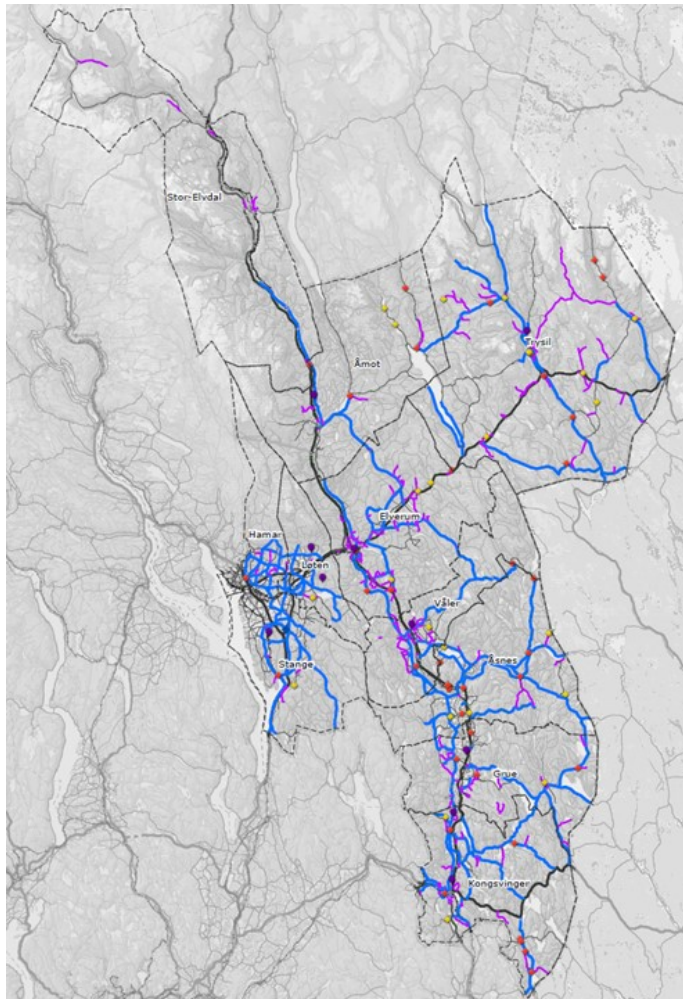
Under forsøk 2 ble det i tillegg til tilstandsutvikling, foretatt målinger med georadar. Det ble benyttet to antenner; en med frekvens 400 MHz, og en med frekvens 1 GHz. Hensikten var å se på målingenes amplitude og eventuell endring i amplitude. Amplituden uttrykker vegens vanninnhold, og endring i amplitude indikerer endring i vanninnhold. Dersom målingene viser økt amplitude, er dette et tegn på økt vanninnhold som følge av belastning og økt poretrykk. Georadar ble derfor brukt med et mål om å påvise pumpeeffekt.

Målinger ble sent til fagpersonell i Finland for analyse, da de per dags dato har størst kunnskap om pumpeeffekten.

3.3 Prøveordning

Prøveordningens start er planlagt til 1. juli 2021, med en varighet på 3–5 år. Deltakerne kan kjøre i 5 år med opptil 74 tonn totalvekt. Deltakerne i prøveordningen vil få dispensasjon til å trafikkere et definert vegnett i 11 kommuner i Innlandet fylke. Innlandet ble valgt som

lokasjon for belastningsforsøk og prøveordning på bakgrunn av områdets sentrale rolle som skogfylke, og den politiske viljen til gjennomføring av prosjektet (Statens vegvesen, 2021b).



Figur 3-9: Oversiktsbilde deltakende kommuner prøveordning. Kilde: Statens vegvesen.

De aktuelle kommunene som inngår i prøveordningen er Kongsvinger, Grue, Åsnes, Våler, Elverum, Trysil, Åmot, Stor-Elvdal, Løten, Hamar og Stange. Figur 3-9 viser en oversikt over de nevnte kommunene og aktuelt vegnett. Følgende vogntogkombinasjoner og totalvekter gjelder:

- 3-akslet bil og 5-akslet tilhenger, 65 tonn
- 4-akslet bil og 4-akslet tilhenger, 68 tonn
- 4-akslet bil og 5 akslet tilhenger, 74 tonn

I tillegg er det er krav om tvillingmonterte hjul på alle aksler som ikke er styrende, og alle deltakerne må stille med et referansekjøretøy på 60 tonn. Dersom nødvendig skal årlige oppsummeringer og justeringer finne sted.

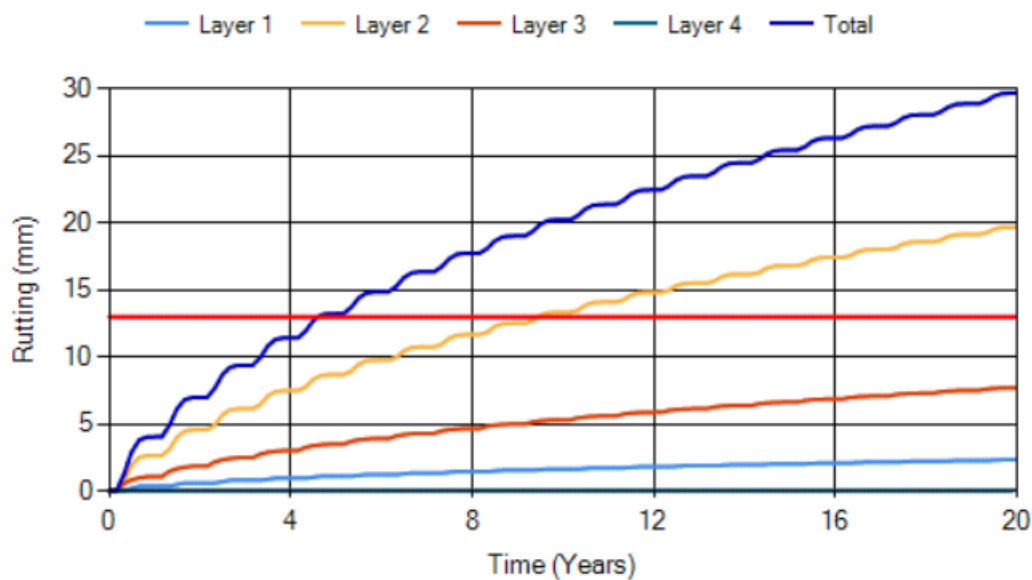
Det helhetlige ansvaret for gjennomføringen av prøveordningen og tilknyttede aktiviteter, ligger hos Statens vegvesen. Prøveordningen gjennomføres i samarbeid med Norges Skogeierforbund og Innlandet fylkeskommune, i dialog med involverte kommuner og Norges Lastebileier-forbund.

Endelig oversikt over deltakere og kjøretøy er per juni 2021 ikke tilgjengelig.

4 Resultater

4.1 Modellberegning: ERAPave

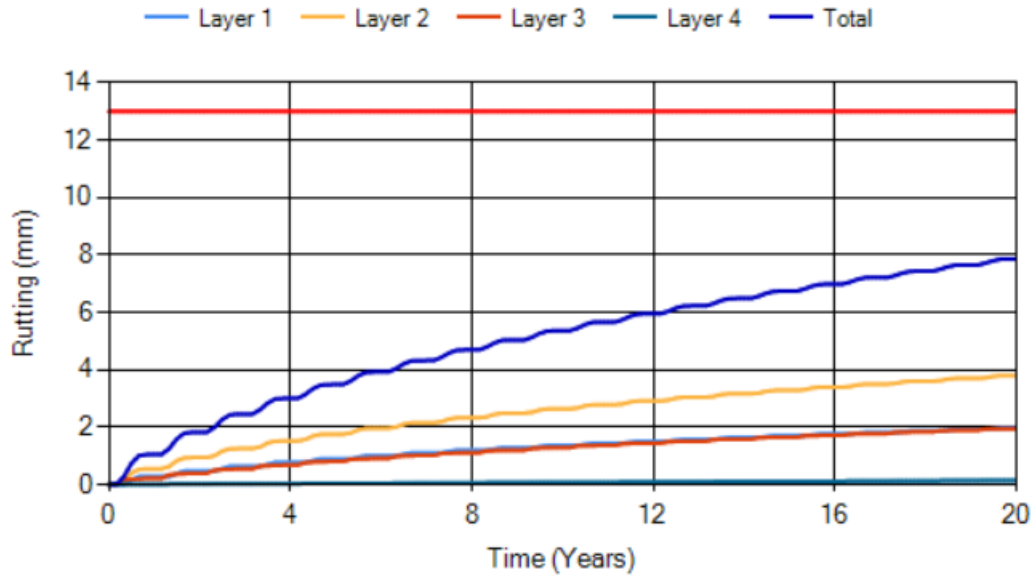
4.1.1 Overbygning 1: svak



Figur 4-1: Spordannelse for enkel aksel med enkelmonterte hjul, overbygning 1. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

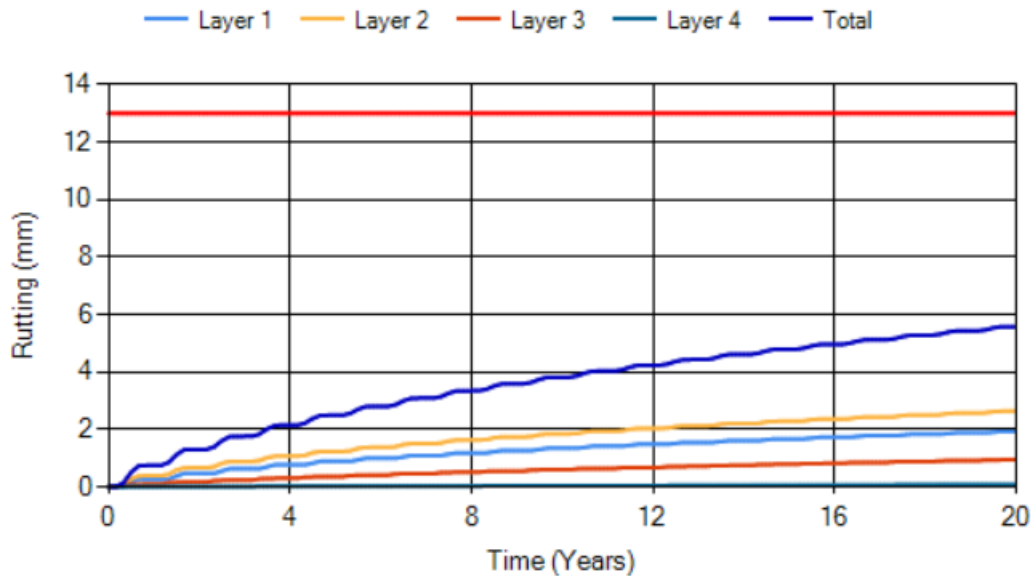
Figur 4-1 viser spordannelse for enkel aksel med enkelmontert hjul på overbygning 1. Spordybde er angitt i mm. Den røde horisontale linja angir maksimalt tillatt/akseptert spordannelse for en dimensjoneringsperiode på 20 år, som er 13 mm. Figuren viser at total spordannelse etter 20 år er omtrent 30 mm. Spesielt lag 2 (gul linje) bidrar negativt i den totale spordannelsen, som overgår maksimal tillatt spordannelse etter ca. fem år. Total spordannelse etter 10 år er 20 mm.

De hakkete linjene illustrerer vegens varierende bæreevne som følge av variasjon i vær og klima (fryse- og tineperioder).



