

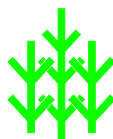
Vegslitasje fra tømmervogntog



**En sammenligning av vegslitasje fra 7-, 8- og 9-akslede
tømmervogntog gjennom modellberegninger**

Dag Skjølaas

Norges Skogeierforbund



Mai 2020

Sammendrag

Det er gjennomført modellberegninger for å sammenligne hvor mye ulike typer tømmervogntog sliter på vegnettet. Sammenligningen er gjort ved hjelp av det danske Vejdirektoratets modell for vegslitasje fra tunge kjøretøy.

Beregningene er gjennomført for alle kombinasjoner av tre- og fire-akslede tømmerbiler og fire- og fem-akslede tømmerhengere. For vogntog med åtte og ni aksler er det lagt til grunn at tillatte totalvekter kan økes, og at vogntogene lastes i tråd med gjeldende aksellastbestemmelser.

Modellberegningene viser at bruk av tømmervogntog med åtte og ni aksler vil gi mindre slitasje på vegnettet enn sju-akslede vogntog selv om totalvektene økes. Både på sterke og svake veier viser beregningene at ni-akslede vogntog gir minst slitasje per transportert enhet. Sju-akslede vogntog kommer dårligst ut.

De sju-akslede tømmervogntogene som har blitt brukt i mer enn 30 år, er blant de mest vegvennlige vogntog som går på det norske vegnettet. Det skyldes at de har mange aksler, at de har tvillinghjul på alle aksler unntatt forakselen, og at kjøretøyene har lav egenvekt og dermed høy andel nyttelast. Modellberegningene som er gjennomført viser at tømmervogntog med åtte og ni aksler er enda mer vegvennlige. En innfasing av åtte- og ni-akslede tømmervogntog skal dermed gi mindre slitasje på vegnettet.

Resultatet fra modellberegningene samsvarer godt med konklusjonene fra prosjektet Bedre utnyttelse av vegens bæreevne, BUAB, som Statens vegvesen gjennomførte på 1990-tallet (Senstad 1994). Ni-akslede tømmervogntog er utformet i tråd med anbefalingene som BUAB-prosjektet har gitt for å oppnå vegvennlige kjøretøy.

Den såkalte pumpeeffekten er et fenomen som ikke blir hensyntatt i den modellen som er benyttet. Hvor mye pumpeeffekten betyr har man i dag ikke tilstrekkelig kunnskap til å si. Pumpeeffekten framstår derfor som det gjenværende usikkerhetsmomentet rundt nedbrytning av vegnettet fra tømmervogntog med åtte og ni aksler.

Innhold

| | |
|---|----|
| Sammendrag | 3 |
| Innhold | 4 |
| Innledning..... | 6 |
| Modell og forutsetninger | 7 |
| Beregningsmodellen | 7 |
| De ulike parameterne | 8 |
| Antall aksler og akselavstander | 8 |
| Hjulmontasje og dekkbredde..... | 8 |
| Fjæringssystem | 9 |
| Dekktrykk | 9 |
| En sammenligning av to ulike biler og to ulike tilhengere | 11 |
| Andre forutsetninger | 13 |
| Sterke og svake veger | 13 |
| De ulike vogntogenes totalvekter | 13 |
| Fordeling av vekt mellom aksler | 14 |
| Resultater | 15 |
| Sterke veger..... | 15 |
| Vegslitasje per lass | 15 |
| Vegslitasje per transportert tonn | 16 |
| Svake veger | 17 |
| Vegslitasje per lass | 17 |
| Vegslitasje per transport tonn | 18 |
| Følsomhetsanalyser | 19 |
| Vektfordeling på 3-akslet tømmerbil | 20 |
| Vektfordeling på 4-akslet tilhenger | 21 |
| Vektfordeling mellom bil og tilhenger i et 7-akslet vogntog | 22 |
| Vektfordeling i tridemboggi på 4-akslet bil..... | 23 |
| Sterke veger..... | 23 |
| Svake veger..... | 24 |
| Enkeltmonterte hjul på tilhengeren | 25 |
| Sterke veger..... | 25 |
| Svake veger..... | 26 |

| | |
|--|----|
| Kjøring med overlaster på svake veier | 27 |
| Diskusjon | 28 |
| Tridem på 4-akslede biler | 28 |
| Trippelboggi vs. langboggi på tilhengeren..... | 29 |
| Svake veier | 29 |
| Sterke veier | 30 |
| Enkeltmonterte vs. tvillingmonterte hjul | 31 |
| Vegvennlighet | 32 |
| Åttende eller tiende potens?..... | 32 |
| Lastfyllingsgrad | 32 |
| Pumpeeffekten | 33 |
| Oppsummering av resultater | 34 |
| Referanser | 35 |

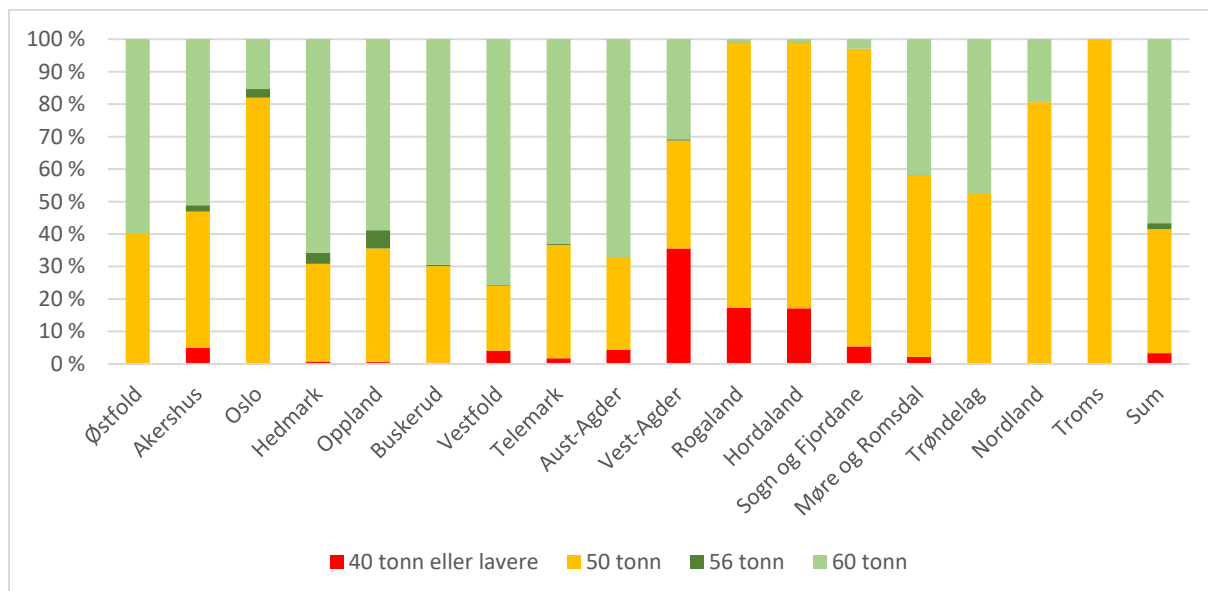
Innledning

En stor del av kostnadene i skognæringen er knyttet til transport, og for å effektivisere transporten har utviklingen over tid gått mot bruk av lengre og tyngre vogntog.

Tillatt totalvekt for tømmervogntog i Norge ble økt til 60 tonn i 2013. Det skjedde omtrent samtidig med at Finland økte tillatt totalvekt til 76 tonn. Etter 10 år med ulike prøveprosjekter, ble tillatt totalvekt økt til 74 tonn i Sverige i 2018. Parallelt med innfasingen av 8- og 9-akslede vogntog i Sverige, skal det gjennomføres en prøveordning med tømmervogntog med totalvekt opp til 74 tonn i Norge.

Ved planlegging og gjennomføring av en slik prøveordning er det viktig å nyttiggjøre seg den kunnskap som finnes, samt erfaringer fra andre land. Vegslitasje er et sentralt tema, og denne rapporten beskriver en studie som er gjennomført for å belyse hvordan forskjeller i aksel- og hjul-konfigurasjon på tømmervogntog påvirker nedbrytningen av vegnettet. Rapporten vil inngå i grunnlaget for arbeidet med vegslitasje som skal gjennomføres i forbindelse med prøveordningen.

I Sverige og Finland er innfasing av åtte- og ni-akslede tømmervogntog knyttet til økte totalvekter på veger hvor tillatt aksellast er 10 tonn. Det henger sammen med at det alt vesentlige av tømmertransporten i disse landene foregår på slike veger. I Norge begrenses lasstørrelsen på ca 40 prosent av tømmertransportene av veger hvor tillatt totalvekt er 50 tonn. Dette omfatter veger både med BkT8/50 og Bk10/50, og betyr at det fortsatt er store forskjeller mellom Norge og våre naboland Sverige og Finland på dette området.



Figur 1 Fordeling av utført tømmertransport i 2020 på bruksklasser

Vogntog med flere aksler åpner for effektivisering av transporten. På veger med BkT8 vil det være interessant å bruke åtte- og ni-akslede vogntog hvis slike kjøretøy kan tillattes for økt totalvekt. Deler av formålet med studien har derfor vært å belyse hvordan innføring av en bruksklasse T8/60 vil påvirke nedbrytningen av svake veger. Denne problemstillingen er ikke belyst i forbindelse med innføringen av økte totalvekter i Sverige og Finland.

Sammenlignet med Sverige og Finland har Norge mer kupert terreng og flere bratte veger. Hensyn til framkommelighet og sikkerhet tilsier derfor at det kan være riktig å velge litt andre løsninger i Norge enn i våre naboland. For å få et best mulig grunnlag for å vurdere ulike løsninger er det valgt å sammenligne alle kombinasjoner av tre- og fire-akslede tømmerbiler og fire- og fem-akslede tømmertilhengere både på sterke og svake veger.

Modell og forutsetninger

Beregningsmodellen

Analysen bygger på modellberegninger etter det danske Vejdirektoratets modell for vegslitasje fra tunge kjøretøyer. Modellen er beskrevet i Report nr. 08/2008 fra Nordiska Vägtekniske Förbundet (Hjort et al 2008).

Formelen som beskriver nedbrytningen av vegnettet er en variant av fjerdepotensregelen. Fjerdepotensregelen sier at nedbrytningen varierer med fjerde potens av aksellasten. I tillegg inneholder formelen flere parametere som korrigerer for andre forhold enn aksellast som også påvirker nedbrytningen av vegnettet. Gjennom denne formelen regnes belastningen fra et gitt kjøretøy om til antall ekvivalente ti-tonnsaksler.

Formelen ser slik ut

$$ESAL_{10} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{A_i B_{ij} C_i D_{ij}}{m_i} \left(\frac{p_{ij}}{5} \right)^4$$

der

n = antall akselgrupper

m = antall aksler i hver akselgruppe

A = en parameter for antall aksler og for avstanden mellom akslene i hver akselgruppe

B = en parameter for hjulmontasje og dekkbredde

C = en parameter for fjæringssystem

D = en parameter for dekktrykk

p = aksellast

De ulike parameterne

Antall aksler og akselavstander

Parameter A er en parameter for antall aksler og for avstanden mellom akslene i hver akselgruppe.

Tabell 1 Antall aksler og akselavstander i hver akselgruppe

| Ai | Sterke veger | | | | | Svake veger |
|----------------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------|
| Antall aksler | Akselavstand (meter) | | | | | Alle akselavstander |
| | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | |
| 2 | 1,05 | 1,25 | 1,4 | 1,55 | 1,75 | 2,0 |
| 3 | | 1,5 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 3,0 |
| 4 | | 1,7 | 2,35 | 2,8 | 3,3 | 4,0 |
| 5 | | 1,9 | 2,8 | 3,4 | 4,05 | 5,0 |
| 6 | | 2,0 | 3,2 | 4,0 | 4,75 | 6,0 |
| 7 | | 2,2 | 3,6 | 4,6 | 5,45 | 7,0 |
| 8 | | 2,35 | 4,0 | 5,15 | 6,1 | 8,0 |

På sterke veger får denne parameteren som det går fram av Tabell 1, en verdi som er lavere enn antallet aksler. Det betyr at det på sterke veger er gunstig at akslene sitter tett sammen.