Figur 4-2: Spordannelse for dobbel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 1. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

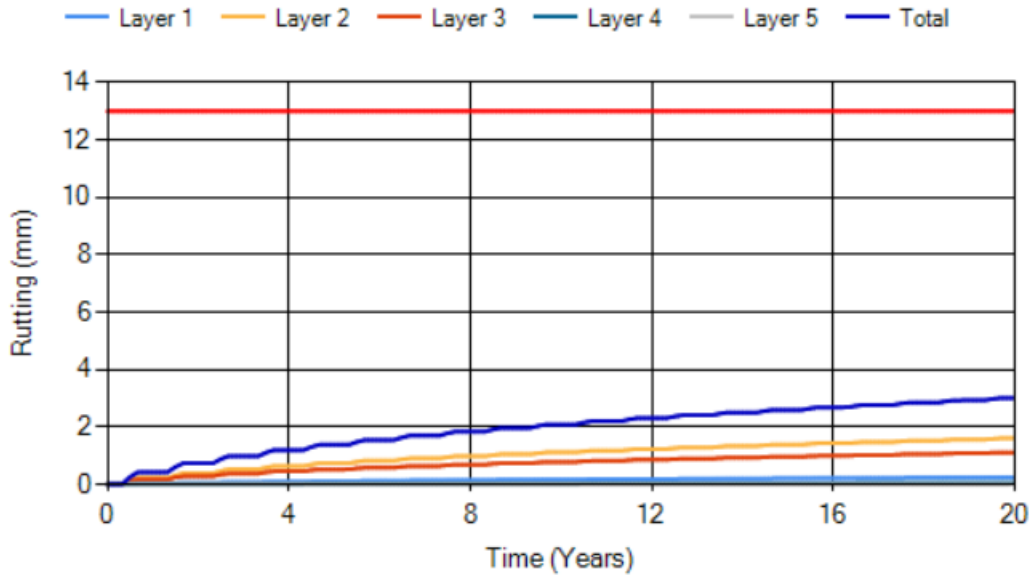
Figur 4-2 viser sporutvikling for dobbel aksel med tvillingmonterte hjul på overbygning 1. Her er alle lag under maksimalt tillatt spordannelse. Total spordybde etter 20 år er ca. 8 mm. Total spordannelse etter 10 år er omtrent 5 mm.



Figur 4-3: Spordannelse for trippel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 1.. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

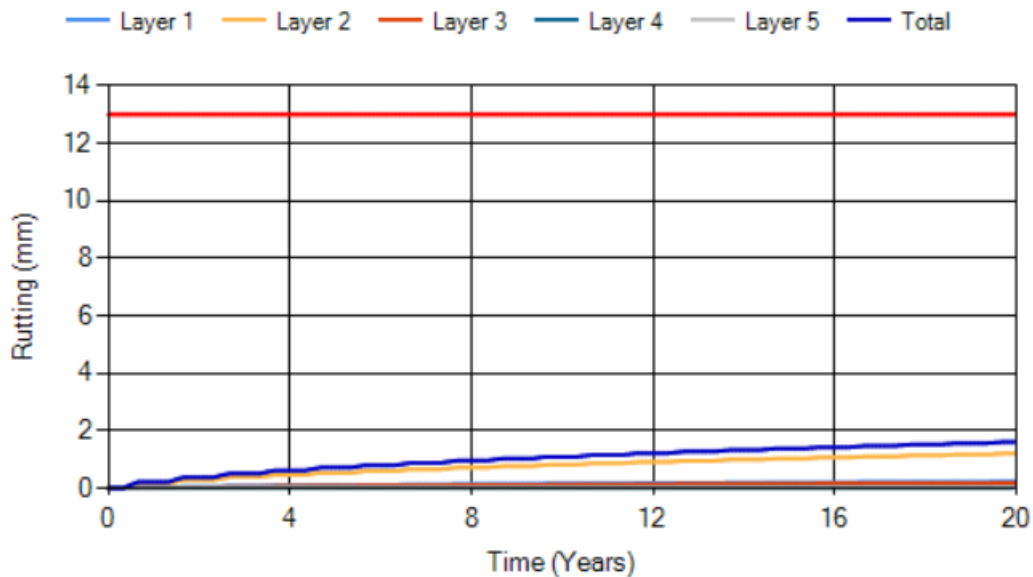
Figur 4-3 viser sporutvikling for trippel aksel med tvillingmonterte hjul på overbygning 1. Total spordybde etter 20 år er omtrent 5,5 mm, noe lavere enn dobbel aksel. Etter 10 år er total spordannelse ca. 4 mm.

4.1.2 Overbygning 2: normal/sterk



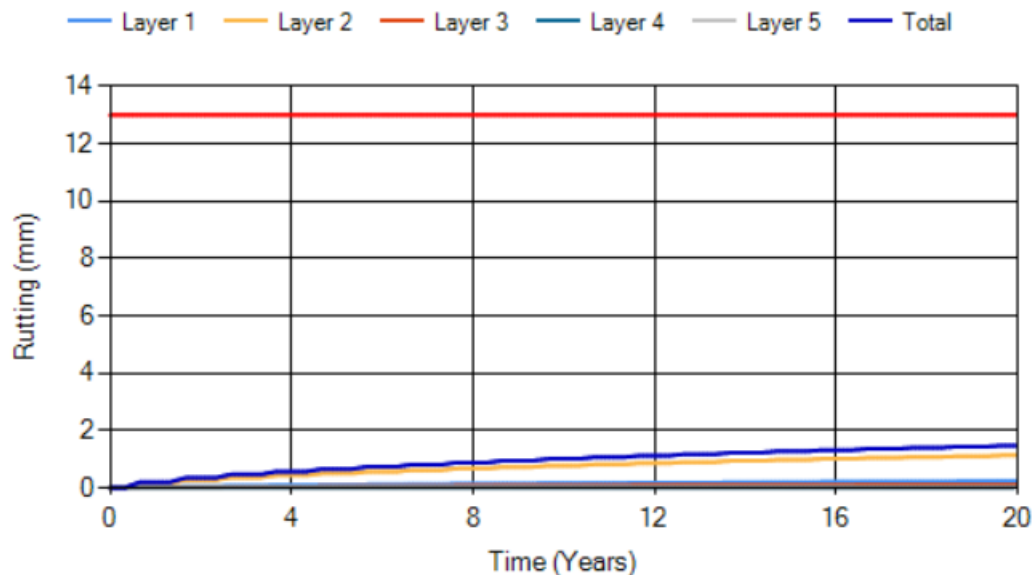
Figur 4-4: Spordannelse for enkel aksel med enkelmonterte hjul, overbygning 2. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

Figur 4-4 viser spordannelse for enkel aksel med enkelmontert hjul på overbygning 2. Etter 20 år er total spordannelse ca. 3 mm, 10 mm mindre enn akseptabel grense. Total spordannelse etter 10 år er 2 mm.



Figur 4-5: Spordannelse for dobbel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 2. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

Figur 4-5 viser spordannelse for dobbel aksel med tvillingmonterte hjul på overbygning 2. Total spordannelse etter 20 år er omtrent 1,8 mm. For halv periode, 10 år, er total spordannelse 1 mm.



Figur 4-6: Spordannelse for trippel aksel med tvillingmonterte hjul, overbygning 2. Skjerm bilde fra ERAPave PP.

Figur 4-6 viser spordannelse for trippel aksel med tvillingmonterte hjul. Total spordannelse etter 20 år er omtrent 1,5 mm, noe mindre enn for dobbel aksel. Det er ca. halvparten av beregnet spordannelse for enkel aksel med enkelmontert hjul på samme overbygning. Total spordannelse etter 10 år er 1 mm.

Det er bemerkelsesverdig at beregnet spordannelse for begge overbygningene reduseres ved økende antall aksler og bruk av tvillingmonterte hjul. Med hensyn til akselgruppe og overbygning er det klart at enkel aksel med enkelmontert hjul gir størst spordannelse, spesielt på overbygning 1.

4.1.3 Totalt

Under er resultater fra modellberegningene avhengig av akselgruppe og overbygning presentert i egen tabell. Verdiene er beregnet på bakgrunn av figur 4-1 til 4-6. Tabellen sammenlikner akselgruppens nedbrytende effekt angitt i mm spordannelse pr. år. Spordannelse for periodens første ti år er ekskludert. Dette for å utelukke programmets

eventuelle hensyn til etterkomprimering i vegens første leveår, da ERAPave hovedsakelig brukes til beregning av nye veger.

Av tabell 4-1 kommer det fram at enkel aksel med enkelmontert hjul bidrar til størst nedbrytning, for begge overbygningene. Dobbel- og trippel aksler med tvillingmonterte hjul er vennligere. For overbygning 1 vil enkel aksel med enkelmontert hjul bidra til 70 % mer spordannelse enn dobbel aksel, og 85 % mer enn trippel aksel, med tvillingmonterte hjul. For overbygning 2 vil enkel aksel med enkelmontert hjul bidra til 20 % mer spordannelse enn dobbel aksel, og 50 % mer enn trippel aksel, med tvillingmonterte hjul. Ifølge beregningene vil trippel aksel med tvillingmonterte hjul gi minst spordannelse for begge overbygningene.

Tabell 4-1: Spordannelse avhengig av akselgruppe.

	Overbygning 1 (mm / år)	Overbygning 2 (mm / år)
Enkel aksel / enkelmontert	1,00	0,10
Dobbel aksel / tvillingmontert	0,30	0,08
Trippel aksel / tvillingmontert	0,15	0,05

Basert på spordannelse pr. akselgruppe fra tabell 4-1 og kjøretøyenes respektive akselkonfigurasjon, er spordannelse for de ulike totalvektene summert og presentert i tabell 4-2. Tabellen viser spordannelse pr. år for hvert kjøretøy og hvert tonn nyttelast, avhengig av totalvekt. For overbygning 1 er totalvekt 74 tonn verst, med 44,7 % mer spordannelse pr. kjøretøy pr. år, i forhold til totalvekt 60 tonn. Et kjøretøy med totalvekt 74 tonn gir også 10 % mer spordannelse pr. år for hvert tonn nyttelast. For overbygning 2 vil totalvekt 74 tonn gi 20,6 % mer spordannelse pr. år, enn totalvekt 60 tonn. Når det gjelder spordannelse pr. tonn nyttelast, vil et kjøretøy med totalvekt 74 tonn gi 8,4 % mindre spordannelse pr. år, sammenliknet med et kjøretøy med totalvekt 60 tonn.

Tabell 4-2: Spordannelse avhengig av totalvekt.

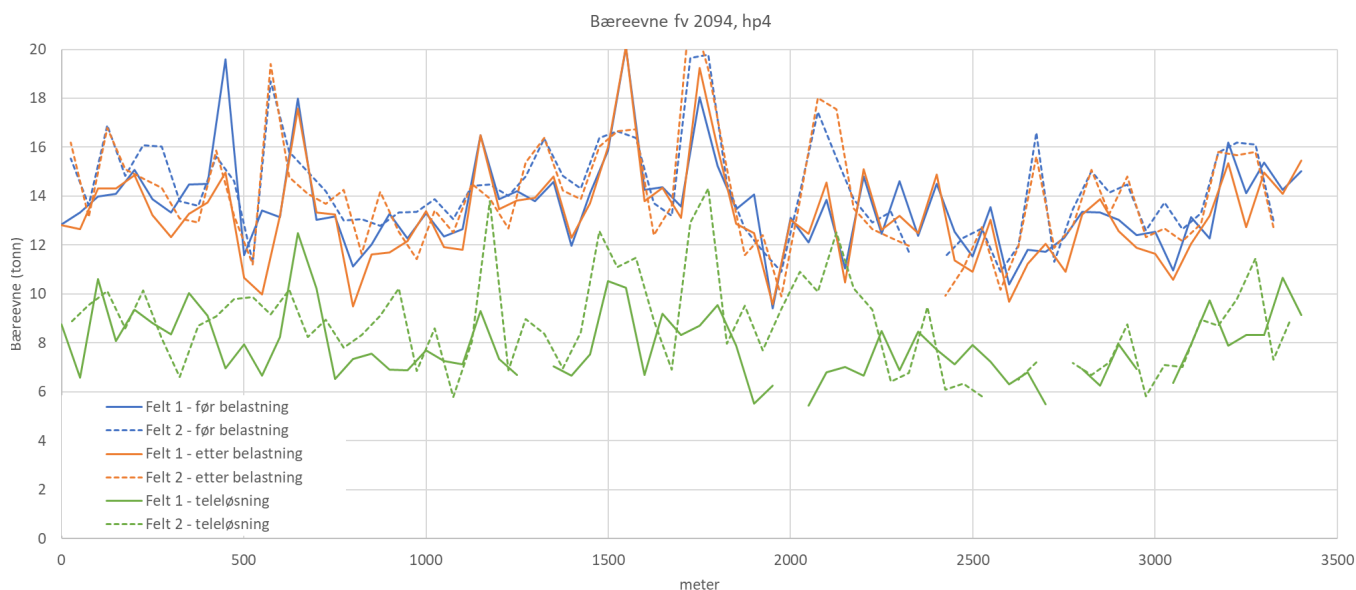
		60 tonn	74 tonn
Nyttelast pr kjøretøy (tonn)		38,0	50,0
Overbygning 1	Spordannelse pr. kjøretøy pr. år (mm)	1,9000	2,7500
	Spordannelse pr. tonn nyttelast (mm)	0,0500	0,0550
Overbygning 2	Spordannelse pr. kjøretøy pr. år (mm)	0,3400	0,4100
	Spordannelse pr. tonn nyttelast (mm)	0,0089	0,0082

4.2 Forsøk 1 – sterk veg

Resultater fra forsøk 1 (september 2020) følger.

4.2.1 Bæreevne

Bæreevнемålinger er kun gyldige for tidspunktet målingene er utført, da bæreevne vil variere med temperatur i asfaltdekket, fuktinnhold i vegoverbygning og undergrunn.



Figur 4-7: Bæreevne forsøk 1 (Berntsen, 2021).

Figur 4-7 viser kontinuerlig målt bæreevne over forsøksstrekningen i forbindelse med forsøk 1. Figuren er en god illustrasjon på variasjon i bæreevne over en kort vegstrekning. Heltrukket blå og oransje linje er bæreevne for felt 1, henholdsvis før og etter belastning. De stiplede linjene viser tilsvarende for felt 2. Målingene viser at det jevnt over er liten forskjell i bæreevne før og etter belastning. De grønne linjene representerer målt bæreevne ved teleløsning våren 2020, før forsøk 1. Bæreevne under teleløsning er tydelig lavere for begge felt. Ut ifra dette er det rimelig å anta betydelig skadeutvikling ved gjennomføring av forsøk 2.

Tabell 4-3 viser målt bæreevne (i tonn) under forsøk 1. For begge felt er både gjennomsnittlig bæreevne og 90 % - verdien noe lavere etter belastning. Bæreevne for teleløsning er bemerkelsesverdig lavere også her.

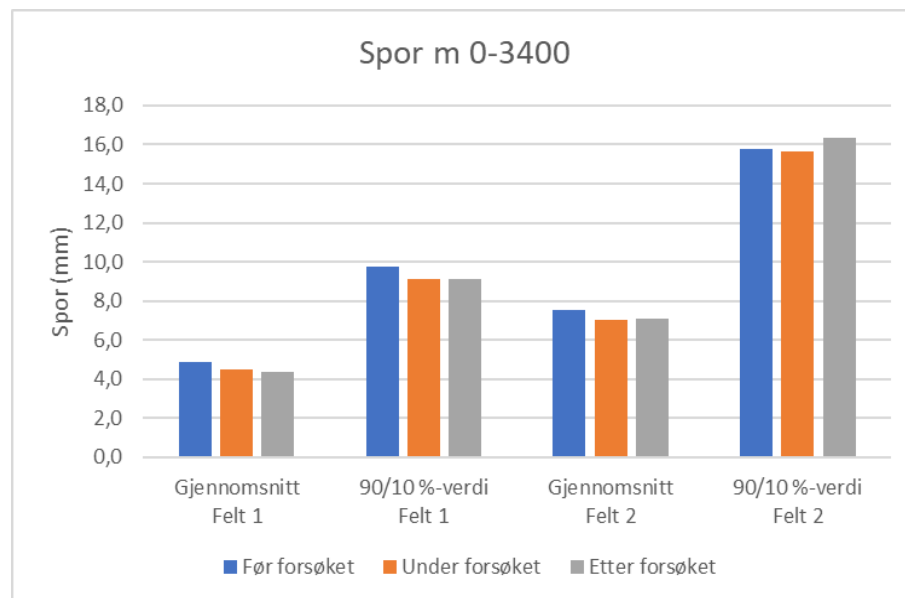
Tabell 4-3: Bæreevne forsøk 1 (Berntsen, 2021).

Felt	Gjennomsnittlig bæreevne (tonn)			90 %-verdi (tonn)		
	Teleløsn.	Før belastning	Etter belastning	Teleløsn.	Før belastning	Etter belastning
1	7,9	13,6	13,2	6,4	11,7	10,9
2	8,8	14,3	14,0	6,5	11,9	11,6

4.2.2 Tilstandsutvikling

Vegtilstand målt i form av spor, jevnhet og tverrfall.

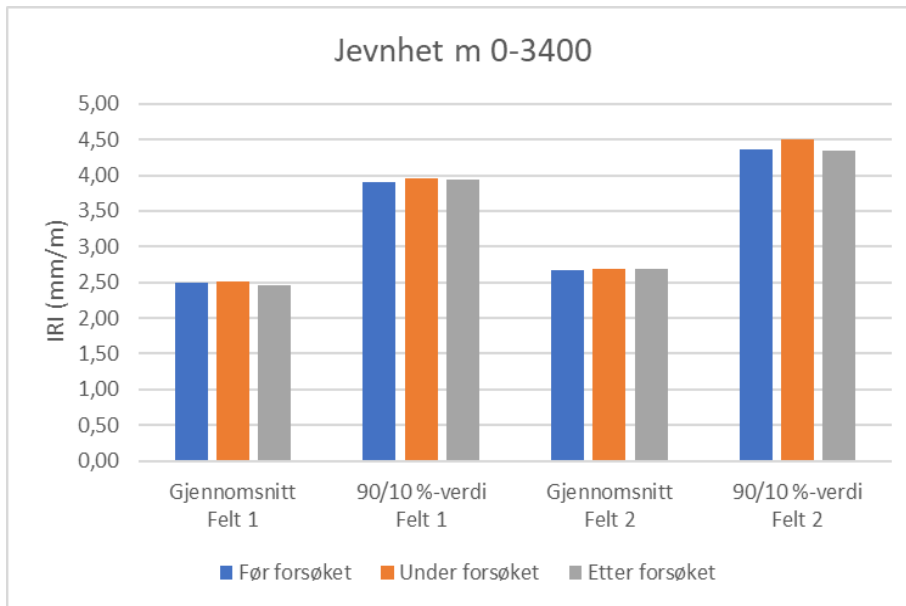
Spor



Figur 4-8: Sporutvikling forsøk 1 (Berntsen, 2021).

Sporutvikling målt under forsøk 1 er framstilt i figur 4-8. Det ble foretatt målinger før, under og etter belastning. For begge felt er gjennomsnittverdien lavere etter forsøk, enn før. Dette gjelder også 90/10 % - verdien for felt 1. Tilsvarende verdi for felt 2 er derimot høyere etter belastning, enn før.

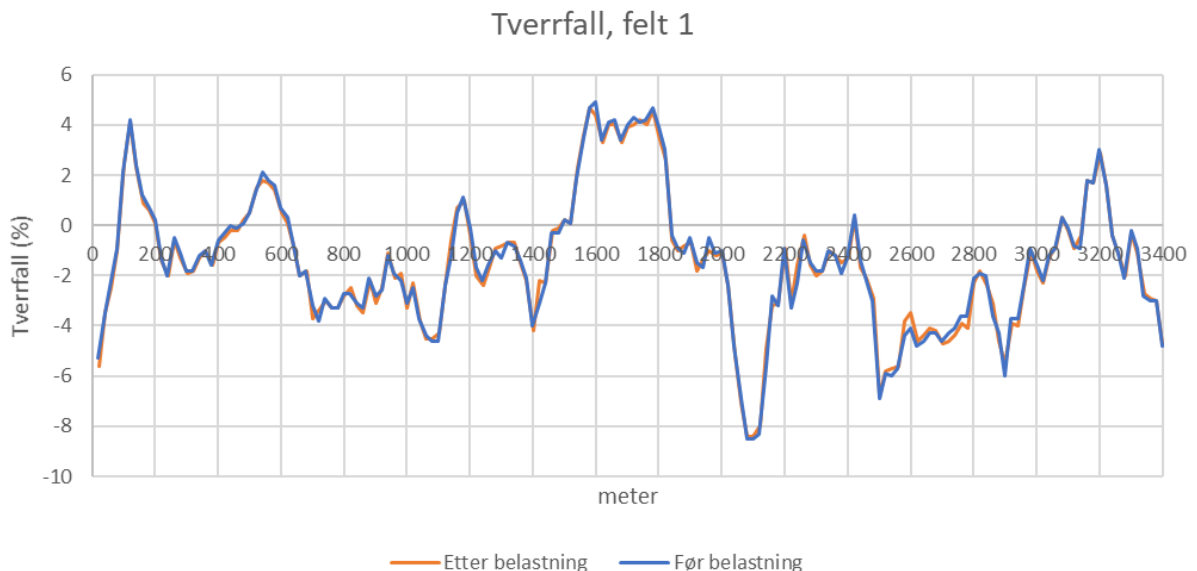
Jevnhet



Figur 4-9: Jevnhetsutvikling forsøk 1 (Berntsen, 2021).

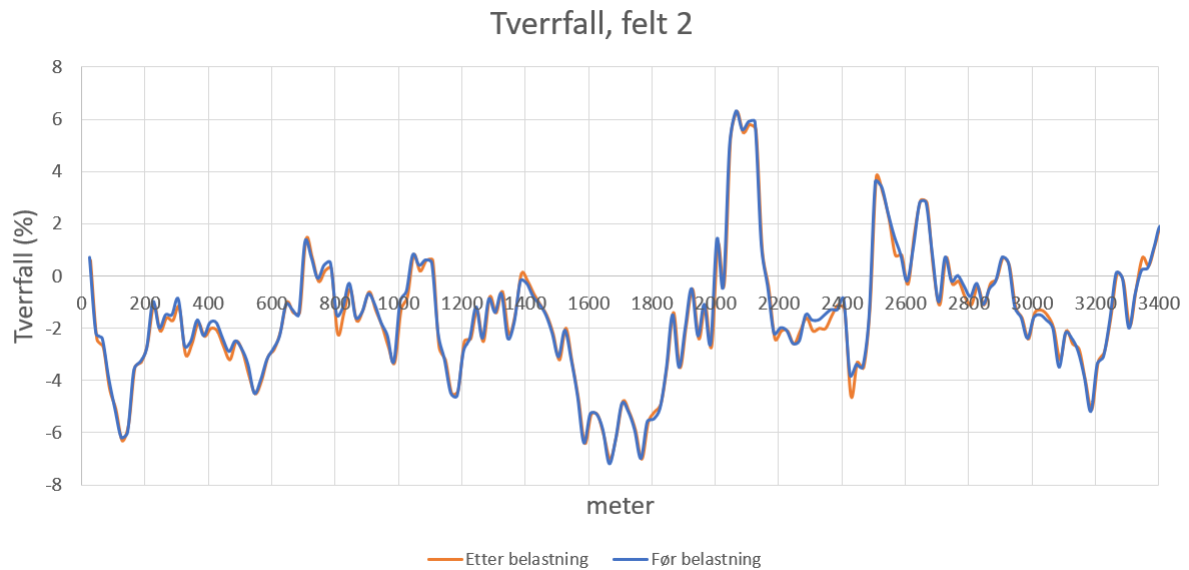
Jevnhet uttrykt ved IRI (*International roughness index*) fra forsøk 1 kommer fram av figur 4-9. Jevnhet er angitt i mm/m. Lavt tall indikerer jevn veg. Verdiene for felt 2 er noe høyere sammenliknet med felt 1, både gjennomsnittsverdi og 90/10 % - verdi.

Tverrfall



Figur 4-10: Tverrfall felt 1, forsøk 1 (Berntsen, 2021).