På svake veger er denne parameteren lik antallet aksler. På svake veger har det dermed ingen betydning hvordan akslene er plassert i forhold til hverandre. Alle aksler vektlegges likt uavhengig av hvordan de er plassert i forhold til hverandre.

I de beregningene som er gjennomført er det forutsatt at avstanden mellom akslene i boggier og trippelboggier er 1,35 meter. For sterke veger gir det parametere på hhv. 1,36 for boggier og 1,8 for trippelboggier.

Videre er det forutsatt at 4-akslede tilhengere har langboggi bak. Det betyr at avstanden mellom akslene er over 1,80 meter. Det gir en parameter på 2,0 både på sterke og svake veger. På samme måte som at en langboggi blir betraktet som to enkle aksler i forskrift om bruk av kjøretøy, blir den også betraktet som to enkle aksler i denne beregningsmodellen.

Hjulumontasje og dekkbredde

Parameter B i formelen er en parameter for hjulumontasje og dekkbredde. Gjennom denne parameteren skilles det mellom enkeltmonterte og tvillingmonterte hjul.

På aksler med tvillingmonterte hjul får denne parameteren verdien 1. Her skilles det ikke på dekkbredde.

På aksler med enkeltmonterte hjul får denne parameteren en verdi som er avhengig av bredden på dekkene jf. Tabell 2. Jo bredere dekk, jo lavere verdi får denne parameteren.

Tabell 2 Hjulkonfigurasjon og dekkbredde

| Dekkbredde (mm) | Bij |
|-----------------|------|
| 256 | 3,99 |
| 315 | 2,91 |
| 365 | 2,19 |
| 425 | 1,68 |
| 445 | 1,25 |

I beregningene er det lagt til grunn at styrende aksler har enkeltmonterte hjul, og at drivende aksler på bilen og alle aksler på tilhengeren har tvillingmonterte hjul. Det betyr at 3-akslede biler har én aksel med enkeltmonterte hjul og at 4-akslede biler har to aksler med enkeltmonterte hjul. Det er lagt til grunn at enkeltmonterte hjul har en dekkbredde på 385 mm. Dette er i dag vanlige dekk på styrende aksler. Siden det i Tabell 2 ikke er oppgitt noen egen parameter for dekkbredde 385 mm, er det brukt interpolasjon mellom verdiene for de nærmeste dekkdimensjonene. Det gir en parameter på 2,02. En parameter på 2 betyr at en aksel med enkeltmonterte hjul gir dobbelt så stor slitasje som en aksel med tvillingmonterte hjul ved like aksellaster.



Bilde 1 Dekkbredde 385 mm er vanlig på enkeltmonterte hjul

Fjæringssystem

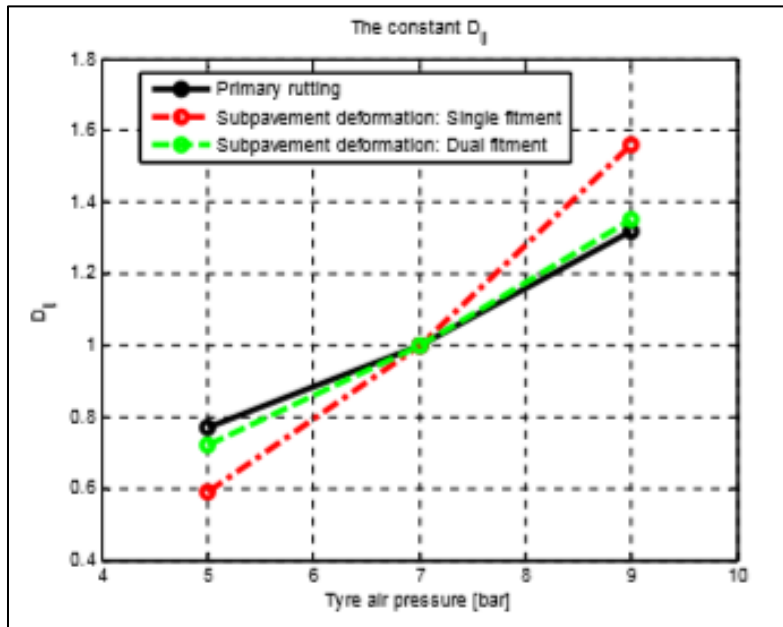
Parameter C er en parameter for kjøretøyets fjæringssystem. Med luftfjæring får denne parameteren verdien 0,95.

Siden alle tømmervogntog i dag har luftfjæring, er dette en parameter som ikke slår ut i denne sammenligningen.

Dekktrykk

Parameter D gjelder lufttrykket i dekkene.

Denne parameteren gis ulike verdier på sterke og svake veger, og avhengig av om den aktuelle akselen har enkeltmonterte eller tvillingmonterte hjul. Dekktrykket har størst betydning på aksler med enkeltmonterte hjul og på svake veger.



Figur 2 Parameter for dekktrykk

Tabell 3 angir de dekktrykk som er brukt i beregningene. Valget av disse forutsetningene bygger på anbefalinger fra Dekkmann Hamar (Lier 2019).

Tabell 3 Luftrykk i dekk

| | Luftrykk | |
|--------------------------|----------|-----|
| | Bar | Psi |
| Drivaksler og løpeaksler | 8,3 | 120 |
| Andre aksler | 9 | 130 |

Fra Figur 2 ble det lest av verdier for de dekktrykk som er aktuelle.

For sterke veger (svart linje) er det benyttet hhv. 1,3 for aksler med 9 bar og 1,2 for aksler med 8,3 bar.

For svake veger og enkeltmonterte hjul (rød linje) ble det lest av 1,56 og 1,36 som verdier for hhv. 9 og 8,3 bar. For svake veger og tvillingmonterte hjul (grønn linje) ble det lest av 1,35 og 1,21 som tilsvarende verdier.

Vegslitasje og vegvennlighet

Formelen som er benyttet gir et uttrykk for den belastningen et gitt kjøretøy påfører vegnettet gjennom antall ekvivalente ti-tonnsaksler per lass, $ESAL_{10}$.

Noen kjøretøy har vesentlig høyere nyttelast enn andre, og ved bruk av slike kjøretøy kan antallet transporter reduseres. Derfor er det alltid nødvendig å vurdere slitasje i forhold til utført transportarbeid. I denne analysen er det gjort ved å beregne forholdet mellom slitasje per lass og transportert mengde per lass for hvert enkelt kjøretøy. Det gir et uttrykk for slitasje som relaterer seg til transportert mengde, antall ekvivalente ti-tonnsaksler per transportert tonn eller $ESAL_{10}$ per tonn.

Vegvennlighet er definert som forholdet mellom medbrakt nyttelast i tonn og kjøretøyets samlede relative nedbrytende effekt (Senstad 1994). Antall ekvivalente ti-tonnsaksler per tonn er derfor et uttrykk for vegvennlighet. Jo lavere $ESAL_{10}$ per tonn er, jo mer vegvennlig vil det aktuelle kjøretøyet være.

En sammenligning av to ulike biler og to ulike tilhengere

Belastningen som et vogntog påfører vegnettet er som det går fram av den benyttede formelen, summen av belastningene fra hver enkelt akselgruppe. En sammenligning av ulike tømmervogntog kan derfor brytes ned til

- en sammenligning av tømmerbiler med tre eller fire aksler
- en sammenligning av tømmertilhengere med fire eller fem aksler

For tømmerbilene vil parameterne for forakselen være de samme uansett. Sammenligningen mellom 3- og 4-akslede tømmerbiler kan derfor brytes ned til en sammenligning av tømmerbiler med boggi og tømmerbiler med trippelboggi, eller såkalt tridemboggi.

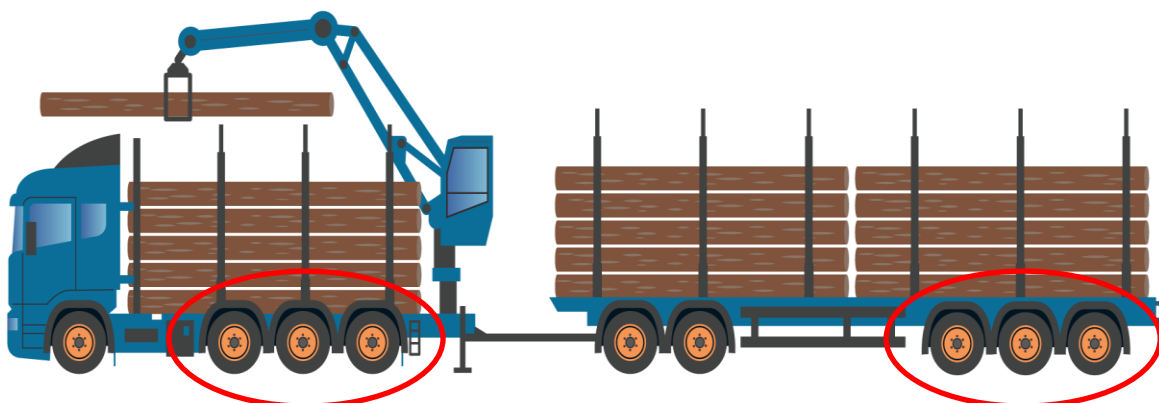
Tridemboggien på tømmerbiler har to drivende aksler med tvillingmonterte hjul. I tillegg består denne akselgruppa av én aksel med enkeltmonterte hjul som er styrbar og løftbar. Den tredje akselen kan være plassert foran (purseraksel) eller bak drivakslene (løpeaksel). En tridemboggi med løpeaksel er vist i Bilde 2.

Modellen som er brukt tar høyde for kombinasjoner av tvillinghjul og singelhjul i samme akselgruppe. Effekten av at den ene akselen i tridemboggien har enkeltmonterte hjul blir derfor hensyntatt i beregningene.



Bilde 2 Tridemboggi med løpeaksel bak drivakslene

For tilhengerens vedkommende vil parameterne for de to fremre akslene være de samme uansett. Sammenligningen mellom 4- og 5-akslede tilhengere vil derfor kunne brytes ned til en sammenligning av tilhengere med langboggi bak og tilhengere med trippelboggi bak. Alle aksler på tilhengeren vil ha tvillinghjul. De eneste parameterne som varierer er antall aksler og aksellast.



Figur 3 Sammenligningen av ulike tømmervogntog kan brytes ned til en sammenligning av biler med to eller tre aksler bak, og tilhengere med to eller tre aksler bak.

Selv om sammenligningen mellom ulike tømmervogntog kan brytes helt ned på akselgrupper, er det i denne rapporten valgt å presentere beregningsresultatene på vogtognivå. Rapporten beskriver derfor en sammenligning av ulike kombinasjoner av 3- og 4-akslede tømmerbiler og 4- og 5-akslede tømmertilhengere.

Andre forutsetninger

Sterke og svake veger

Parameterne A og D i formelen som er benyttet, har ulike verdier for sterke og svake veger.

Sterke veger er beskrevet som veger hvor slitasken arter seg som deformasjon av slitelaget.

Svake veger er veger der store belastninger også gir deformasjoner nedover i vegkroppen.

I beregningene som er gjennomført er det lagt til grunn at sterke veger er veger med Bk10 og svake veger er veger med BkT8. De laster som er brukt i beregningene er tillatte laster for hhv. enkel-, boggi- og trippelboggi-aksler i hver av disse bruksklassene.

De ulike vogntogenes totalvekter

Det er lagt til grunn at en tre-akslet tømmerbil og en fire-akslet tømmertilhenger har egenvekter på henholdsvis 16 og 6 tonn. Videre er det forutsatt at én ekstra aksel på bilen og én ekstra aksel på tilhengeren hver veier ett tonn. Dette innebærer at de ulike vogntogkombinasjonene har egenvekter fra 22 til 24 tonn.