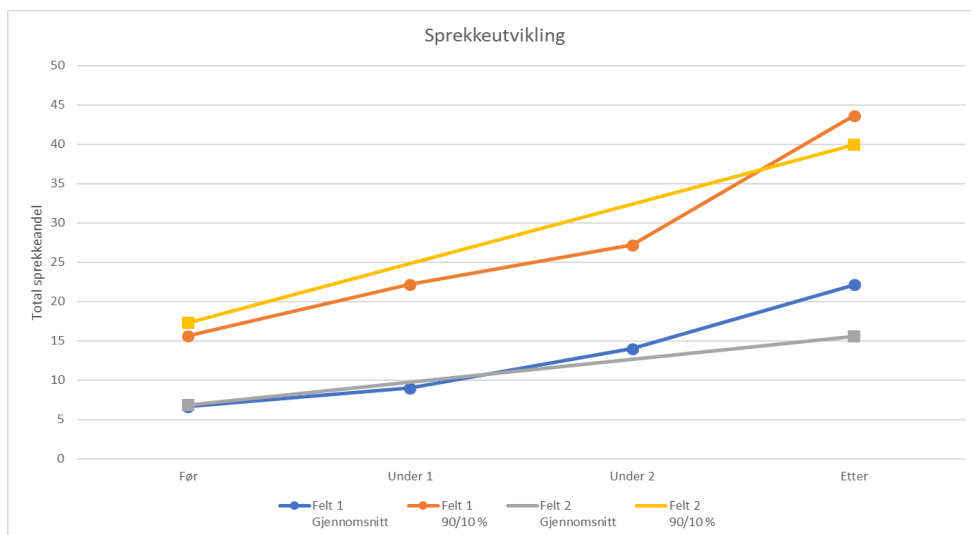
Figur 4-10 viser målt tverrfall for felt 1, forsøk 1. Det er tilnærmet null forskjell mellom målingene før og etter belastning.



Figur 4-11: Tverrfall felt 2, forsøk 1.

Figur 4-11 viser målt tverrfall for felt 2, forsøk 1. Også her er forskjellen mellom målingene før og etter belastning minimal. Ved sammenlikning av figur 4-10 og 4-11 er det mulig å se antydning til noen flere forskjeller for felt 2, enn for felt 1.

Sprekkutvikling



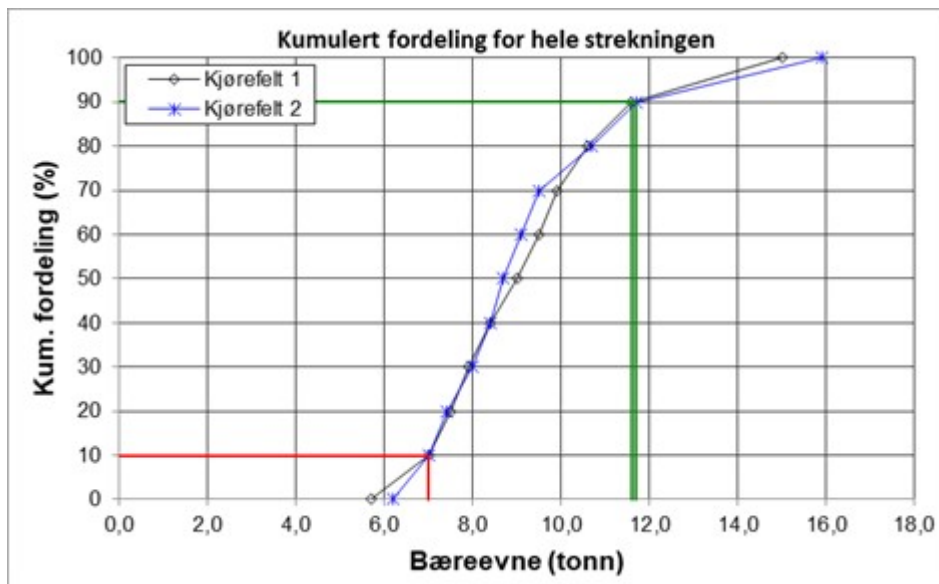
Figur 4-12: Sprekkutvikling forsøk 1 (Berntsen, 2021).

Figur 4-12 viser sprekkutvikling forsøk 1. Det er noe større sprekkutvikling for felt 1, sammenliknet med felt 2. Dette gjelder både gjennomsnitt og 90/10 % - verdien. Forskjellen mellom feltene er relativt liten.

4.3 Forsøk 2 – svak veg

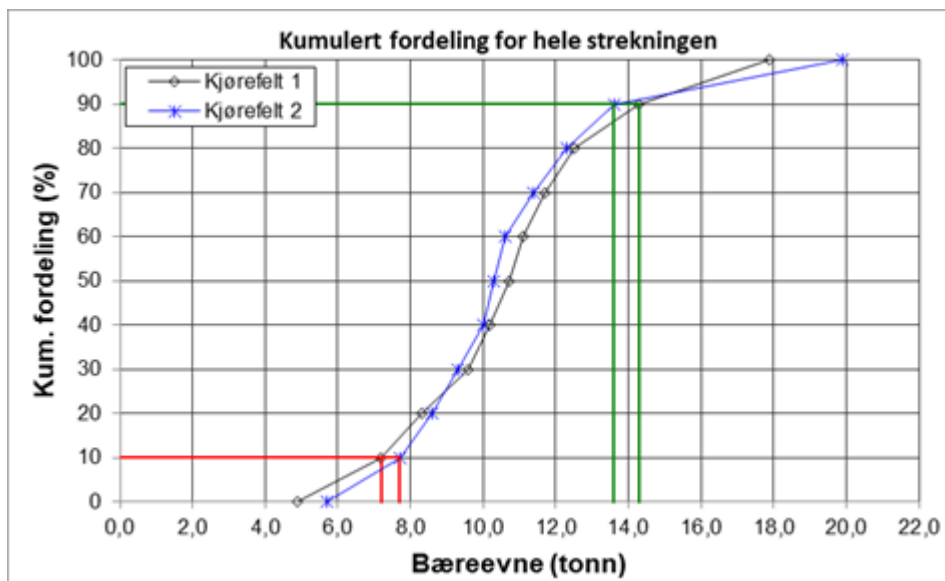
Resultater fra forsøk 2 (april 2021) følger.

4.3.1 Bæreevne



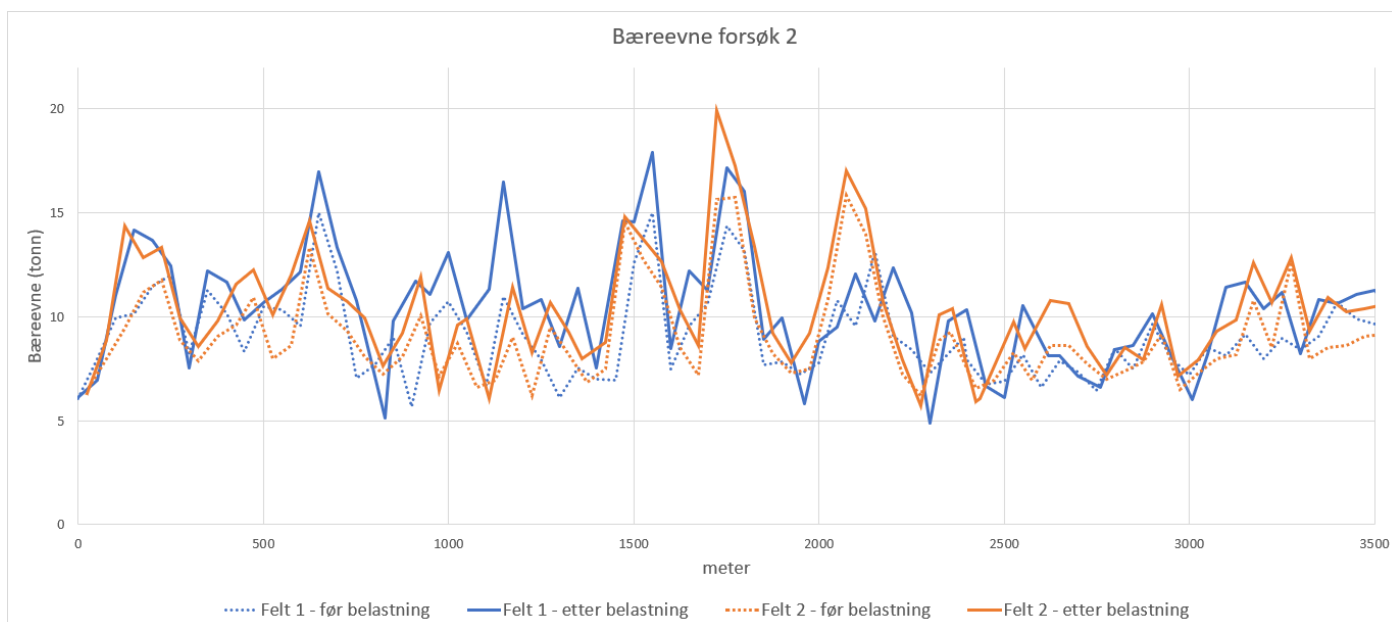
Figur 4-13: Kumulert bæreevne for forsøk 2.

Figur 4-13 viser kumulert bæreevne målt før forsøk 2. Den røde streken markerer 90 % - verdien. I dette tilfellet er denne verdien 7 tonn for begge felt. Det vil si at 90 % av forsøksstrekningen har bæreevne over 7 tonn. Linjene for felt 1 og felt 2 er nokså parallelle, som indikerer liten forskjell i bæreevne.



Figur 4-14: Kumulert bæreevne etter forsøk 2.

Figur 4-14 viser kumulert bæreevne etter forsøk 2, hvor felt 2 har noe bedre bæreevne enn felt 1. 90 % - verdien for felt 2 er omtrent 7,9 tonn. Tilsvarende har felt 1 en verdi på ca. 7,1 tonn. Også etter forsøket er linjene som viser fordelingen tilnærmet parallelle og indikerer liten forskjell mellom feltene. Målt bæreevne er noe bedre etter forsøk, enn før.



Figur 4-15: Bæreevne forsøk 2.

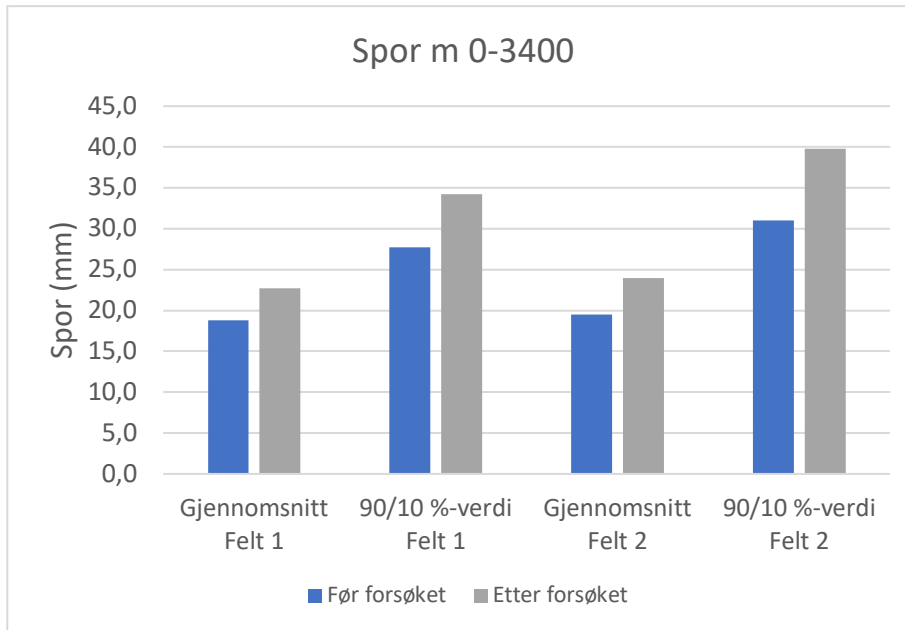
Figur 4-15 viser en grafisk framstilling av kontinuerlig målt bæreevne under forsøk 2. Også her er det stor lokal variasjon i bæreevne over forsøksstrekningen. Blå illustrerer felt 1,

oransje illustrerer felt 2. Jevnt over hele strekningen er målt bæreevne etter belastning noe bedre enn bæreevne før belastning.

4.3.2 Tilstandsutvikling

Tilstandsutvikling forsøk 2, målt i form av spor, jevnhet og tverrfall.