Det er forutsatt at forakselen både på treakslede og fireakslede tømmerbiler blir belastet med 8 tonn.

Videre er det forutsatt at alle kjøretøy unntatt treakslet bil og fireakslet tilhenger blir lastet til tillatte aksellaster etter gjeldende bestemmelser. For kombinasjonen av treakslet bil og fireakslet tilhenger er det tatt hensyn til begrensningene som ligger i tillatte totalvekter på enkeltkjøretøyr på hhv. 26 og 36 tonn.

For kombinasjonen av treakslet bil og femakslet tilhenger er totalvekta på tilhengeren begrenset av 1 ½-gangsregelen.

De totalvektene som er brukt og vist i Tabell 4 inkluderer en frimargin på to tonn.

Tabell 4 Totalvekter på ulike vogntogkombinasjoner

| Kjøretøykombinasjon | Totalvekt sterk veg | Nyttelast sterk veg | Totalvekt svak veg | Nyttelast svak veg |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 3-akslet bil og 4-akslet tilhenger | 62 | 40 | 52 | 30 |
| 3-akslet bil og 5-akslet tilhenger | 65 | 42 | 55 | 32 |
| 4-akslet bil og 4-akslet tilhenger | 68 | 45 | 57 | 34 |
| 4-akslet bil og 5-akslet tilhenger | 74 | 50 | 60 | 36 |

På Bk 10 innebærer dette at totalvekta både på bil og tilhenger øker med 6 tonn når kjøretøyet utstyres med én ekstra aksel. Denne økningen tilsvarer forskjellen i dagens regelverk mellom en treakslet (26 tonn) og en fireakslet bil (32 tonn), eller mellom en boggi (18 tonn) og en trippelboggi (24 tonn). Tilsvarende for BkT8 er 5 tonn for bilen og 3 tonn for tilhengeren.

Fordeling av vekt mellom aksler

De forutsetningene som er valgt gir en vektfordeling mellom akslene som vist i Tabell 5.

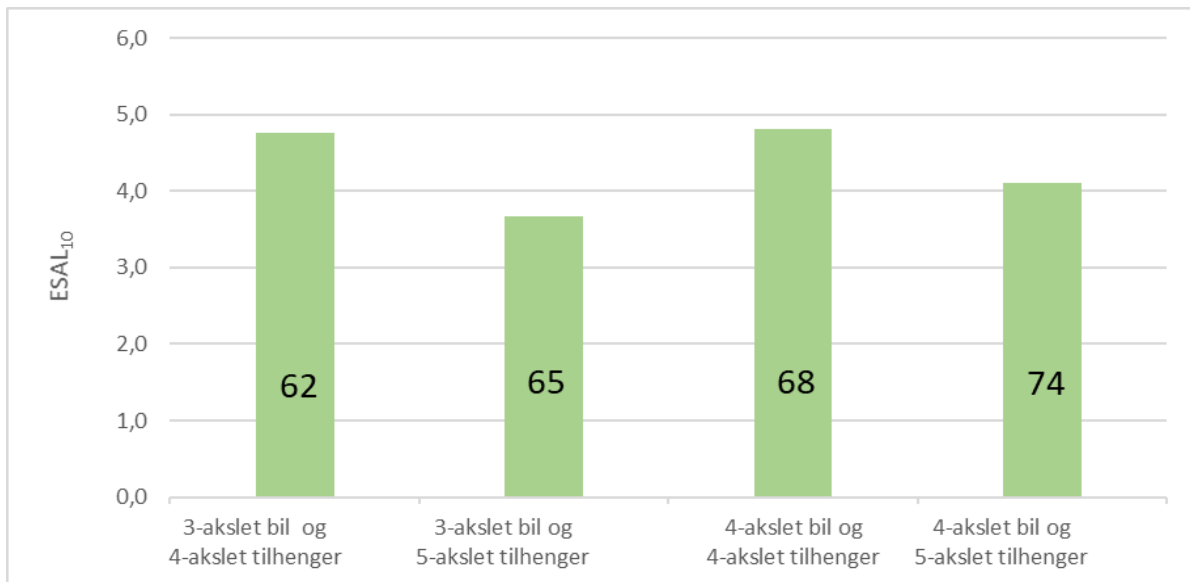
Tabell 5 Vektfordeling på ulike vogntogkombinasjoner

| Kjøretøykombinasjon | Foraksel | Bakaksler bil | Foraksler tilhenger | Bakaksler tilhenger |
|------------------------------------|----------|---------------|---------------------|---------------------|
| Sterke veger | | | | |
| 3-akslet bil og 4-akslet tilhenger | 8 | 2 x 9 | 2 x 9 | 2 x 9 |
| 3-akslet bil og 5-akslet tilhenger | 8 | 2 x 9 | 2 x 9 | 3 x 7 |
| 4-akslet bil og 4-akslet tilhenger | 8 | (2 x 9) + 6 | 2 x 9 | 2 x 9 |
| 4-akslet bil og 5-akslet tilhenger | 8 | (2 x 9) + 6 | 2 x 9 | 3 x 8 |
| Svake veger | | | | |
| 3-akslet bil og 4-akslet tilhenger | 8 | 2 x 7 | 2 x 7 | 2 x 8 |
| 3-akslet bil og 5-akslet tilhenger | 8 | 2 x 7 | 2 x 7 | 3 x 6,3 |
| 4-akslet bil og 4-akslet tilhenger | 8 | (2 x 7) + 5 | 2 x 7 | 2 x 8 |
| 4-akslet bil og 5-akslet tilhenger | 8 | (2 x 7) + 5 | 2 x 7 | 3 x 6,3 |

Resultater

Sterke veger

Vegslitasje per lass



Figur 4 Vegslitasje per lass på sterke veger

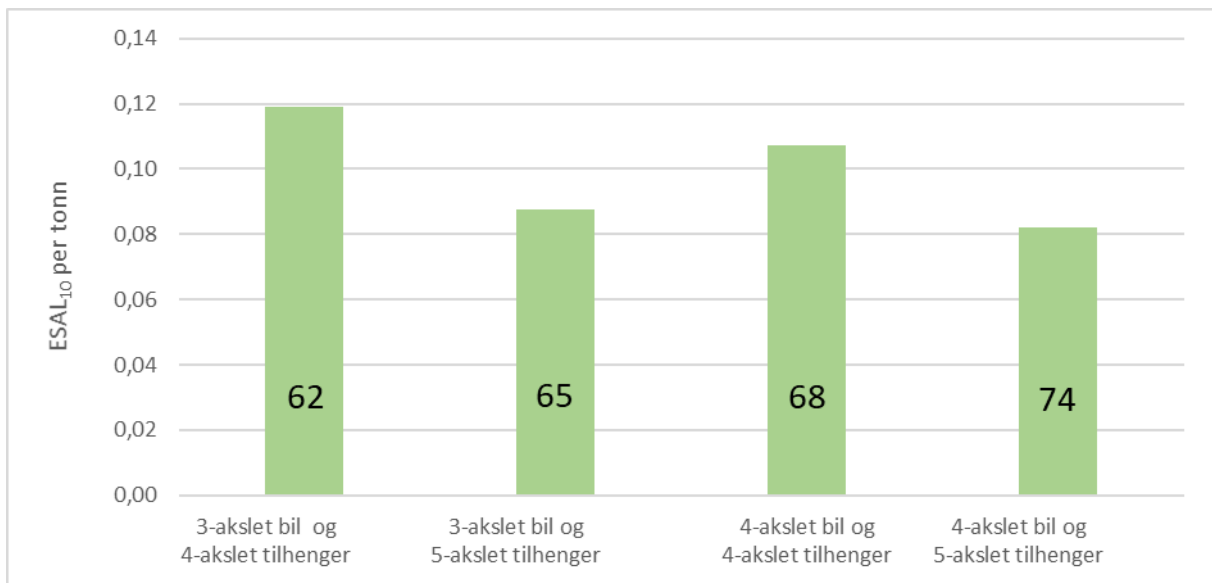
Figur 4 viser hvordan ett lass av hver av de ulike vogntogkombinasjonene belaster vegnettet.

Når man sammenligner de to vogntogkombinasjonene med 4-akslet tilhenger, ser man at en 4-akslet bil gir marginalt høyere slitasje per lass enn en 3-akslet bil. Forskjellene er veldig små sett i forhold til at nyttelasten på bilen isolert sett øker fra 10 til 15 tonn.

Begge varianter med 5-akslet tilhenger gir vesentlig lavere belastning på vegnettet enn variantene med 4-akslet tilhenger selv om nyttelasten er høyere.

Når man sammenligner vogntog med 3-akslet bil og 5-akslet tilhenger med 4-akslet bil og 5-akslet tilhenger, er forskjellene større. Det skyldes at den 5-akslede tilhengeren som går sammen med den 3-akslede bilen ikke er lastet til maksimale aksellaster. Her begrenser 1 1/2-gangsregelen tilhengerens totalvekt til 39 tonn.

Vegslitasje per transportert tonn



Figur 5 Vegslitasje per transportert tonn på sterke veger

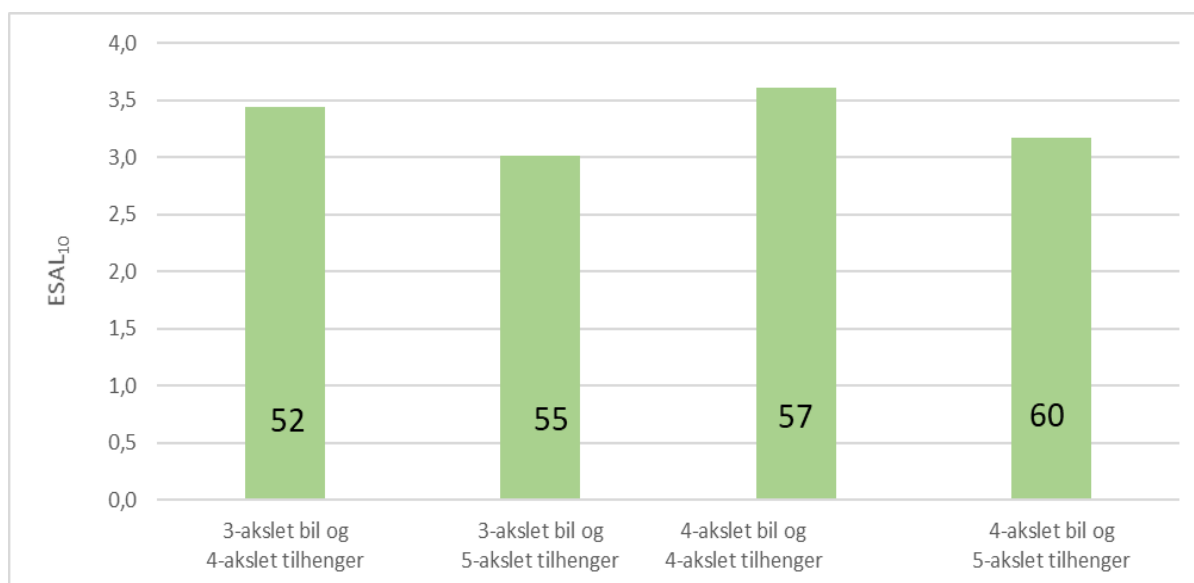
Figur 5 viser belastningen fra de ulike vogntog-kombinasjonene per transportert tonn på sterke veger. Når det tas hensyn til transportert mengde, viser beregningene at vogntog bestående av 4-akslede biler og 5-akslede tilhengere gir minst slitasje på vegnettet. Vogntog med 3-akslet biler og 4-akslede tilhengere gir mest slitasje.

Mens Figur 4 viser at vogntog med 3-akslede biler gir marginalt lavere slitasje per lass enn vogntog med 4-akslede biler, viser Figur 5 at dette forholdet blir snudd når det tas hensyn til det transportarbeidet som utføres. Det skyldes at en 4-akslet bil har 50 % høyere nyttelast enn en 3-akslet bil på sterke veger (Bk10).

Når en sammenligner 4- og 5-akslede tilhengere viser Figur 4 og Figur 5 at 5-akslede tilhengere gir mindre slitasje enn 4-akslede tilhengere både når en sammenligner ett og ett lass, og når en ser slitasjen i forhold til utført transportarbeid.

Svake veger

Vegslitasje per lass



Figur 6 Vegslitasje per lass for svake veger

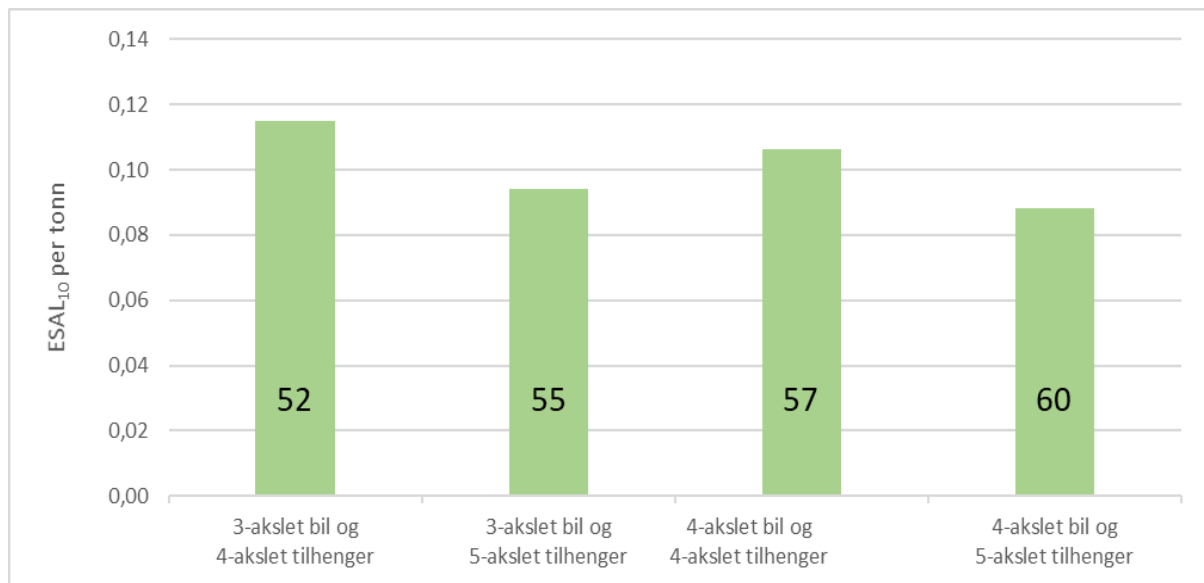
Figur 6 viser hvilken belastning ett lass fra hver av de ulike vogntogkombinasjonene påfører svake veger.

På samme måte som på sterke veger er det kombinasjonen med 4-akslet bil og 4-akslet tilhenger som gir størst belastning på vegnettet per lass. Kombinasjonen med 3-akslet bil og 5-akslet tilhenger gir minst belastning per lass.

Vogntog-kombinasjoner med 4-akslede biler gir litt økt belastning på vegnettet per lass sammenlignet med vogntog med 3-akslede biler, men det må sees i sammenheng med at nyttelasten på bilen i dette tilfellet øker fra 6 til 10 tonn, dvs. med 67 %

Begge vogntog-kombinasjoner med 5-akslet tilhenger gir mindre belastning på vegnettet enn vogntog med 4-akslet tilhenger selv om nyttelasten er høyere.

Vegslitasje per transport tonn



Figur 7 Vegslitasje per transportert tonn på svake veger

Figur 7 viser belastningen fra de ulike vogntogkombinasjonene per transportert tonn på svake veger. Når det tas hensyn til transportert mengde, viser beregningene at vogntog bestående av 4-akslet bil og 5-akslet tilhenger gir minst slitasje på vegnettet. Vogntog med 3-akslet bil og 4-akslet tilhenger gir mest slitasje.

Mens Figur 6 viser at vogntog med 4-akslede biler gir litt økt belastning på vegnettet per lass sammenlignet med vogntog med 3-akslede biler, viser Figur 7 at dette forholdet igjen blir snudd når det tas hensyn til den økte nyttelasten på 4-akslede biler.

Når en sammenligner 4- og 5-akslede tilhengere viser Figur 6 og Figur 7 at 5-akslede tilhengere gir mindre slitasje enn 4-akslede tilhengere både når en sammenligner ett og ett lass, og når en ser slitasjen i forhold til utført transportarbeid.

Følsomhetsanalyser

Forutsetningene som ligger til grunn for de beregningene som er gjennomført, er i stor grad gitt. Det henger sammen med at de fleste vogntogkombinasjoner er lastet til maksimale aksellaster med unntak for forakselen. På forakselen er det forutsatt 8 tonn i alle kombinasjoner.

For vogntog med 3-akslet bil og 4-akslet tilhenger er summen av tillatte aksellaster høyere enn tillatt totalvekt både for vogntoget som helhet og for begge enkeltkjøretøyene. På denne varianten har det derfor vært nødvendig å gjøre et valg i forhold til forutsetninger. Det er valgt å legge hovedreglene i bestemmelsene om tillatte vekter på aksler og akselkombinasjoner til grunn. Derfor er det brukt en vektfordeling med 8 tonn på foraksel og 18 tonn på boggi på 3-akslet bil. Her kunne det f.eks. vært brukt en vektfordeling med 7 tonn på foraksel og 19 tonn på boggi.

På 4-akslet tilhenger er det tillatt å laste 18 tonn på fremre akselgruppe og 20 på bakre akselgruppe, men tillatt totalvekt på tilhengeren som enkeltkjøretøy er 36 tonn. I beregningene som er presentert foran er det valgt å bruke en vektfordeling med 18 tonn både på fremre akselgruppe og på langboggien bak. Her kunne man brukt en fordeling med 16 tonn på fremre akselgruppe og 20 tonn på langboggien bak eller en mellomløsning.

Ut fra hensyn til framkommelighet og sikkerhet på bratte veger er det ønskelig å ha en tyngre bil og heller en litt lettere tilhenger. Det kan oppnås gjennom bruk av 4-akslede tømmerbiler, men noen ønsker også at tillatte vekter for 3-akslede biler økes til 28 tonn. For at modellberegningene skal gi et helhetlig bilde i forhold til valg av utviklingsretning, er det valgt å inkludere beregninger som viser hvordan endret vektfordeling mellom bil og tilhenger vil slå ut på vegslitasje.

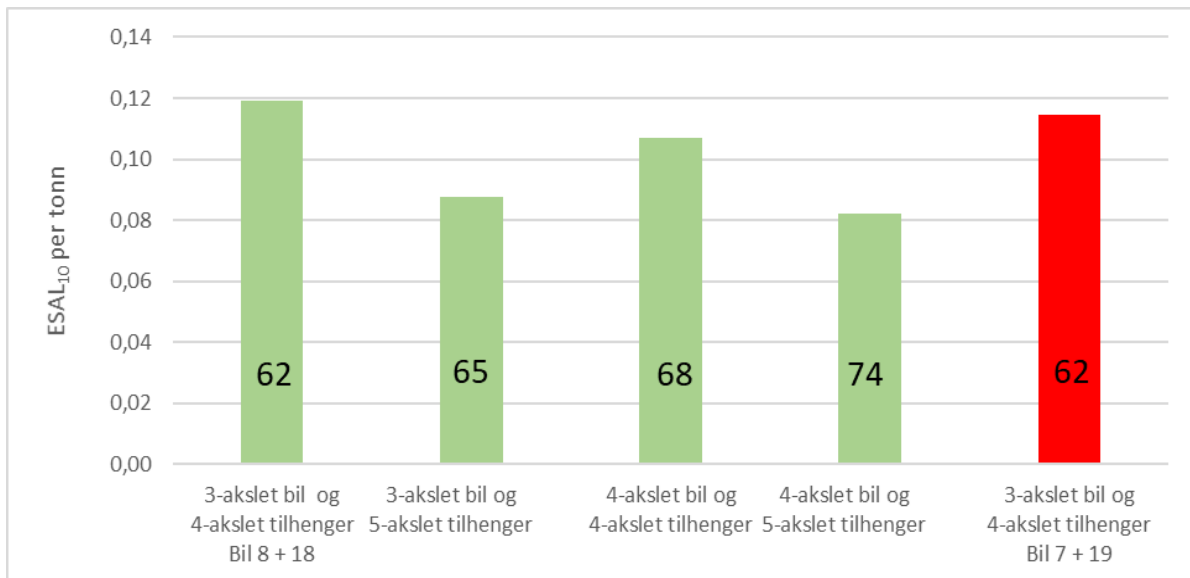
På en 4-akslet bil vil bakre akselgruppe bestå av et tridem. I tridemet er det lagt til grunn en vektfordeling med 9 tonn på drivende aksler og 6 tonn på løpeakselen på sterke veger. Her kunne man f.eks. valgt å belaste alle akslene likt med 8 tonn hver.

På svake veger er det valgt å bruke en vektfordeling i tridemet med 7 tonn på drivende aksler og 5 tonn på løpeaksel. Også her kunne man valgt å fordele vekta likt med 6,3 tonn på hver aksel.

Tømmervogntog består normalt av biler og tilhengere hvor det er tvillingsmonterte hjul på alle aksler unntatt de som er styrende. På tilhengeren er det imidlertid tillatt å bruke enkeltmonterte hjul. For å vise hvordan enkeltmonterte hjul slår ut på vegslitasje, er det valgt å gjennomføre beregninger hvor et 7-akslede vogntog med enkeltmonterte hjul på tilhengeren sammenlignes med alle vogntog-kombinasjonene med tvillingmonterte hjul. Sammenligningen er gjort både for sterke og svake veger.

Vektfordeling på 3-akslet tømmerbil

I beregningene er det i utgangspunktet lagt til grunn at tømmerbilen har 8 tonn på forakselen og 18 tonn på drivakslene, til sammen 26 tonn. Siden det er lovlig å ha 19 tonn på drivakslene når de er utstyrt med tvillingmonterte hjul og luftfjæring, kunne man i stedet valgt en fordeling med 7 tonn på forakselen og 19 tonn på drivakslene.



Figur 8 Vektfordeling på tømmerbilen

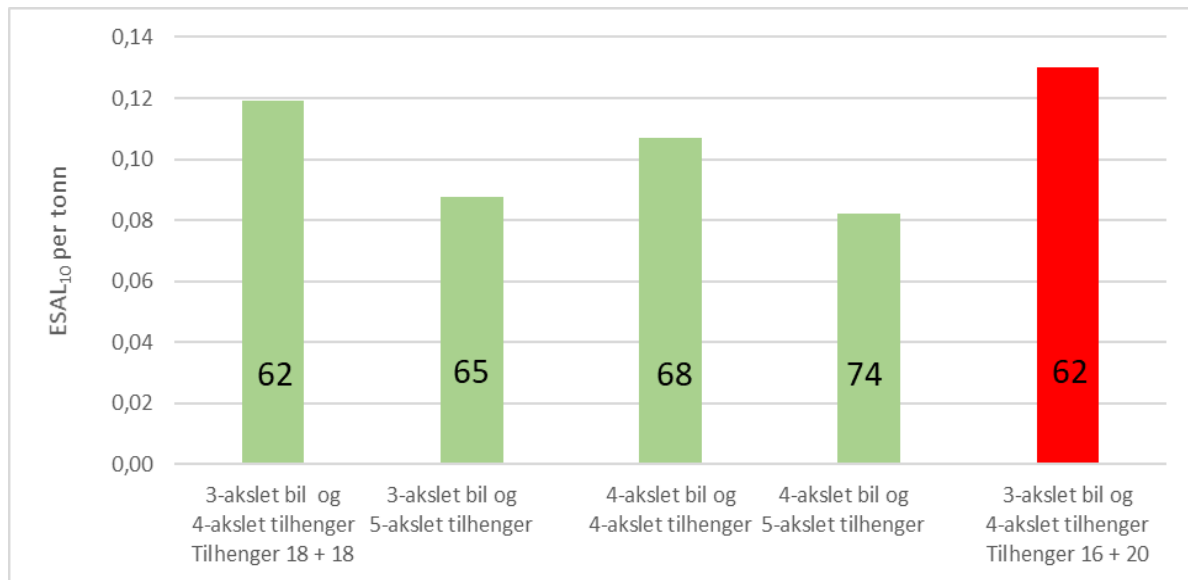
Figur 8 viser at en slik endring av vektfordelingen på tømmerbilen er gunstig med tanke på vegslitasje. Beregningene viser at slitasjen da reduseres med 4 %.