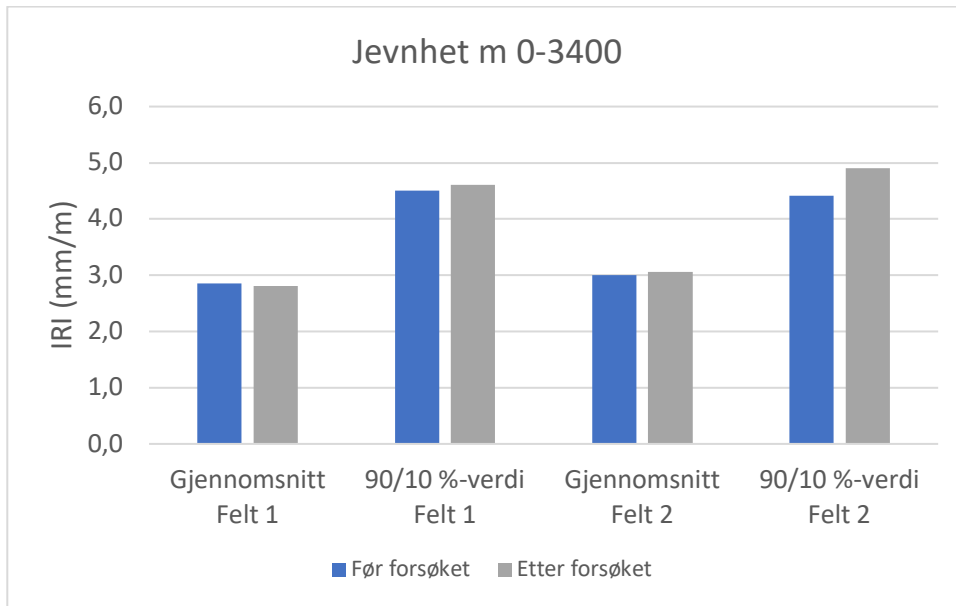
Spor



Figur 4-16: Sporutvikling forsøk 2.

Figur 4-16 viser sporutvikling for forsøk 2. Av figuren er det mulig å se en tydelig økning i spordannelse etter belastning. Dette gjelder begge felt. 90/10 % - verdien for felt 2 har størst økning. Den relative forskjellen mellom feltene er liten.

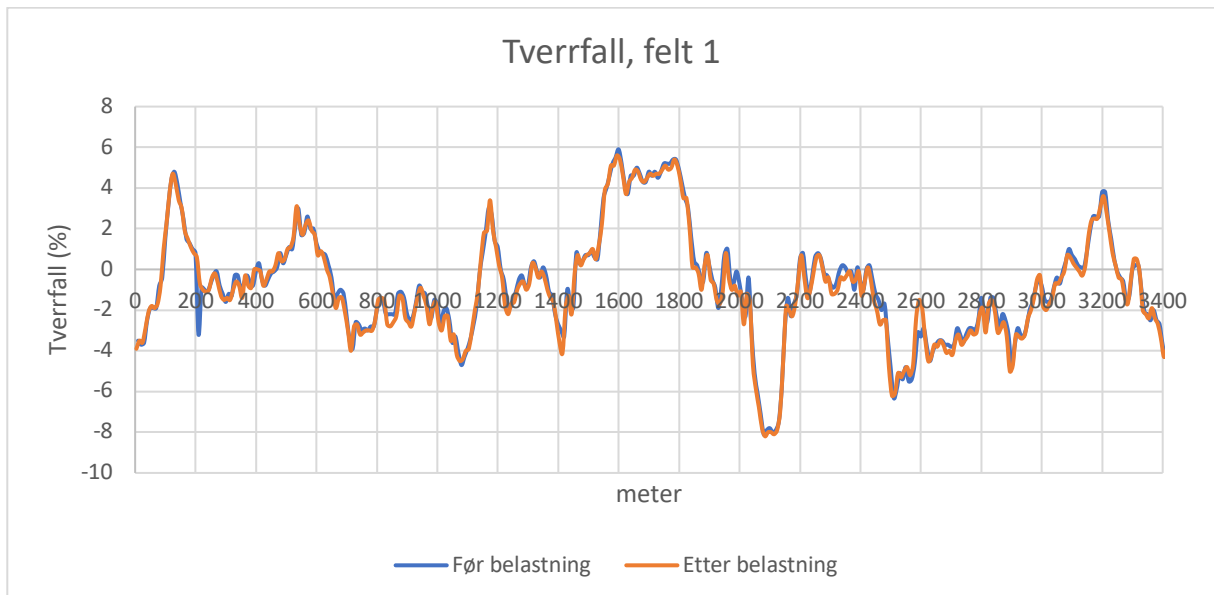
Jevnhet



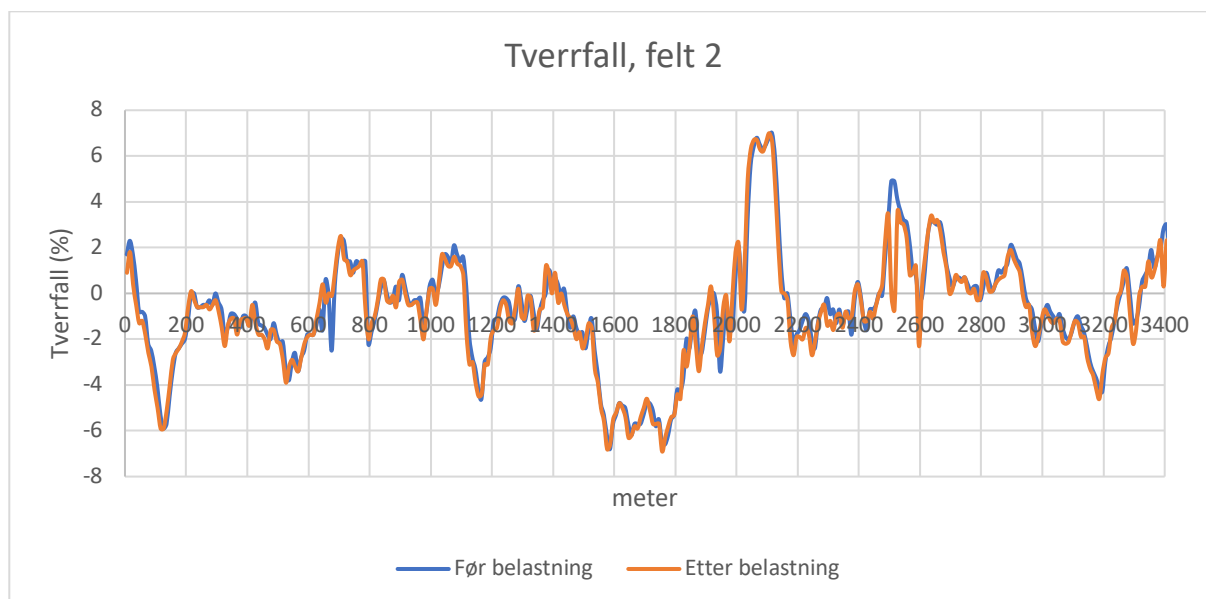
Figur 4-17: Jevnhetsutvikling forsøk 2.

Figur 4-17 viser målt jevnhet før og etter forsøk 2. Det er liten endring i gjennomsnittsverdiene før og etter belastning, men 90/10 % - verdien viser noe økning. Dette gjelder spesielt felt 2.

Tverrfall



Figur 4-18: Tverrfall felt 1, forsøk 2.



Figur 4-19: Tverrfall felt 2, forsøk 2.

Figur 4-18 og 4-19 viser målt tverrfall for felt 1 og felt 2, under forsøk 2. Det er liten forskjell mellom målingene før og etter belastning. Kun et par punkter på strekningen er det noe forskjell. Vegens tverrfall ble lite påvirket av belastningen.

Sprekkutvikling

Tabell 4-4 presenterer sprekkutvikling under forsøk 2 i form av prosentvis sprekkeandel angitt ved 90 % - verdi. Verdiene tyder på tydelig sprekkutvikling for begge felt. Felt 1 har en økning på 123 %, felt 2 har en økning på 96 %. Dette er samme tendens som under første forsøk, felt 1 har noe større sprekkutvikling enn felt 2.

Tabell 4-4: Sprekkandel forsøk 2.

Sprekkandel (%)	90%-verdi	
	Før	Etter
Felt 1	13,5	30,2
Felt 2	14,2	27,9

4.4 Visuell skadekartlegging

Tabell 4-5 viser et utvalg bilder tatt rett etter forsøk 2. Bildene er fotografert på ulike deler av vegen. Beskrivelse til hvert bilde er presentert til høyre i tabellen.

Tabell 4-5: Visuelt registrerte skader etter forsøk 2. Foto: Marit Helene U. Kværnmo.

Skade



Beskrivelse

Felt 2 til venstre.
Betydelig spordannelse og noe oppsprekking. Det er også mulig å se at vann har trengt gjennom vegdekket via sprekkene, et tydelig tegn på pumpeeffekten.



Felt 1 til venstre, felt 2 til høyre.
Tydelig oppsprekking og
forekomst av vann på midten av
vegen, i tillegg til spordannelse.



Felt 1 til venstre, felt 2
til høyre. Det er synlig
skader i begge felt,
spor- og
sprekkdannelse.



Felt 1 til venstre, felt 2 til høyre. Kantskader, sprekkdannelse og spor. Noe verre i felt 2, men betydelige skader også i felt 1.



Spor og sprekkdannelse ut mot kanten av felt 2. Vegdekket er gått i oppløsning som følge av belastningen.

5 Diskusjon

5.1 Modellberegning

Modellberegningene foretatt i ERAPave viser betydelig forskjell i spordannelse mellom overbygning 1 og 2. Spordannelse per akselgruppe (tabell 4-1) indikerer at enkel aksel med enkelmontert hjul vil bidra til størst spordannelse. Det gjelder for både svak veg og normal/sterk veg. Trippel aksel med tvillingmontert hjul er mest vennlig i begge tilfeller. Den relative forskjellen mellom akselgruppene er mindre for normal/sterk overbygning, sammenliknet med svak overbygning. Svak veg vil i utgangspunktet gi større spordannelse, uansett totalvekt. Spordannelse avhengig av totalvekt (tabell 4-2) indikerer at tømmervogntog med totalvekt 74 tonn vil bidra til større spordannelse enn totalvekt 60 tonn, uavhengig av overbygning. Dersom man vurderer spordannelse pr. tonn nyttelast, er totalvekt 74 tonn mest gunstig. Tømmervogntog med totalvekt 74 tonn gir ca. 8 % mindre spordannelse pr. tonn nyttelast, sammenliknet med totalvekt 60 tonn. Dette samsvarer med målinger og visuelt inntrykk etter belastningsforsøk 2. Beregningene presentert i tabell 4-2 antyder at 74 tonns tømmervogntog ikke vil bidra til økt nedbrytning (i form av spor), dersom fokus ligger på spordannelse pr. tonn nyttelast.

Figur 4-1 – 4-6 viser at det vil oppstå størst deformasjon i vegens lag nr. 2, og avta med konstruksjonens dybde. Spesielt for overbygning 1 (svak) vil dette laget bidra negativt for dannelsen av spor.

Modellberegningen indikerer at jo flere aksler det er i en akselgruppe, desto mer vegvennlig er det. Dette er ikke nødvendigvis tilfelle. Beregningene tar ikke hensyn til økt poretrykk og pumpeeffektens påvirkning på nedbrytning. Det er en mulighet for at økt bruk av triple aksler medfører økt nedbrytning i praksis, uten at det kommer fram av modellberegningene gjort her.

5.2 Bæreevne

Uansett bæreevne vil vegen oppleve noe deformasjon ved belastning. En reduksjon i bæreevne vil imidlertid føre til økt forekomst av elastiske og plastiske deformasjoner. Dette bidrar til en raskere nedbryting av vegen. Bæreevнемålinger fra forsøk 1 viste liten endring etter belastning, både for felt 1 og for felt 2. I perioden før forsøk 1 er det dokumentert lite

nedbør i forsøksområdet, lav grunnvannstand og lav metningsgrad (Berntsen, 2021). Dette er faktorer som medfører god bæreevne. 90 % - verdien for felt 1 var 11,7 tonn før belastning, og 10,9 tonn etter belastning. For felt 2 var 90 % - verdien 11,9 tonn før belastning og 11,6 tonn etter belastning. Bæreevne angir vegens motstand mot nedbrytning, og disse verdiene tilsier tilnærmet lik nedbrytning for begge felt. Bæreevne målt under teleløsning våren 2020 er ikke overraskende mye lavere enn ved forsøk 1. Ut ifra disse målingene var det derfor forventet betydelig større skadeutvikling ved gjennomføring av forsøk 2. Dette ble bekreftet ved gjennomføring.