En uttesting av ulike alternativer i beregningsmodellen viser også at 7 tonn på forakselen og 9,5 tonn tonn på hver av drivakslene er optimal vektfordeling på en 3-akslet tømmerbil med totalvekt 26 tonn. For å minimalisere vegslitasjen viser altså beregningene at det er optimalt å ha 2,5 tonn lavere aksellast på forakselen enn på drivakslene, og det skyldes at forakselen har enkeltmonterte hjul mens drivakslene har tvillingmonterte hjul.

Selv om en endring av vektfordelingen på den 3-akslede bilen slår positivt ut med tanke på vegslitasje fra det 7-akslede vogntoget, viser Figur 8 at det 7-akslede vogntoget fortsatt kommer dårligere ut enn alle de andre kombinasjonene som inngår i sammenligningen.

Vektfordeling på 4-akslet tilhenger

Modellberegningene bygger på forutsetningen om at totalvekta på en 4-akslet tømmertilhenger er fordelt likt med 9 tonn på hver aksel, til sammen 36 tonn. Siden det er lovlig å ha 10 tonn på enkle aksler, kunne man i stedet valgt å fordele vekta med 16 tonn på boggien foran og 20 tonn på langboggien bak.



Figur 9 Vektfordeling på tømmertilhengeren

Figur 9 viser hvordan dette vil slå ut. En slik endring vil gi økt slitasje, og beregnet økning er 9 %. Med denne vektfordelingen kommer det 7-akslede vogntoget enda dårligere ut sammenlignet med de andre kombinasjonene.

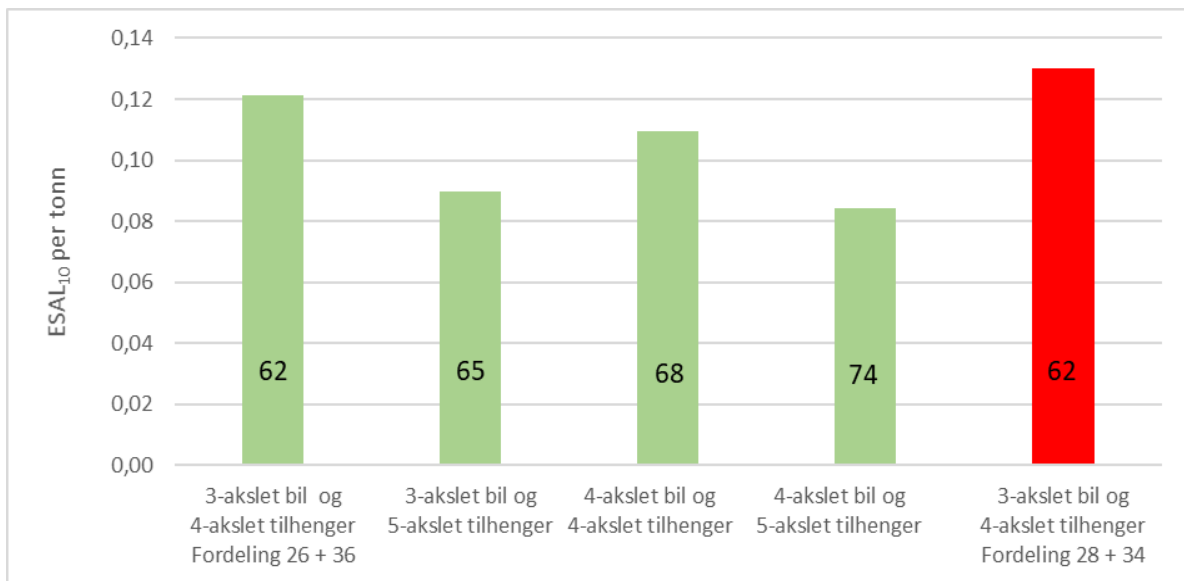
På sterke vegger som dette eksemplet gjelder, er det gunstig at akslene sitter samlet i akselgrupper jf. Tabell 1. Med like aksellaster gir en vanlig boggi med akselavstander på 1,35 meter 30 % mindre nedbrytning av vegnettet enn en langboggi med akselavstander over 1,80 meter. Dermed vil belastningen på vegnettet øke når mer av vekta på tilhengeren overføres til langboggien.

Teoretisk sett er det optimalt å fordele mer av tilhengerens vekt på boggien foran enn på langboggien bak. På de fleste tilhengere er imidlertid akslene plassert slik at man normalt får litt høyere aksellaster bak enn foran på tilhengeren. Resultatet som er vist i Figur 9 kan derfor være like realistisk som de resultatene som forutsetter lik vektfordeling mellom akslene på tilhengeren.

Beregningene og vurderingene som er knyttet til 4-akslet tilhenger er relevante både når slik tilhenger brukes sammen med 3-akslet og 4-akslet bil.

Vektfordeling mellom bil og tilhenger i et 7-akslet vogntog

Modellberegningene bygger på forutsetningen om at tillatte totalvekter for enkeltkjøretøy er hhv. 26 tonn for den 3-akslede tømmerbilen og 36 tonn for den 4-akslede tømmertilhengeren. Av hensyn til framkommelighet kan det imidlertid være ønskelig å øke vekta på bilen og heller redusere vekta på tilhengeren, og noen ønsker en slik endring av regelverket. Derfor er det gjennomført beregninger som viser hvordan en slik endring vil slå ut med hensyn til vegslitasje. Forutsetningene for disse beregningene er at bilens foraksel har 9 tonn og drivakslene 9,5 tonn hver. På tilhengeren er det forutsatt 17 tonn både på boggien foran og på langboggien bak.



Figur 10 Vektfordeling mellom bil og tilhenger

Figur 10 viser hvordan en endring av vektfordelingen mellom bil og tilhenger på et 7-akslet tømmervogntog vil slå ut. Dersom to tonn overføres fra tilhengeren til bilen, vil det som Figur 10 viser gi økt slitasje. Beregnet økning er 6 %.

Rabbira Garba Saba (2018) i Statens vegvesen har ved hjelp av en tilsvarende modell beregnet en økning på 5 %. Garba Saba (2019) opplyser at han har benyttet de svenske vegmyndighetenes modell hvor det ikke skilles mellom enkeltmonterte og tvillingmonterte hjul. Dermed er det naturlig at hans beregninger viser litt mindre forskjeller.

Både beregningene som denne rapporten beskriver og Garba Saba (2018) sine beregninger viser at en vektfordeling med 28 tonn på bilen og 34 tonn på tilhengeren er ugunstig med tanke på vegslitasje. Det skyldes at vekta på forakselen som har enkeltmonterte hjul, blir såpass høy.

Vektfordeling i tridemboggi på 4-akslet bil

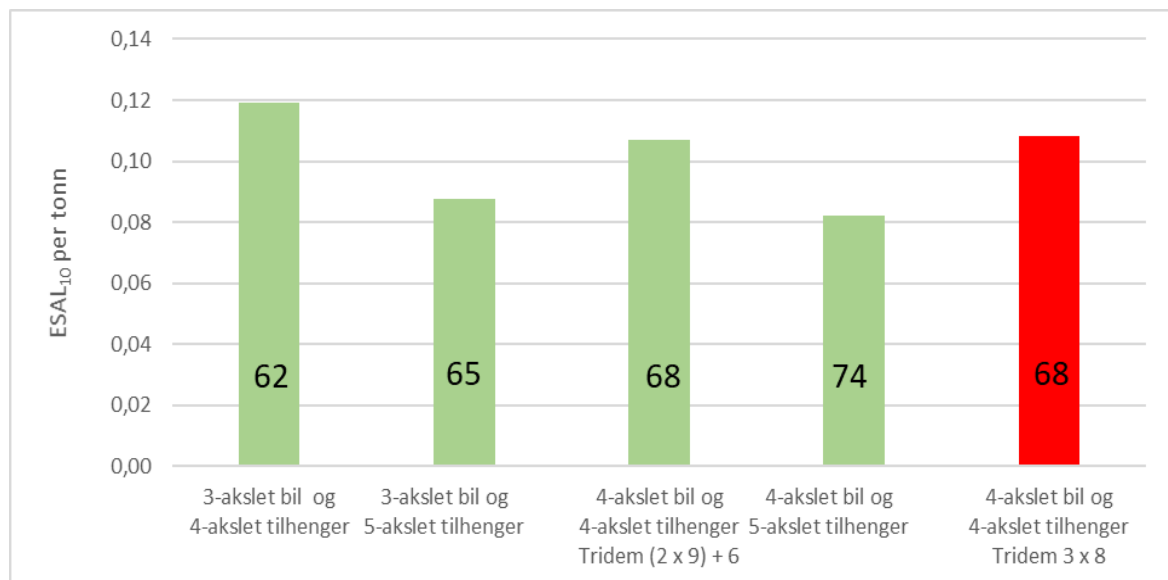
En tridemboggi er en trippelakselgruppe med to drivende aksler med tvillingmonterte hjul og én styrbar og løftbar løpeaksel med enkeltmonterte hjul. Fordelingen av vekter mellom de tre akslene i denne trippelboggien vil være avhengig av hvordan kjøretøyet blir lastet. I tillegg er det mulig å påvirke fordelingen gjennom innstillinger i kjøretøyenes datasystemer. Siden løpeakselen har enkeltmonterte hjul er det i beregningene valgt å bruke noe lavere aksellaster på denne akselen.

Forutsetningen for fordeling av vektene er at de to drivende akslene ikke skal ha høyere aksellaster enn det som er tillatt i en boggiakselgruppe.

Sterke veger

Tillatte laster på en trippelboggi på bruksklasse 10 er 24 tonn. Drivakslene som har tvillingmonterte hjul, kan ha aksellaster opp til 9,5 tonn hver, til sammen 19 tonn.

De utførte beregningene tar utgangspunkt i en fordeling av vektene i tridemboggien med 9 tonn på hver av drivakslene og 6 tonn på løpeakselen. Her kunne man ha forutsatt vekter ned til 5 tonn eller opp til 8 tonn på løpeakselen. For å vise hvordan dette slår ut, er det derfor gjennomført beregninger med like aksellaster på de 3 akslene i tridemet dvs. 3 x 8 tonn.



Figur 11 Endret vektfordeling i tridem på sterke veger

Figur 11 viser at en endring av vektfordelingen i tridemet fra (2 x 9) + 6 tonn til 3 x 8 tonn har liten betydning. Beregnet økning er 1 %.

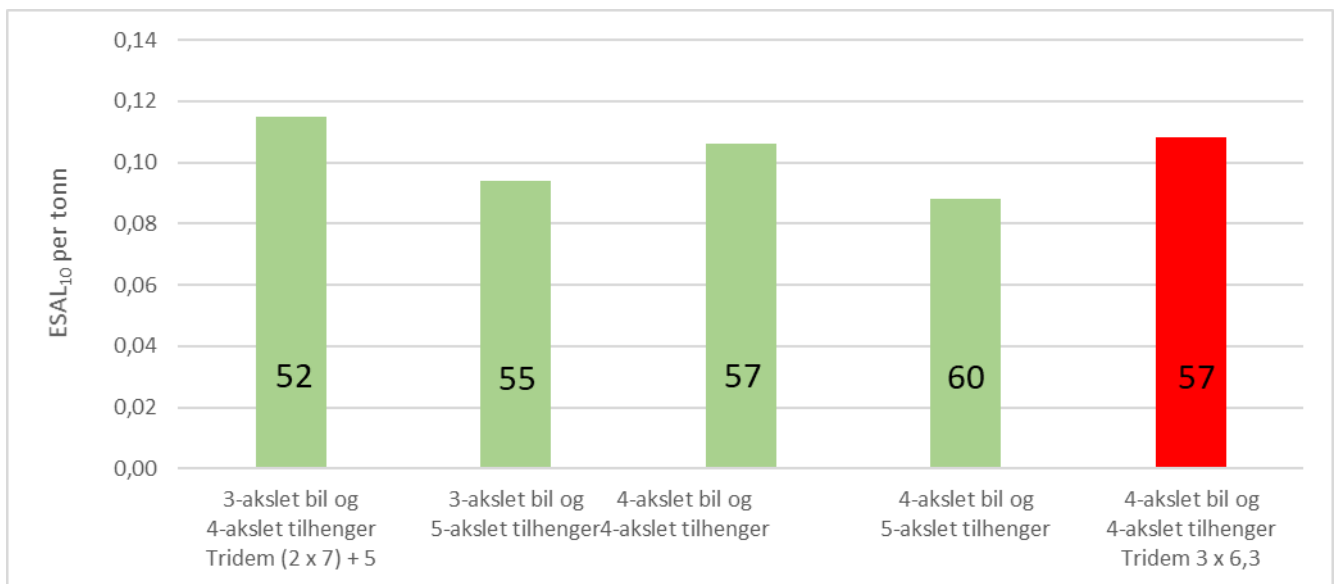
En simulering for å finne optimal vektfordeling viser et teoretisk optimum ved 8,6 tonn på hver av drivakslene og 6,8 tonn på løpeakselen. Også i dette tilfellet er det optimalt å ha omlag to tonn lavere last på aksler med enkeltmonterte enn aksler med tvillingmonterte

hjul. Forskjellen mellom det alternativet som gir høyest belastning på vegnettet (2 x 9,5) + 5 og det optimale er imidlertid ikke mer enn 3 %. Fordelingen av vektor innad i en tridemboggi ser dermed ut til å ha forholdsvis liten betydning.

Svake veger

Tillatte laster på en trippelboggi på bruksklasse T8 er 19 tonn. Drivakslene som har tvillingmonterte hjul, kan ha aksellaster opp til 7 tonn, til sammen opp til 14 tonn.

Beregningene tar utgangspunkt i en fordeling i tridemboggien med 7 tonn på hver av drivakslene og 5 tonn på løpeakselen. Her kunne man ha forutsatt like aksellaster på de 3 akslene i tridemboggien dvs. 3 x 6,3 tonn.



Figur 12 Endret vektfordeling i tridem på svake veger

Figur 12 viser hvordan en endring av vektfordelingen i tridemboggien fra (2 x 7) + 5 til 3 x 6,3 tonn slår ut på svake veger. Med lik belastning på alle tre akslene øker belastningen med 2 %.

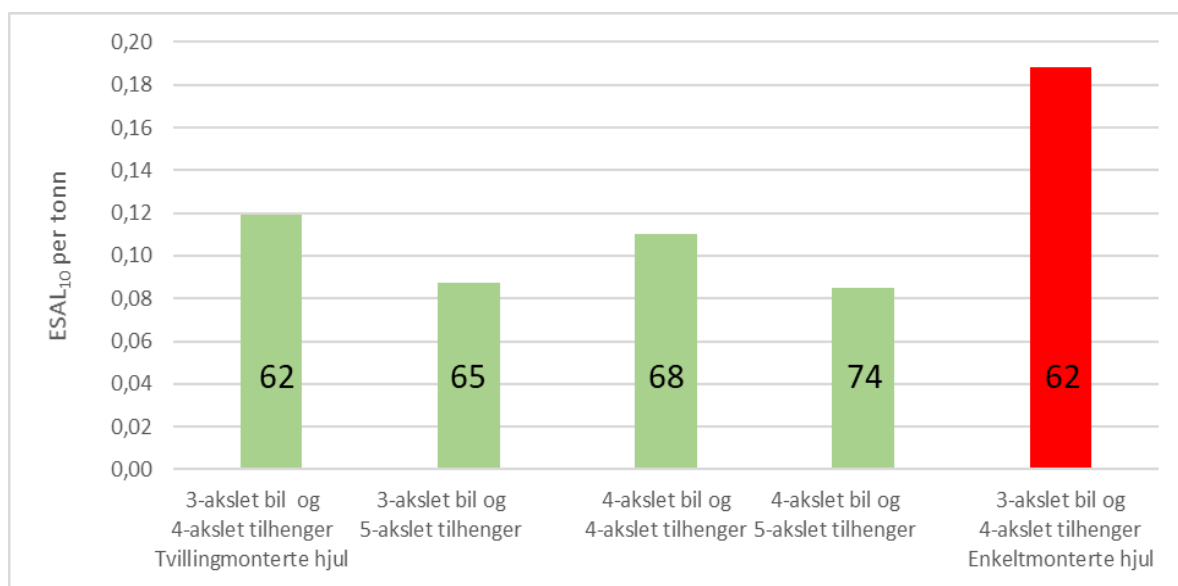
Etter den modellen og de parametre som er benyttet er vektfordelingen optimal ved 6,9 tonn på drivakslene og 5,2 tonn på løpeakselen. Så lenge løpeakselen ikke har høyere aksellaster enn drivakslene, viser beregningene at fordelingen av laster innad i en tridemboggi har liten betydning.

Enkeltmonterte hjul på tilhengeren

Det er ikke krav om at tilhengeren på et tømmervogntog skal ha tvillingmonterte hjul. Likevel brukes det nesten utelukkende tvillingmonterte hjul. For å vise hvordan bruk av enkeltmonterte hjul påvirker nedbrytningen av vegnettet, er det gjennomført beregninger for tilhengere med enkeltmonterte hjul. Også i disse beregningene er det lagt til grunn en dekkbredde på 385 mm.

Sterke veger

Beregningene er gjennomført med de samme forutsetningene om vekter og vektfordeling som for 7-akslede tømmervogntog, men med enkeltmonterte hjul på tilhengeren.



Figur 13 Enkeltmonterte hjul på tilhenger på sterke veger

Figur 13 viser hvordan bruk av enkeltmonterte hjul påvirker nedbrytningen av vegnettet. Sammenlignet med tømmervogntog med samme akselkonfigurasjon, men med tvillingmonterte hjul, viser beregningene at nedbrytningen av vegnettet øker med 58 %. Sammenlignet med det mest vegvennlige tømmervogntoget som består av 4-akslet bil og 5-akslet tilhenger, gir dette vogntoget 123 % høyere nedbrytning. Granlund og Lang (2017) skriver i sin rapport at «Bruttovikten er inte ens en parameter» for vegslitasje. Dette eksemplet understreker poenget i deres utsagn.

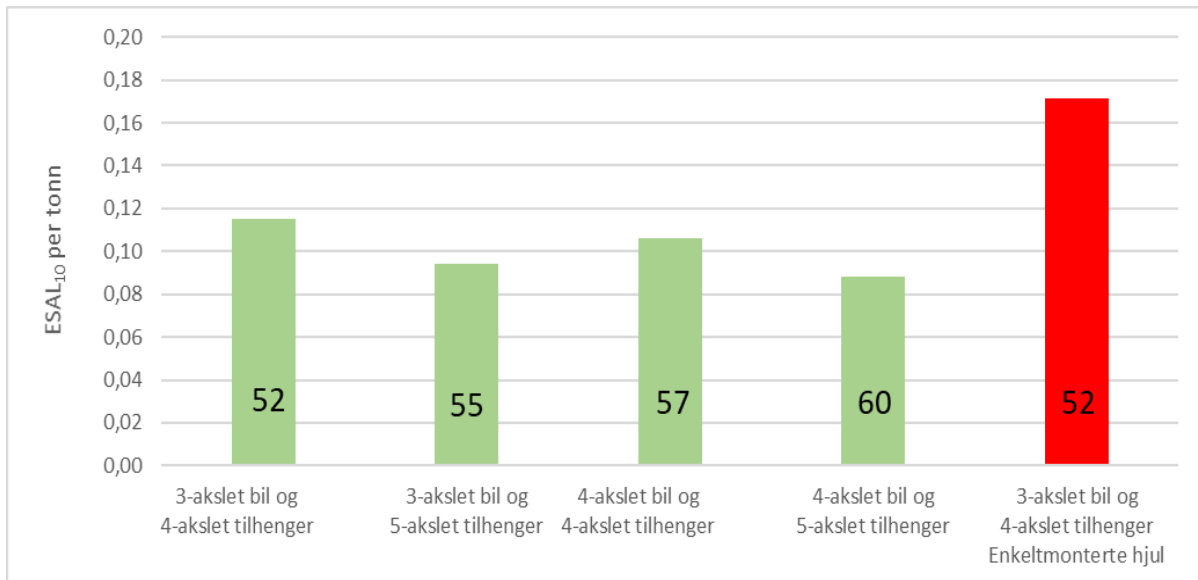
Granlund (2019) har i sitt notat «Optimalt däckval, dubbel- eller enkelmontage» påpekt at enkeltmonterte hjul ikke skal belastes med 10 tonns aksellaster, men at forutsetningene for å ta i bruk enkeltmonterte hjul var at aksellastene skulle gå ned fra 10 til 8 tonn.

Med det som utgangspunkt ble det gjennomført simuleringer hvor aksellastene gradvis ble redusert for å kompensere for bruk av enkeltmonterte hjul. Ved aksellaster på 6,25 tonn ble belastningen på vegnettet redusert så mye at slitasjen per transportert enhet fra et vogntog med enkeltmonterte hjul på tilhengeren kom ned på samme nivå som et vogntog med

tvillingmonterte hjul. I dette tilfellet var det dermed mulig å kompensere for bruk av enkeltmonterte hjul ved å redusere aksellastene 2,75 tonn.

Svake veger

Også for svake veger er det gjennomført beregninger for 7-akslede vogntog med enkeltmonterte hjul på tilhengeren.



Figur 14 Enkeltmonterte hjul på tilhenger på svake veger

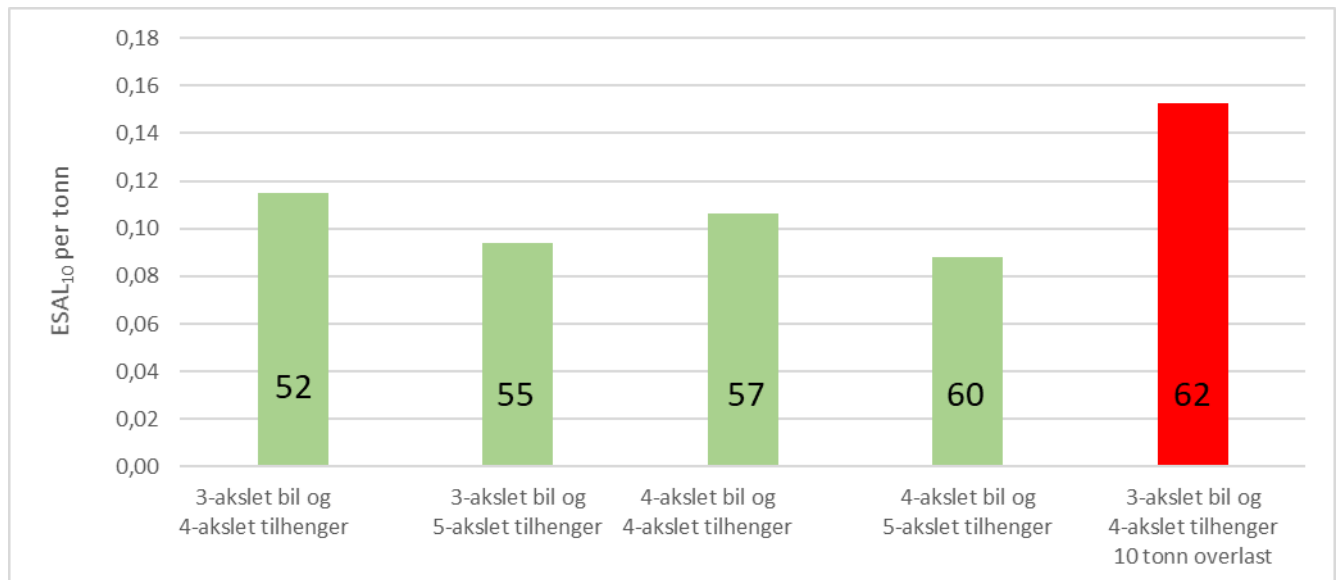
Figur 14 viser hvordan bruk av enkeltmonterte hjul på tilhengeren påvirker nedbrytningen av svake veger. Sammenlignet med tømmervogntog med samme akselkonfigurasjon, men med tvillingmonterte hjul, viser beregningene at nedbrytningen av vegnettet øker med 49 %. Sammenlignet med det mest vegvennlige tømmervogntoget som er en 4-akslet bil med 5-akslet tilhenger, blir nedbrytningen 94 % høyere.