Bæreevne målingene for forsøk 2 var lavere enn tilsvarende målinger fra forsøk 1. Den relative forskjellen i bæreevne for felt 1 og felt 2 var imidlertid minimal. Med tilnærmet lik bæreevne forventes lik nedbrytning. Umiddelbar visuell registrering etter forsøk 2 antydte at felt 2 hadde noe større skadeutvikling, som betyr at kjøretøyene med totalvekt 74 tonn er mer skadelig for vegen i denne perioden.

Bæreevne målingene fra forsøk 2 viste også at bæreevnen på flere steder hadde økt. En mulig forklaring på dette, er at massene i vegoverbygningen og undergrunnen har blitt etterkomprimert som følge av trafikkbelastningen. Vann som fryser til is får en volumøkning på ca. 10 %, og porer fylt med vann som fryser utvides tilsvarende. Ved smelting oppstår volumreduksjon når isen går over til vann. For å oppnå samme densitet som før frosten, må massene komprimeres. Massene er løsere lagret og har lavere densitet i starten av teleløsningsperioden. Når vegen belastes for trafikk, vil massene komprimeres igjen og densiteten øker. Økt densitet gir bedre bæreevne.

Generelt viser målinger fra belastningsforsøkene en ujevn skadeutvikling over forsøksstrekningen. Variasjon i skadeutvikling gjenspeiler variasjon i oppbygning og underliggende lag. Partiene med størst skadeutvikling var også vegens svakeste parter. Ujevn skadeutvikling samsvarer med bæreevne målingene (figur 4-15) som viste variasjon i styrke.

5.3 Spor

Målingene foretatt under forsøk 1 viste liten tendens til sporutvikling, og den relative forskjellen i sporutvikling mellom felt 1 og felt 2 var lav. Gjennomsnittverdien for begge feltene viste overraskende nok en reduksjon. Dersom vogntogene ikke holdt eksakt samme spor under kjøring kan sideveis vandring ha bidratt til at sporene jevnes ut.

Under forsøk 2 var det derimot ingen tvil; både målinger og visuell registrering viste tydelig spordannelse for begge felt. Den relative forskjellen i gjennomsnittverdi for felt 1 og felt 2 var tilnærmet identisk, mens 90/10 % - verdien viste noe større spordannelse for felt 2 enn felt 1 (figur 4-16).

Under forsøk 1 var det tilnærmet identisk skadeutvikling for begge felt, og liten forskjell i mengde tømmer transportert. Under forsøk 2 var det tydelig skadeutvikling for begge felt, med antydning til noe verre utvikling i felt 2. I dette tilfellet ble det fraktet 42,5 % mer tømmer i felt 1, enn felt 2. Det vil si at tømmervogntog med totalvekt 74 tonn er mer skadelig for vegen i teleløsningsperioden.

5.4 Jevnhet og tverrfall

I praksis vil vegbanen alltid ha noen ujevnheter. Vegen skal ha noe tverrfall, slik at vannet renner bort fra vegoverflaten. Store ujevnheter vil imidlertid føre til tilfeldige og systematiske skjevbelastninger. På et jevnt godt dekke beregnes ca. 10 % dynamiske tillegg som følge av trafikkbelastning. På en ujevn veg er tilsvarende tillegg på 30 – 50 % (Statens vegvesen, 2016, s. 64). Med andre ord vil en ujevn veg oppleve større belastning enn en jevn veg. Ved empirisk dimensjonering – som i Norge, må det tas hensyn til realistiske dynamiske tillegg til statiske trafikkklaster.

Ifølge en rapport av ROADEX Network fra 2014 (Varin & Saarenketo) avhenger vegens spenninger og tøyninger av vegoverflatens jevnhet. Ujevnheter i vegoverflaten kan forårsake støtvis belastning på grunn av kjøretøyenes fjæringssystem og støtdempere. Spenningene som oppstår etter et støt, er potensielt høyere enn den konstante (teoretiske) belastningen. Dette fører til raskere nedbrytning. Her er også pumpeeffekten en viktig faktor. Repeterende støtbelastning om våren vil føre til ytterligere deformasjon (Varin & Saarenketo, 2014). I

kombinasjon med vann under vegdekket som senker dekketemperaturen, reduseres vegdekkets stivhet og dekkelevetid gjennom økt utmattelse.

Jevnhetsmålinger fra forsøk 1 viste ingen klar tendens til verken økning eller reduksjon som følge av belastning. 90/10 % - verdien for felt 1 er noe høyere, motsatt for felt 2. Forskjellen i målt jevnhet før og etter belastning er liten for begge felt. Tilsvarende målinger fra forsøk 2 viste også relativt lave forskjeller i jevnhet før og etter belastning. Det vil si at belastningen hadde liten påvirkning på vegens jevnhet, selv om det var lokale variasjoner over forsøksstrekningen.

Målingene fra begge forsøk viste liten endring i tverrfall, som vil si at belastningen hadde liten påvirkning på tverrfall i disse tilfellene.

5.5 Sprekkutvikling

Sprekkdannelse i vegkonstruksjonen er meget uheldig. I tillegg til å redusere bæreevne, vil sprekkene bidra til at vegdekket mister sin funksjon som tett tak over overbygningen. Sprekker i vegdekket blir vannets vei inn i konstruksjonen. Bæreevnen til de granulære lagene og vegens motstand mot deformasjon, reduseres, og fører til raskere nedbrytning av veggen (Berntsen, 2021). For forsøk 1 viser målinger antydning til større sprekkutvikling for felt 1, enn felt 2. Den interne forskjellen for hvert felt er liten.

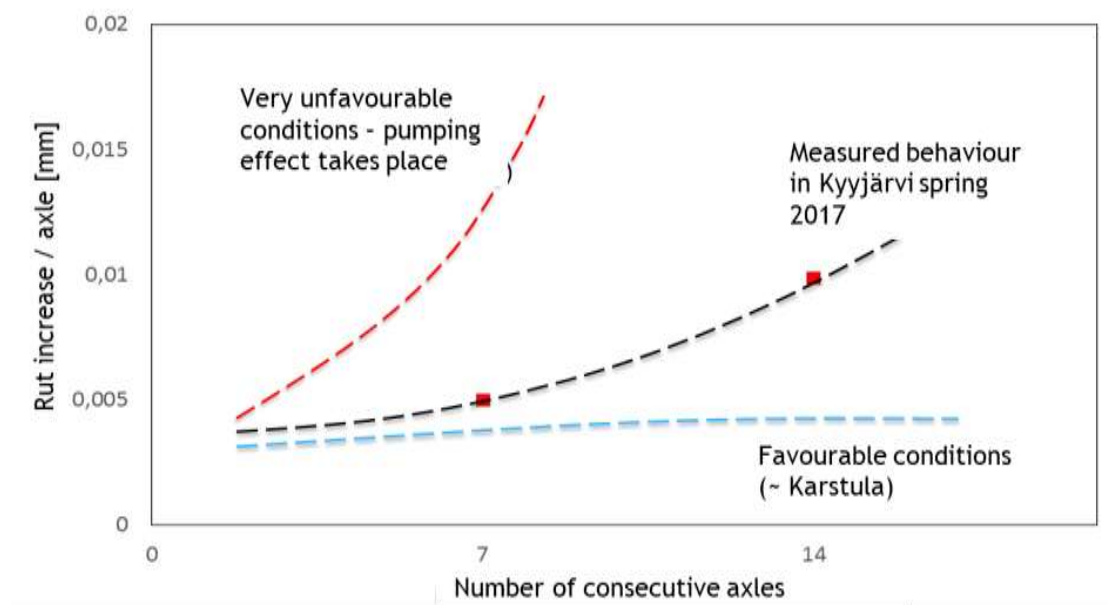
Belastning forårsaker tøyninger i vegdekket som gir brudd i form av oppsprekking. Sprekkene kan også skyldes problemer lenger ned i vegkonstruksjonen (Statens vegvesen, 2014a, s. 9). Størrelse og mønster på sprekkene er en god indikasjon på hvor dypt i konstruksjonene de kritiske påkjenningene oppstår. Ved krakelering, vil små ruter indikere kritiske påkjenninger i bærelag rett under vegdekket. Større ruter indikerer kritiske påkjenninger lenger ned mot undergrunn. Sprekkdannelse som følge av høy belastning vil som oftest skyldes deformasjon i underliggende lag, gjerne kombinert med vegdekkets tykkelse. Et tynt vegdekke som ligger på fine masser, vil lettere sprekke opp. Etter forsøk 2 var det mulig å se vegdekkets tykkelse, på deler av forsøksstrekningen hvor asfaltlaget hadde gått i oppløsning. Dekket på de aktuelle stedene var relativt tynt, og hadde grus/sand som underliggende lag.

5.6 Pumpeeffekt

På grunn av tidsbegrensninger er målinger og analyse tilknyttet pumpeeffekt ikke inkludert i oppgaven. Bilder tatt etter forsøk 2 (tabell 4-5) viser vann på deler av forsøksstrekningen.

Dette var vann som kom opp gjennom vegdekket som følge av belastning.

Poretrykksoppbygging er verst med tanke på kjøretøy som er tyngst lastet bak. For tømmervogntog med totalvekt 74 tonn er siste trippelaksel på tilhenger ofte 100 % utnyttet, og vegen opplever dermed maksimal belastning når poretrykket allerede er høyt. Dette er meget uheldig med tanke på pumpeeffekten.



Figur 5-1: Gunstige og ugunstige forhold for pumpeeffekt (Saarenketo, 2019).

Figur 5-1 presenterer sporutvikling pr. aksel og påfølgende aksler avhengig av forhold. Figuren er basert på målinger fra forsøk gjennomført i Finland. Den blå streken tilsvarende gunstige forhold, typisk sterk vegstruktur og god drenering. Dette var tilfelle ved forsøk 1. Figuren viser at selv ved påfølgende aksler og tett belastning vil vegen oppleve lav sporutvikling dersom det er gunstige forhold. Ved ugunstige forhold (myk undergrunn, høy grunnvannstand) har antall aksler stor påvirkning på spordannelse. Ugunstige forhold er eksempelvis teleløsningsperiode, som ved gjennomføring av forsøk 2. Ifølge Saarenketo (2019) vil pumpeeffekten være framtrædende under disse forholdene, noe som ble bekreftet under forsøk 2.

5.7 Resultater vurdert opp mot Skjølaas' artikkel

I «Vegslitasje fra tømmervogntog» (Skjølaas, 2020) er det foretatt beregninger ved hjelp av en variant av fjerdepotensregelen, i henhold til Report nr. 08/2008 fra Nordiska Vägtekniske Förbundet. I tillegg til å ta hensyn til aksellast, inneholder denne modellen parametere som korrigerer for andre forhold som påvirker nedbrytning. Skjølaas' kommer frem til at «8- og 9-akslede tømmervogntog vil gi redusert slitasje både på sterke og svake veger». I tillegg påpekes det at enkelmonterte hjul bidrar til vesentlig større nedbrytning sammenliknet med tvillingmonterte hjul. Dette samsvarer med resultat fra modellberegninger gjort i forbindelse med denne oppgaven.

Videre skriver Skjølaas at tømmervogntog med 9 aksler er mest vennlig både for sterk og svak veg, mens tømmervogntog med 7 aksler er minst vennlig. Dette gjelder vegslitasje per transportert enhet. Dette var tilfelle også for modellberegningene i denne oppgaven, men kun for sterk veg. For svak veg er det noe uenighet mellom Skjølaas' artikkel og denne oppgaven.

Skjølaas' beregninger viser til liten forskjell i slitasje på sterke veger, mens de er noe større for svake veger. Dette er helt i tråd med resultat og målinger foretatt i forbindelse med belastningsforsøkene. Skjølaas påpeker imidlertid at dersom det blir kun sett på tømmerbilen, og ett og ett lass sammenliknes, vil en 4-akslet tømmerbil bidra til større slitasje enn en 3-akslet tømmerbil. På grunn av nyttelast, vil 4-akslet tømmerbil likevel være mest gunstig da den bidrar til mindre slitasje i forhold til transportmengde.

Dette tyder på at mange av Skjølaas' konklusjoner er i samsvar med beregninger og målinger gjennomført i forbindelse med denne oppgaven. Likevel er det også noen forskjeller.

5.8 Noen refleksjoner

Kjøretøyets antall aksler spiller en viktig rolle for nedbrytning, og ifølge Varin & Saarenketo (2014) er det spesielt tre faktorer som påvirker dekkets levetid dersom antall aksler øker. Første faktor er at økt antall aksler kan føre til økt poretrykk og stigende vannivå, som beskrevet under pumpeeffekten. Dette gjelder spesielt ved teleløsning når vegen har høy metningsgrad. Økt poretrykk gir reduksjon i stivhet for ubundne materialer. Resultater fra en studie på dette gjennomført i Koskenkylä, Finland, viser at flere gjentakende belastninger med

tunge kjøretøy fører til økt deformasjon og spordannelse (Varin & Saarenketo, 2014). I verste fall fører dette til hurtigere plastisk deformasjon av vegen.

Andre faktor er at svak undergrunn ikke innehar tilstrekkelig elastiske egenskaper, slik at deformasjon som følge av belastning fra lange, tunge kjøretøy medfører at vegen ikke får restituert før neste belastning. Ved flere aksler vil effekten øke for hver aksel som passerer. Målinger gjort på en gruveveg i Pajala, Sverige bekrefter dette (Varin & Saarenketo, 2014). I en rapport fra samme studie konkluderes det med at et 72-tonns vogntog med ni aksler og et 90-tonns vogntog med elleve aksler, vil oppnå omtrent samme nivå av masseforskyvning/deformasjon i undergrunnen, og 30 – 35 % mer enn et vanlig 60-tonns vogntog med sju aksler. De store forskyvningene fører til høyere poretrykk i undergrunn, som igjen fører til økt deformasjon og spordannelse. Her er det imidlertid viktig å påpeke at nevnte forsøk gjaldt veg uten fast dekke. Det må tas hensyn til at utfallet kan være noe annet for veg med bituminøst dekke.

Den tredje faktoren som påvirker dekkets levetid dersom antall aksler øker, er at økt antall aksler på samme kjøretøy bidrar til at flere dekk belaster samme spor, og dermed fører til økt spordannelse.

Vegers geografiske beliggenhet og topografi er også en faktor relevant for slitasje av vegdekke. Under akselerasjon, bremsing og i svinger oppstår horisontale krefter i kontaktflaten mellom kjøretøy og vegdekke. Disse kreftene overføres til vegen som horisontale skjærspenninger i kontaktflaten. En kurvete og svingete veg vil oppleve større slitasje. Forsøksstrekningen benyttet i belastningsforsøkene ligger i et nokså flatt område, med relativt lite stigning og høydeforskjeller. På store deler av forsøksstrekningen ligger felt 2 på vegens skjæringsside. Det er normalt en større tendens til skadeutvikling på fyllsiden i en kurve. Dette har sammenheng med terrengets helling og vannansamling på siden, som kan medføre lavere bæreevne og dermed større skadeutvikling. Dette var imidlertid ikke tilfelle under belastningsforsøkene, da bæreevne målingene viste liten forskjell i bæreevne mellom feltene.

Ved bruk av tømmervogntog på smale veger bør eventuelle kantskader vurderes. Smale veger er ekstra utsatt for kantskader fordi trafikkbelastningen kommer lenger ut mot kanten, sammenliknet med bredere veger. Mot kanten er vegen naturlig svakere på grunn av lite hold

og støtte. Dersom det i tillegg er bratte grøftekanter med lav sidestøtte, kan det oppstå uheldige spenningssituasjoner (Statens vegvesen, 2015, s. 139). I en rapport om kantskader på smale veger henviser Aksnes (2019) til fallodsmålinger som viser betydelig reduksjon i vegens bæreevne i avstander mindre enn 1,25 meter fra vegkanten. Målinger fra feltforsøk med fire kjøretøy viste at det 40 cm fra vegkanten var høyere vertikal tøyning, både i forsterkningslag og bærelag, i forhold til 325 cm fra vegkanten (Aksnes, 2019). Etter forsøk 1 ble det registrert liten forskjell i skadeutvikling mellom feltene, men det ble enkelte steder registrert økt mengde kantskader. Spesielt i området rundt kjøretøyenes møteplass. Ved møteplassen måtte kjøretøyene langt ut mot kanten for å passere hverandre. Her var også kjørehastigheten noe lavere. Det meste av det norske fylkesvegnettet består av smale veger med to felt. Under forsøk oppstår riktig nok spesielle (konstruerte) forhold, som med liten sannsynlighet finner sted ved normal trafikk. Hvor stor er sannsynligheten for et møte mellom ni tømmervogntog ved normal trafikk på fylkesveg? Ikke usannsynlig, men relativt liten dersom man skal være realistisk.

Et annet spørsmål er hvor stor andel av tømmervogntog som vil ha mulighet til å benytte seg av økt tillatt totalvekt. De fleste av dagens tømmervogntog vil ikke kunne benytte totalvekt 74 tonn og fortsatt holde seg innenfor dagens regelverk om maks. aksellast. Dersom det innføres totalvekt 74 tonn, vil interesserte aktører mest sannsynlig sørge for tilpasset utstyr og kjøretøy, gitt at det er lønnsomt. Med en ny økning i totalvekt for tømmervogntog er det ikke usannsynlig at andre parter i transportnæringen også ytrer ønske om økning. Dette kan føre til nok en økning om noen år. Hvor vil det ende?

I tillegg til akselkonfigurasjon, kan det diskuteres hvorvidt akselavstander og vektfordeling spiller en rolle. Akselavstand påvirker vektfordeling. Hvor avgjørende er forskjeller knyttet til akselavstander? Avhengig av plassering av andre styringsaksler, vil enkelte typer tømmerbiler lastes noe tyngre bak for størst mulig utnyttelse. På samme måte som maks. utnyttelse av siste trippelaksel på tilhenger, er dette meget uheldig med tanke på pumpeeffekten.

5.9 Usikkerheter og feilkilder

Den største kilden til usikkerhet i denne masteroppgaven er knyttet til tolkning av resultater og begrensninger i beregningsprogrammet som er benyttet. Det er foretatt relativt få målinger/beregninger, som medfører lav gyldighet på oppnådde resultat. Tid for

gjennomføring av belastningsforsøk bidrar til økt usikkerhet. Ved enkelforsøk over en begrenset tidsperiode er det ikke nødvendigvis mulig å oppnå realistiske målinger/resultater, da nedbrytning er tidsavhengig. Under forsøk 1 ble det totalt gjennomført 1250 – 1260 passeringer, noe som ikke er tilstrekkelig antall for å gi sikre målinger for plastiske deformasjoner. Plastiske deformasjoner utvikles over tid. Den planlagte prøveordningen vil foregå over en lengre periode og forhåpentligvis gi mer nøyaktig resultater. Under forsøk 2 ble det gjennomført betydelig færre belastninger, men med større skadeutvikling. Den hurtige skadeutviklingen under forsøk 2 gir lite rom for usikkerhet når det kommer til teleløsningens kritiske rolle i vegens nedbrytning. Det er også mulig at valg av forsøksstrekning har vært uheldig, i den forstand at strekningen ikke representerer majoriteten av vegnettet.

Det knyttes også usikkerhet til valg av metode for måling og dataproduksjon. Er valgt metode hensiktsmessig, basert på ønsket dataproduksjon? Er det mulig å utelukke andre metoder som kunne gitt større sikkerhet? Basert på ønsket dataproduksjon for belastningsforsøk er det vanskelig å benytte en metode som gir større sikkerhet med tanke på forsøkernes hensikt. Flere gjennomføringer og målinger over en lengre tidsperiode ville bidratt til økt gyldighet for måledata. Her er prøveordningen viktig.

De teoretiske modellberegningene kunne vært utført ved hjelp av andre beregningsprogrammer enn ERAPave. Programmet som er valgt benyttet er fortsatt under utvikling. Det er uklart hvordan endelig utgave vil framstå med hensyn til inngangsdata, innhold og resultater. Det er uklart om endelig utgave ville medført større sikkerhet. Bruk av dataprogram til beregning forutsetter tilstrekkelig kunnskap og forståelse. Beregningsprogram benytter gjerne forenklet matematikk og medfører usikkerhet i valg av forenklinger og antakelser i programmet. En modell vil aldri kunne gjenskape virkeligheten 100 %. Empiriske modeller har en begrenset anvendbarhet som krever kalibrering og tilpasning for å kunne anvendes (Statens vegvesen, 2015, s. 153).

ERAPave er brukt til beregning av spordannelse, mer spesifikt relativ forskjell i spordannelse for ulike akselgrupper. På grunn av tid og begrensninger er programmets egne standardverdier benyttet ved beregning av utmattelse og piggdekkslitasje. Dette er parametere som må inkluderes for at programmet skal foreta beregninger på spordannelse. Standardverdiene er erfaringsverdier fra Sverige. Det er ikke mulig å si om tallverdiene av beregningene er

realistiske, fordi programmet ennå ikke er kalibrert/tilpasset norske forhold og faktiske materialelegenskaper. Resultatene kan avvike fra faktiske verdier og er derfor kun benyttet til sammenlikning. Hensikten med modelleringen var å se på eventuelle forskjeller i nedbrytning mellom totalvektene og akselgruppene, ikke eksakte verdier for nedbrytning. Det er forholdet mellom nedbrytning som følge av totalvekt 60 tonn og totalvekt 74 tonn, som er interessant.

Overbygningene benyttet i beregningene kan avvike noe fra faktiske overbygninger, på grunn av individuelle vurderinger ved utvelgelsesprosessen og/eller begrensninger i programmet.

ERAPave er hovedsakelig et beregningsprogram for dimensjonering av nye veger. I dette tilfellet var det ønskelig å beregne nedbrytning av eksisterende veg. For å ta hensyn til dette, ble resultater fra dimensjoneringsperiodens ti første år ekskludert i vurderingen. Utvikling av spor vil normalt være størst den første perioden etter vegen er tatt i bruk, og avta etter et visst antall belastninger. Dette skyldes etterkomprimering. Nåværende versjon av ERAPave tar ikke hensyn til dette. Modellen antar lik sporutvikling hele vegens levetid.

Tømmerbiler med fire aksler har to styringsaksler med enkelmonterte hjul og en dobbelaksel med tvillingmonterte hjul. Andre styringsaksel sitter relativt nær dobbelaksling. For å ta hensyn til dette i modellberegningene, ble konfigurasjon for fireakslet tømmerbil forenklet til to enkle akslinger med enkelmonterte hjul, og en dobbelaksel med tvillingmonterte hjul. Alternativt kunne det vært valgt å benytte en enkel aksel med enkelmontert hjul og en trippel aksel med tvillingmonterte hjul. Her er det antatt at enkelmontert hjul vil gi størst nedbrytningseffekt, og «verste tilfelle» ble benyttet i beregningene.

Naturlig variasjon i klima gjennom året er vanskelig å tallfeste med nøyaktighet, valg av klimadata medfører derfor usikkerhet. Temperaturene brukt som utgangspunkt for klimadata er hentet fra en målestasjon med geografisk beliggenhet omtrent 90 km sør for forsøksstrekning. Dataens gyldighet i øvrige deler av Innlandet er usikkert.

En forutsetning for vellykkede resultater i modellberegningene er overbygningenes representativitet i forhold til eksisterende vegnett. Også vegnettet som inngår i prøveordningen, må være representativ for det øvrige vegnettet aktuelt for åpning. Dette vil

bidra til at målinger fra belastningsforsøk og prøveordning gir en mer realistisk oppfatning av konsekvenser og skadeomfang.

I forbindelse med belastningsforsøkene er det noe usikkerhet knyttet til ulikt kjøremønster (blant sjåførene) og forskjell i kjørehastighet. Under forsøk 1 hadde 60-tonns vogntogene høyere gjennomsnittshastighet enn 74-tonns vogntogene. Ifølge den foreløpige rapporten fra forsøk 1 (Berntsen, 2021) kan hastighet gi dynamiske tilleggseffekter som øker nedbrytningen. Det er usikkert om forskjellen i hastighet i dette tilfellet har merkverdig betydning for nedbrytningen.

Bruk av måleutstyr medfører alltid en usikkerhet knyttet til utstyrets nøyaktighet og individuelle forskjeller mellom personene som foretar målingene. Forskjell i målemetode og utstyr kan ikke utelukkes, til tross for at det ble tilstrebet å gjennomføre identiske målinger. Målingene påvirkes av individuelle forskjeller i utstyr og personell som utfører målingene. Falloddmålinger blir normalt kontrollert om de ser «normale» ut før de lagres. Kun «normale» målinger lagres. Menneskelig feil og personlig vurdering vil derfor påvirke måldata. Med økende antall parter øker usikkerhet knyttet til menneskelige feil og subjektive vurderinger.