Det er også gjennomført simuleringer med reduksjon av aksellastene for å kompensere for bruk av enkeltmonterte hjul. Minst nedbrytning per transportert enhet viser modellen ved aksellaster på 4,9 tonn. Antall ekvivalentaksler per transportert enhet utgjør da 0,1212. Når aksellastene reduseres ytterligere, øker antallet ekvivalentaksler per transportert enhet. Det har sammenheng med at antall transporter som trengs for å utføre et gitt transportarbeid øker, og at dette slår mer ut enn reduksjonen i aksellaster og slitasje per lass.

Kjøring med overlast på svake vegger

Kjøring med større aksellaster enn det vegnettet tåler gir økt slitasje, kortere levetid og økt behov for vedlikehold på vegnettet. Kjøring med overlast skyldes normalt at de begrensningene som er fastsatt gjennom veglistene ikke blir respektert.

For å vise konsekvensene av kjøring med overlast er det gjennomført beregninger av nedbrytningen fra et 7-akslet vogntog som er kjørt med 10-tonns lass på 8-tonns veg.



Figur 15 Kjøring med 10-tonns lass på 8-tonns veg

Figur 15 viser hvordan nedbrytningen av vegnettet øker når det kjøres 10-tonns lass på 8-tonns veger. Beregnet økning er 33 %. Et viktig tiltak for å hindre unødig slitasje på vegnettet vil derfor være å unngå ulovlig kjøring.

Samtidig viser beregningene at kjøring av 10-tonns lass på 8-tonns veger gir mindre nedbrytning av vegnettet enn lovlig kjøring med enkeltmonterte hjul på de samme vegene.

Diskusjon

Resultatene fra de modellberegningene som er utført er entydige. Beregningene viser at innfasing av 8- og 9-akslede tømmervogntog vil gi redusert slitasje både på sterke og svake vegger.

Gjennom følsomhetsberegninger er de forutsetningene som kan endres innenfor lovlige rammer, endret. Likevel er det ingen av disse endringene som påvirker rangeringen mellom de ulike kjøretøy-kombinasjonene.

Tridem på 4-akslede biler

De 4-akslede tømmerbilene er utstyrt med tridemboggi, og den ene av akslene i denne akselgruppa har enkeltmonterte hjul. Dermed vil to av akslene på 4-akslede biler ha enkeltmonterte hjul. Det fører til at belastningen på vegnettet blir litt større enn den hadde blitt dersom alle akslene i trippelboggigruppa på bilen hadde hatt tvillingmonterte hjul.

Når man sammenligner kombinasjonene 3-akslet bil med 5-akslet tilhenger og 4-akslet bil med 4-akslet tilhenger ser man at førstnevnte kombinasjon alltid gir mindre slitasje selv om begge kombinasjonene har 8 aksler. Det har sammenheng med at førstnevnte kombinasjon har tvillingmonterte hjul på 7 aksler mens sistnevnte kombinasjon har tvillingsmonterte hjul på 6 aksler.

Når man sammenligner slitasje fra 3- og 4-akslede biler ser man også at 4-akslede biler gir litt økt slitasje per lass (Figur 4 og Figur 6), og størst forskjell er det på svake vegger.

Nyttelasten blir imidlertid vesentlig høyere på en 4-akslet bil enn en 3-akslet bil. Dermed kan antallet transporter reduseres. Forskjellen utgjør 50 % på Bk10 og 67 % på BkT8. Grunnen til at 4-akslede biler kommer bedre ut enn 3-akslede biler er derfor først og fremst at disse bilene kan kjøres med vesentlig høyere nyttelast og at antallet transporter kan reduseres.

Hvis man vurderer bilen uavhengig av tilhengeren og sammenholder nedbrytningen av vegnettet med transportert mengde, gir 4-akslede biler 31 % mindre slitasje enn 3-akslede biler på sterke vegger og 34 % mindre på svake vegger.

Grunnen til at en 4-akslet bil med tridemboggi gir mindre nedbrytning av vegnettet enn en 3-akslet bil er at denne bilen kan kjøres med vesentlig høyere nyttelast, og at antallet transporter dermed kan reduseres.

Trippelboggi vs. langboggi på tilhengeren

De beregningene som er gjennomført viser at 5-akslede tilhengere gir vesentlig mindre belastning på vegnettet enn 4-akslede tilhengere. Selv om nyttelasten er høyere på en 5-akslet enn på en 4-akslet tilhenger, blir belastningen på vegnettet lavere, også regnet per lass.

Svake veger

På BkT8 kan en langboggi gå med 2 x 8 tonn, en boggi med 2 x 7 tonn og en trippelboggi med 3 x 6,33 tonn. Etter 4-potens-regelen gir det følgende relative verdier for nedbrytning av vegnettet:

$$\text{Langboggi: } 2 \times (8/10)^4 = 0,8192$$

$$\text{Boggi: } 2 \times (7/10)^4 = 0,4802$$

$$\text{Trippelboggi: } 3 \times (6,33/10)^4 = 0,4827$$

Som det går fram av disse beregningene gir en boggi med 2 x 7 tonn og en trippelboggi med 3 x 6,3 tonn omtrent samme belastning. En langboggi med 2 x 8 tonn gir imidlertid nesten 70 % større belastning enn en vanlig boggi og en trippelboggi. Forskjellene i aksellaster mellom en 4-akslet og en 5-akslet tilhenger er det som slår ut i denne analysen.

Grunnen til at en 5-akslet tilhenger med trippelboggi gir mindre nedbrytning av svake veger enn en 4-akslet tilhenger med langboggi, er at den går med vesentlig lavere aksellaster.

Bakke (2020) som transporterer tømmer i Hurdal, forteller at den 5-akslede tilhengeren «flyter godt». Det betyr at den ikke graver seg like lett ned på bløte veger. I tillegg forteller han at en 5-akslet tilhenger er mye mer stabil f.eks. på ujevne fylkesveger. Det indikerer at bruk av slike tilhengere gir mindre dynamiske belastninger på veggen.

Sterke veger

På sterke veger er det etter den modellen som er benyttet to effekter som slår ut og forklarer forskjellene mellom en 5-akslet tilhenger med trippelboggi og en 4-akslet tilhenger med langboggi. Det ene er effekten av lavere aksellaster, og det andre er effekten av at akslene i en trippelboggigruppe sitter samlet.

Effekten av lavere aksellaster etter 4-potens-regelen er som følger:

| | | |
|------------------------|------------------------|--------|
| Langboggi: | $2 \times (10/10)^4 =$ | 2 |
| Boggi eller langboggi: | $2 \times (9/10)^4 =$ | 1,3122 |
| Trippelboggi: | $3 \times (8/10)^4 =$ | 1,2288 |

Siden aksellastene blir opphøyet i fjerde potens, kommer en boggi eller en langboggi med 2 x 9 tonn og en trippelboggi med 3 x 8 tonn tilnærmet likt ut. Dette er de forutsetningene som ligger til grunn for sammenligningene i denne analysen. Med 2 x 10 tonn ville imidlertid verdien for en langboggi blitt ca 60 % høyere enn verdien for en trippelboggi bare på grunn av aksellastene. I følsomhetsanalysens kapittel om vektfordeling på 4-akslet tilhenger er det vist hvordan dette slår ut for et 7-akslet vogntog.

Effekten av at akslene i en boggi eller en trippelboggi sitter samlet går fram av Tabell 1. Når akselavstanden er mindre enn 1,8 m, gir modellen parameter A en verdi som er lavere enn antallet aksler. For en boggi med akselavstand på 1,40 m kan man ut fra Tabell 1 lese av en verdi på 1,4. Tilsvarende for en trippelboggi med akselavstand 1,35 m er 1,8. Sammenlignet med like mange enkle aksler innebærer det at nedbrytningen av vegnettet reduseres med omtrent

- 30 % fra en boggi
- 40 % fra en trippelboggi

Garba Saba (2019) forklarer dette med at det oppstår en interaksjon mellom naboaksler som gjør at krefter fra den ene akselen i noen grad nøytraliserer krefter fra naboakselen. Dermed reduseres belastningen på vegnettet.

Det er to grunner til at en 5-akslet tilhenger med trippelboggi gir mindre nedbrytning av sterke veger enn en 4-akslet tilhenger med langboggi:

1. En 5-akslet tilhenger går med lavere aksellaster
2. Belastningen på vegnettet reduseres når akslene er plassert sammen i akselgrupper

Gjennom prosjektet Bedre utnyttelse av vegens bæreevne - BUAB (1994) utformet Statens vegvesen anbefalinger om kjøretøyparametere som burde fremmes for å redusere nedbrytningen av vegnettet. Én av anbefalingene går på bruk av boggier og trippelboggier framfor enkle aksler. Resultatet av de beregningene som er gjort, er derfor helt i tråd med Statens vegvesens egne anbefalinger fra 1994.

Med utgangspunkt i de beregningene som er gjort, kan en også slå fast at en trippelboggi gir et mer vegvennlig tømmervogntog enn en boggi. En 5-akslet tømmertilhenger med boggi foran og trippelboggi bak, samt tvillingmonterte hjul på alle aksler, er et optimalt kjøretøy med tanke på vegslitasje.

Enkeltmonterte vs. tvillingmonterte hjul

I flere deler av denne analysen er det ved hjelp av modellberegninger undersøkt hvordan vektene bør fordeles mellom aksler med enkeltmonterte og aksler med tvillingmonterte hjul for at belastningen på vegnettet skal minimeres. I tillegg er det gjennomført egne beregninger for tilhengere med enkeltmonterte hjul både for sterke og svake veger.

Analysen omfatter beregninger knyttet til

- Vektfordeling på 3-akslet tømmerbil
- Vektfordeling i tridem på 4-akslet tømmerbil både på sterke og svake veger
- Vektfordeling mellom bil og tilhenger i et 7-akslet tømmervogntog
- Enkeltmonterte hjul på tilhengeren på sterke og svake veger

Alle disse beregningene viser at lastene på aksler med enkeltmonterte hjul bør ligge 1,7 - 2,75 tonn lavere enn lastene på tvillingmonterte hjul for at belastningen på vegnettet skal minimeres.

Ingen annen faktor har så stor betydning for slitasjen på vegnettet som hjulmontasje. På en svak veg viser beregningene at kjøring med 10-tonns lass på en tilhenger med tvillingmonterte hjul gir mindre belastning på vegnettet enn kjøring med 8 tonns lass på en tilhenger med enkeltmonterte hjul. Med de dekkbredder som er vanlige i dag utgjør altså forskjellen mellom enkeltmonterte og tvillingmonterte hjul mer enn forskjellen i tillatte aksellaster mellom bruksklasse T8 og bruksklasse 10.

På sterke veger viser beregningene at det er mulig å kompensere for bruk av enkeltmonterte hjul gjennom reduksjon av aksellastene. På svake veger derimot viser beregningene at det ikke er mulig å kompensere fullt ut for bruk av enkeltmonterte hjul ved å redusere aksellastene. Dette støttes av Granlund, J og J Lang (2017) som skriver «På de klennt byggda vägarna ökar också nyttan av at köra på parmonterade däck».

På bakgrunn av de forskjellene mellom enkeltmonterte og tvillingmonterte hjul som beregningene viser, og er det naturlig å stille spørsmål ved om tillatte aksellaster i større grad burde vært koblet til hjulmontasje, i hvert fall på den svakere delen av vegnettet.

Vegvennlighet

I denne rapporten er antall ekvivalente ti-tonnsaksler per transportert tonn brukt som uttrykk for vegvennlighet.

Begrepet vegvennlighet knyttes vanligvis til kjøretøytype. Som beregningene viser vil imidlertid vegvennlighet både være avhengig av

- Hvordan kjøretøyet er oppbygd
- Hvordan kjøretøyet er lastet

Når det gjelder kjøretøyets oppbygning viser beregningene at akselgrupper med trippelboggi og tvillingmonterte hjul gir mest vegvennlige kjøretøy. Ni-akslede vogntog med tvillingmonterte hjul på 7 av 9 aksler, er i dag de mest vegvennlige tømmervogntog som er anvendelige i Norge. I Nord- og Midt-Sverige brukes det også 9-akslede vogntog med tvillingmonterte hjul på 8 aksler, men slike link-modulvogntog har for dårlige springsegenskaper til at de egner seg i Norge.

Når det gjelder lastfordeling på kjøretøyet viser beregningene at det er viktig å unngå for høy aksellast på forakselen på bilen som er en enkel aksel med enkeltmonterte hjul, og på langboggien på tilhengeren som betraktes som to enkle aksler.

Åttende eller tiende potens?

Saarenketo (2019) sier at 4.-potensregelen ikke gjelder på veger med svak undergrunn og tynt dekke. På slike veger oppgir han at eksponenten vil være høyere enn fire, kanskje mellom 8 og 10. Berntsen (2019) bekrefter dette, og oppgir at eksponenten kan variere mellom to og 15. Sammenhengen er altså slik at jo svakere vegene er, jo høyere vil eksponenten være.

Når eksponenten øker, vil effekten av reduserte aksellaster øke. Jo svakere vegene er, jo viktigere vil det dermed være å redusere aksellastene, og jo større effekt vil bruk av kjøretøy med mange aksler gi.

Det er i dag noe usikkerhet knyttet til bruk av tømmervogntog med 8 og 9 aksler på svake veger. Noen frykter at økte totalvekter vil gi økt slitasje. Sammenhengen mellom svake veger og høyere potens, tilsier imidlertid at det vil være en fordel å bruke vogntog med mange aksler på de svake vegene. Uttalelsene fra Saarenketo og Berntsen tilsier derfor at forskjellene mellom de ulike vogntog-kombinasjonene kan være enda større enn det modellberegningene viser.

Lastfyllingsgrad

Lastfyllingsgrad er et uttrykk for hvor stor andel av beregnet nyttelast som utnyttes i praksis.

Lastfyllingsgraden vil bl.a. variere med tømmerets

- Lengde
- Egenvekt
- Fastmasseprosent

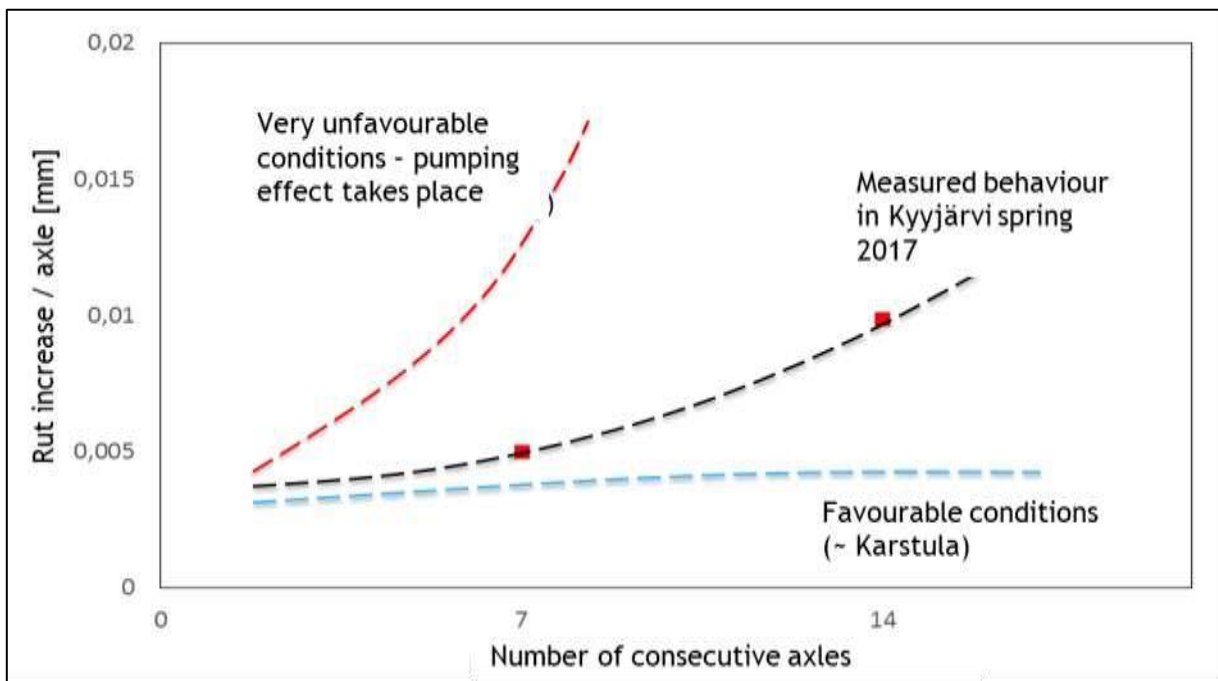
I dag utnytter de fleste transportører tillatt totalvekt på 60 tonn godt det meste av året.

Dersom tillatt totalvekt økes til 74 tonn, vil høyde oftere bli en begrensende faktor. Dermed vil lastfyllingsgraden gå noe ned. Det betyr at faktiske aksellaster vil være lavere enn tillatte aksellaster, og dette taler også for at forskjellen mellom de ulike vogntogtypene kan være større enn det beregningene viser.

Pumpeeffekten

Den modellen som er benyttet tar ikke hensyn til den såkalte pumpeeffekten.

Pumpeeffekten er et fenomen som først er beskrevet de senere årene, og som ikke er hensyntatt i de «klassiske modellene». Pumpeeffekten oppstår der mange hjul passerer etter hverandre i samme spor i løpet av kort tid. Når det er vann i vegkroppen, vil poretrykket øke etter hvert som flere hjul passerer. Friksjonen mellom gruskornene blir da mindre, og vegens bæreevne reduseres gradvis. Pumpeeffekten oppstår først og fremst på strekninger med finkornede jordarter og dårlig drenering.



Figur 16 Pumpeeffekten blir ikke hensyntatt i beregningene (Saarenketo 2019)

Hvor mye pumpeeffekten som følge av én eller to ekstra aksler betyr sammenlignet med reduserte aksellaster har man i dag ikke tilstrekkelig kunnskap om.

En foreløpig anbefaling vil være å unngå kjøring av flere tunge kjøretøy etter hverandre. Hvor lenge en veg må ligge for at opprinnelig tilstand skal gjenopprettes vil variere. Saarenketo (2019) har målinger som viser at en veg kan være tilbake i opprinnelig tilstand etter 18 sekunder, men på enkelte veger kan det sannsynligvis gå flere timer før opprinnelig tilstand er gjenopprettet.

Pumpeeffekten tilsier at forskjellen mellom de ulike vogntogkombinasjonene kan være mindre enn det modellberegningene viser. Pumpeeffekten framstår som det største gjenværende usikkerhetsmomentet rundt vegslitasje fra tømmervogntog med 8 og 9 aksler.

Oppsummering

Modellberegningene viser at bruk av tømmervogntog med 8- og 9-aksler vil gi mindre vegslitasje. Både på sterke og svake veger kommer vogntog med 4-akslet tømmerbil og 5-akslet tømmertilhenger best ut når det gjelder vegslitasje per transportert enhet. De tømmervogntog som det brukes mest av i dag, vogntog med 3-akslet bil og 4-akslet tilhenger, kommer dårligst ut.

Når en ser tømmerbilen for seg og bare sammenligner ett og ett lass, viser beregningene at en 4-akslet tømmerbil gir litt større vegslitasje enn en 3-akslet tømmerbil. På sterke veger er forskjellene små, men på svake veger blir forskjellene større. Nyttelasten på en 4-akslet bil er imidlertid 50 prosent høyere på sterke veger og 67 prosent høyere på svake veger enn på en 3-akslet bil. Når vegslitasjen sees i forhold til det transportarbeidet som utføres, kommer den 4-akslede bilen derfor klart bedre ut enn en 3-akslet bil både på sterke og svake veger.

For tilhengeren er forskjellene enda tydeligere. Både på sterke og på svake veger viser beregningene at en 5-akslet tilhenger gir mindre slitasje per lass enn en 4-akslet tilhenger. Når det i tillegg tas hensyn til at en 5-akslet tilhenger har større nyttelast, blir forskjellene store.

I tillegg til dette bør det tas hensyn til at 4-akslede biler og 5-akslede tilhengere ikke alltid vil kunne lastes til tillatt totalvekt på Bk10 fordi lasset da blir for høyt. I realiteten kan aksellastene på 8- og 9-akslede vogntog bli lavere enn det som er forutsatt i beregningene, og det tilsier at forskjellene mellom de ulike vogntogkombinasjonene kan bli enda større.

Beregningene viser at det fra myndighetenes side er fornuftig å legge til rette slik at lastebileiere velger kjøretøy med flere aksler. Det kan gjøres ved at de som bruker 4-akslede biler eller 5-akslede tilhengere får kjøre større lass enn de som velger tradisjonelle 7-akslede vogntog. På svake veger med BkT8 kan en slik endring gjennomføres raskt ved å opprette en bruksklasse T8/60. Det har sammenheng med at reklassifiseringen av bruer på fylkesvegnettet nærmer seg fullført, og det ikke lenger er noen usikkerhet om hvilke bruer som tåler 60 tonn totalvekt. Før det kan innføres 74 tonn totalvekt på Bk10, må bruene gjennomgås. Det arbeidet som er gjennomført de siste årene, har imidlertid lagt et godt grunnlag for at denne klassifiseringen skal kunne gjennomføres raskt.

Referanser

Bakke, T A 2020. pers. medd.

Berntsen, G 2019. pers. medd.

Garba Saba, R 2018. Konsekvenser av økning i totalvekt på 3-akslede lastebiler. Statens vegvesen, notat.

Garba Saba, R 2019. pers. medd.

Granlund, J og J Lang 2017. Førkortad väglivslängd – orsaker och kostnader.

Granlund, J 2019. Optimalt däckval, dubbel- eller enkelmontage.

Hjort, M, Haraldsson, M and J M Jansen 2008. Road wear from Heavy Vehicles – an overview. Report nr. 08/2008, NVF committee Vehicles and Transports.

Lier, P K 2019. pers. medd.

Saarenketo, T 2019. Effect of high capacity vehicles on pavements – results from the Finnish field tests.

Senstad, P 1994. Sluttrapport for etatsatsingsområdet Bedre utnyttelse av vegens bæreevne. Statens vegvesen, Publikasjon nr. 75.