For optimale målinger på kjøretøyenes nedbrytning i teleløsningsperioden var det ønskelig å gjennomføre forsøk 2 når vegen var på sitt svakeste/mest kritiske. Gjennomføring av et forsøk i denne størrelsesordenen krever mye koordinering og planlegging og måtte derfor gjennomføres til planlagt tidspunkt, uavhengig av klima. Det er derfor ingen garanti for at vegen var på sitt svakeste ved tidspunkt for forsøk 2, dette er heller ikke mulig å undersøke verken før, under eller etter forsøket.

Dette er en ment som en selvstendig studie, men store deler er knyttet opp mot erfaringer fra Sverige og Finland. Forsøksplanlegging, gjennomføring og vurderinger kan være påvirket av grad av suksess for tilsvarende forsøk i andre land. Personlige ønsker og motivasjon for involverte parter spiller også en rolle i valg av metode og analyse av resultater. Menneskelige feil er ikke til å unngå og må derfor tas hensyn til som kilde for usikkerhet.

5.10 Videre arbeid

Videre arbeid vil omfatte gjennomføring av prøveordningen. Prøveordningen vil forgå over en lengre tidsperiode, med flere gjennomføringer og målinger. Dette vil bidra til større sikkerhet hva angår målegylldighet og eventuelle konsekvenser. I denne oppgaven har fokus vært på forskjell i nedbrytning i form av spordannelse. For videre arbeid kan det være hensiktsmessig å undersøke om det er spordannelse som vil være største konsekvens av økt totalvekt, eller om det finnes andre skademekanismer som vil bidra i like stor (eller større) grad. Kan nedbrytningen skyldes andre faktorer enn kjøretøyenes totalvekt og konfigurasjon?

Dersom videre arbeid bekrefter at økt totalvekt vil føre til økt nedbrytning av vegnettet, hva må gjøres? Hvilke tiltak må gjennomføres før eventuell økning i totalvekt for tømmervogntog kan innføres? I første omgang må årsak til økt nedbrytning isoleres. Dersom det skyldes vogntogenes konfigurasjon, ligger utfordringen hos kjøretøyprodusentene. Dersom det skyldes vegens tilstand, bør tilstand for eksisterende vegnett kartlegges. Den største utfordringen er å finne ut hvilke(n) faktor(er) som påvirker nedbrytning mest, og hvorfor.

6 Konklusjon

Teoretiske modellberegninger, målinger fra praktisk belastningsforsøk og visuell registrering etter forsøk indikerer at det er en forskjell i nedbrytning for tømmervogntog med totalvekt 60 tonn og 74 tonn. Et tømmervogntog med totalvekt 74 tonn vil bryte ned vegen mer, sammenliknet med et tømmervogntog med totalvekt 60 tonn.

Selv om et tømmervogntog med totalvekt 74 tonn har større nedbrytende effekt enn tilsvarende vogntog på 60 tonn, vil muligheten til å transportere mer tømmer bidra til at totalvekt 74 tonn er mer gunstig i lengden. På sterk veg vil tømmervogntog med totalvekt 74 tonn ifølge modellberegningene ha mindre nedbrytningseffekt pr. tonn transportert, sammenliknet med tømmervogntog med totalvekt 60 tonn. På svak veg er det imidlertid motsatt.

Det er vanskelig å slå fast en endelig konklusjon på spørsmålet om økt tillatt totalvekt vil bidra til økt nedbrytning av vegnettet. Repeterende tung belastning er uten tvil skadelig på svake veger, og den relative forskjellen i nedbrytning er størst med hensyn til vegens styrke, ikke kjøretøyenes totalvekt. Det er heller ingen tvil om pumpeeffekten eksisterer, dette var tydelig ved visuell registrering etter forsøk 2.

Denne oppgaven alene er ikke nok til å konkludere om det burde foretas en endring hva angår tillatt totalvekt for tømmervogntog. Etter gjennomført prøveordning vil det foreligge større sikkerhet rundt eventuelle konsekvenser og endelig konklusjon.

Referanser

- Ahmed, A. & Erlingsson, S. (2013). Evaluation of permanent deformation models for unbound granular materials using accelerated pavement tests. *Road Materials and Pavement Design*.
- Aksnes, J. (2019). *Kantskader på smale veger*: Statens vegvesen. Upublisert manuskript.
- Aurstad, J. (2018). *Litt om vedlikehold av vegdekker (I)*. Ås: Statens vegvesen (Forelesning).
- Berntsen, G. (2018). *Frost og tele*. Ås: Statens vegvesen (Forelesning 27.09.2018).
- Berntsen, G. (2021). *Foreløpig rapport belastningsforsøk fv 2094 september 22.-23., 2020*. Upublisert manuskript.
- Forskrift om bruk av kjøretøy. (1990). *Forskrift om bruk av kjøretøy av 25. januar 1990 nr. 92*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1990-01-25-92?q=bruk%20av%20kj%C3%B8ret%C3%B8y> (lest 06.04.2021).
- ROADEX Network. (u.å.-a). 2. *Stresses and strains in road structures*. Tilgjengelig fra: <https://www.roadex.org/e-learning/lessons/permanent-deformation/stresses-and-strains-in-road-structures/> (lest 05.02.2021).
- ROADEX Network. (u.å.-b). 3. *Water and mechanical properties of roads*. Tilgjengelig fra: <https://www.roadex.org/e-learning/lessons/drainage-of-low-volume-roads/water-and-mechanical-properties-of-roads/> (lest 05.02.2021).
- ROADEX Network. (u.å.-c). *Background*. Tilgjengelig fra: <https://www.roadex.org/background/> (lest 23.03.2021).
- Skjølaas, D. (2020). Vegslitasje fra tømmervogntog.
- Statens vegvesen. (2014a). *Skadekatalog for bituminøse vegdekker*, b. Håndbok V261. Oslo: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/69888/binary/964042?fast_title=H%C3%A5ndbok+V261+Skadekatalog+for+bitumin%C3%B8se+vegdekker+%28+MB%29.pdf.
- Statens vegvesen. (2014b). *Vegbygging*, b. Håndbok N200. Oslo: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/2364236/binary/1269980?fast_title=H%C3%A5ndbok+N200+Vegbygging+%28+MB%29.pdf.
- Statens vegvesen. (2015). *Lærebok Drift og vedlikehold av veger*, b. Rapport nr. 365. Oslo: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://hdl.handle.net/11250/2659628>.
- Statens vegvesen. (2016). *Lærebok Vegteknologi*, b. Rapport nr. 626. Oslo: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <https://hdl.handle.net/11250/2673186>.
- Statens vegvesen. (2018a). *Geoteknikk i vegbygging*, b. Håndbok V220. Oslo: Vegdirektoratet. Tilgjengelig fra: <http://hdl.handle.net/11250/2578488>.

- Statens vegvesen. (2018b). *Vegbygging*, b. Håndbok N200. Oslo: Vegdirektoratet.
Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/2364236/binary/1269980?fast_title=H%C3%A5ndbok+N200+Vegbygging+%2810+MB%29.pdf.
- Statens vegvesen. (2019). *Definisjonsliste for Statens vegvesens håndbøker*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/om-handbokene/vegnormalene/definisjoner> (lest 17.02.2021).
- Statens vegvesen. (2020a). *Kommunikasjonsplan*. Prøveordning for tømmervogntog inntil 74 tonn: Statens vegvesen.
- Statens vegvesen. (2020b). *Modulvogntog får kjøre på flere veier*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/nasjonalt/modulvogntog-far-kjore-pa-flere-veier> (lest 11.05.2021).
- Statens vegvesen. (2021a). *Feltundersøkelser*, b. Håndbok R211. Oslo: Vegdirektoratet.
Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/111560/binary/1393759?fast_title=H%C3%A5ndbok+R211+Feltunders%C3%B8kelser+%2815+MB%29.pdf.
- Statens vegvesen. (2021b). *Veistandard og antall akslinger har stor betydning for veiens bæreevne*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/lokalt/innlandet/veistandard-og-antall-akslinger-har-stor-betydning-for-veiens-baareevne> (lest 11.05.2021).
- Swedish National Road and Transport Research Institute. (2021a). *Pavement design models for roads*. Tilgjengelig fra: <https://www.vti.se/en/research/highway-engineering-and-maintenance/pavement-technology/pavement-design-models-for-roads> (lest 01.06.2021).
- Swedish National Road and Transport Research Institute. (2021b). *Project: ERAPave PP*. Tilgjengelig fra: <https://www.vti.se/en/research/highway-engineering-and-maintenance/pavement-technology/project-erapave-pp> (lest 01.06.2021).
- Saarenketo, T. (2019). *Effect of high capacity vehicles on pavements - result from the Finnish field tests*.
- Thoresen, C. (2020). *Oppsummering av litteraturgjennomgang: Statens vegvesen*. Upublisert manuskript.
- Varin, P. & Saarenketo, T. (2014). *Effect of axle and tyre configurations on pavement durability - a prestudy*. Rapport fra ROADEX Network 2014. Tilgjengelig fra: http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/10/ROADEX_Axle_Tyre_Prestudy_15102014%20Final.pdf (lest 23.02.2021).
- Yideti, T. (2018a). *Forsterkning av veier*. Ås: Statens vegvesen (Forelesning 11.10.2018).
- Yideti, T. (2018b). *Vegens oppbygning*. Ås: Statens vegvesen (Forelesning 06.09.2018).

Vedlegg 2 – Innveingsdata kjøretøy belastningsforsøk 1 og 2

Alle tallverdier er angitt i kg.

Belastningsforsøk 1

	Bil		Totalt	Tilhenger		Totalt	Korreksjon kran	Egenvekt		Totalt	Nyttelast
	Framaksel	Bakaksel		Framaksel	Bakaksel			Bil	Tilhenger		
60-1	7 860	18 420	26 280			34 280		15 995	6 620	22 615	37 945
60-2	8 480	17 460	25 940	17 100	17 320	34 420	3 000	12 175	6 100	21 275	39 085
60-3	8 660	17 620	26 280	16 380	17 660	34 040	3 000	12 625	6 400	22 025	38 295
60-4	7 660	18 040	25 700	16 380	18 280	34 660	1 000	14 461	6 460	21 921	38 439
60-5	7 240	19 200	26 440	14 880	18 460	33 340		15 025	7 160	22 185	37 595
Gj.snitt	7 980	18 148	26 128	16 185	17 930	34 148		14 056	6 548	22 004	38 272
74-1	7 860	23 580	31 440	18 380	24 000	42 380		16 245	7 380	23 625	50 195
74-2	8 120	23 900	32 020	17 160	25 120	42 280		16 475	7 100	23 575	50 725
74-3	8 220	23 840	32 060	17 820	23 180	41 000		15 735	6 960	22 695	50 365
74-4	6 360	24 640	31 000	17 860	24 060	41 920		17 275	6 860	24 135	48 785
Gj.snitt	7 640	23 990	31 630	17 805	24 090	41 895		16 433	7 075	23 508	50 018

Belastningsforsøk 2

	Bil		Totalt	Tilhenger		Totalt	Totalvekt
	Framaksel	Bakaksel		Framaksel	Bakaksel		
60-1	7 440	18 520	25 960	17 160	16 800	33 960	59 920
60-2	8 020	17 580	25 600	15 140	18 900	34 040	59 640
60-3	7 840	18 320	26 160	15 460	18 420	33 880	60 040
60-4	8 120	18 100	26 220	16 180	18 040	34 220	60 440
60-5	8 400	18 200	26 600	14 560	18 980	33 540	60 140
Gj.snitt	7 964	18 144	26 108	15 700	18 228	33 928	60 036
74-1	6 980	25 000	31 980	18 720	23 840	42 560	74 540
74-2	7 160	24 460	31 620	19 360	21 960	41 320	72 940
74-3	8 380	24 040	32 420	16 860	25 040	41 900	74 320
74-4	8 580	23 620	32 200	18 420	23 500	41 920	74 120
Gj.snitt	7 775	24 280	32 055	18 340	23 585	41 925	73 980



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway