

Prosjektrapport

Test og oppfølging av 8- og 9-akslede tømmervogntog med økt totalvekt

Ås, 30-01-2025

Stephan Hoffmann, Heikki Korpunen, Simon Berg og Helmer Belbo

Norsk Institutt for Bioøkonomi (NIBIO), Postboks 115, 1431 Ås

Dag Skjølaas

Norges Skogeierforbund, Postboks 1438, Vika, 0115 Oslo

Dag Fjeld

Skogkurs, Mjøsbrygga, Tårnvegen 41, 2380 Brumunddal



Sammendrag

Ved behandlingen av Meld. St. 6 (2016-2017) ba Stortinget regjeringen gjennomføre en prøveordning for tømmervogntog med totalvekter opp til 74 tonn. Prosjektets hovedmål var å kvantifisere nytte, kostnader og begrensninger ved bruk av 8- og 9-akslede tømmervogntog med totalvekt inntil 74 t i Norge i forbindelse med denne prøveordningen.

I prøveordningen er det brukt vogntogkombinasjoner med 3- eller 4-akslet tømmerbil og 4- eller 5-akslet tømmertilhenger. Vogntog med 3-akslet tømmerbil, 4-akslet tilhenger og 60 tonn totalvekt har vært referansekjøretøy. De andre vogntogkombinasjonene ble gitt tillatelse til å kjøre med hhv. 65 tonn (3-akslet bil + 5-akslet henger), 68 tonn (4 + 4 akslinger) og 74 tonn totalvekt (4 + 5 akslinger) på Bk10/60-veger i prøveordningen.

Transportører som har deltatt i prøveordningen har stått fritt til å velge vogntogkombinasjon ut fra egne ønsker. Alle som har deltatt i prøveordningen hadde enten 4-akslet bil eller 5-akslet tilhenger da prøveordningen ble startet opp. I tillegg har alle transportører gjort nye innkjøp i prøveperioden slik at de har fått testet flere kombinasjoner.

Prøveordningen omfattet 3 vogntog med hver av de fire kombinasjonene. De tolv vogntogene ble utstyrt med dataloggere for å samle data fra bilenes CAN-bus system. Disse dataene ble flettet med data i fraktbrev fra Skogdata og vegposisjoner fra nasjonal vegdatabase. Tallmaterialet ble brukt til å analysere lassvolum, dieselforbruk og kjørehastighet fra transportetappene som kjøretøyene tilbakela. Vogntogene ble fulgt i ordinær drift i en periode på ca. to år. Det ble ikke arrangert forsøk for å teste vogntogkombinasjonene under eksakt like driftsforhold.

Forsøksbilene har stort sett kunnet utnytte den ekstra lastekapasiteten de får ved økt tillatt totalvekt. Gjennomsnittslasten har vært 42.8 m³ for 60 t vogntogene, 45.7 m³ for 65 t, 48.2 m³ for 68 t, og 55.1 m³ for 74 t vogntogene når de kjørte i forsøksområdet. Dette representerer en økning i nyttiggjort nyttelast på 6 %, 13 % og 29 % for den respektive vogntogklassen.

Dieselforbruket øker med økt totalvekt på vogntoget, men synker likevel per transportert enhet ved økende nyttelast. Tallene fra denne studien indikerer en reduksjon i dieselforbruk per transportert volumenhet på hhv 15 %, 12 % og 18 % for 65t, 68t og 74t vogntog. Det er noe usikkerhet i størrelsen på disse besparelsene, siden de ulike vogntogene opererte under ulike driftsforhold. Forskjeller i driftsforhold har sannsynligvis bidratt til det overraskende resultatet at 65 t vogntog gav en forholdsvis større reduksjon i dieselforbruk sett opp mot økningen i nyttelast enn de øvrige vogntogene. Men tendensen er likevel nokså tydelig, og indikerer at økt nyttelast har gitt en tilsvarende reduksjon i dieselforbruket per kubikkmeter transportert virke. Det bør bemerkes at denne effekten kun gjelder selve transporten, og ikke inkluderer lasting og lossing, hvor dieselforbruket per volumenhet neppe vil bli påvirket av endrede vogntogvekter.

Vogntogkonfigurasjonene hadde ingen entydig effekt på kjørehastigheten, som i snitt var ca. 52 km/h ved lasskjøring og 49,5 km/h ved tomkjøring. Ved kjøring i motbakke gikk snitthastigheten noe ned med økende totalvektklasse, både for lastede og ulastede vogntog. På flate strekninger var hastigheten høyest for de tyngste vogntogkombinasjonene, både for lastet kjøring og tomkjøring. I nedoverbakker var det ikke noen entydig forskjell. Forskjeller i driftsforhold kan også ha påvirket disse resultatene.

Transportkostnadene for de ulike vogntogkombinasjonene er sammenlignet i et scenario med 75 km transportavstand, og en antagelse om at de vil kjøre med samme hastighet under like driftsforhold. Kalkylene indikerer at de tyngre vogntogkombinasjonene vil gi en besparelse i transportkostnader per m³ virke på hhv 7 %, 11 % og 17 %. De tilfeldighetene som kan ha påvirket dieselforbruket til den enkelte vogntogkombinasjon, har også påvirket resultatene i denne sammenligningen.

Datainnsamlingen og datafletting fra CAN-bus og fraktbrev gikk ikke helt som planlagt. Dette gav begrensninger i hvilke konklusjoner som kan trekkes når det gjelder eksakt dieselforbruk og transporthastighet under ulike driftsforhold. Dette gir også noe usikkerhet i sammenligningen mellom de ulike vogntogkombinasjonene. De overordnede tendensene til økt transporteffektivitet og drivstofføkonomi ved økende vogntogvekter virker likevel troverdige.

Framkommelighet er en viktig parameter ved valg av vogntogkombinasjon. I bratte stigninger på dårlig føre (snø og is) på skogsveger kan det bli utfordrende å få med seg en tyngre tilhenger. Med 4-akslede tømmerbiler er det mulig å overføre ekstra vekt på drivhjulene i kritiske situasjoner, noe som kan lindre eller utligne denne utfordringen. Der lokal geografi og klima gir kjøreforhold som i stor grad begrenser muligheten til å utnytte lastekapasiteten på en 5-akslet tilhenger, kan det vurderes om en 4-akslet tilhenger vil være mer fornuftig.

Forskrift om bruk av kjøretøy åpnet sommeren 2022 for å øke maksimal tillatt totalvekt fra 50 til 60 tonn for 9-akslede vogntog på BkT8-veger. Mange av vegene som i dag har bruksklasse BkT8/50 vil trolig etter hvert bli omklassifisert til BkT8/60, noe som gjør at flere akslinger vil gi tilsvarende større nyttelast også på disse vegene.

En del av broene med lange spenn som er bygd før 1970 har totalvektbegrensning på 50 eller 60 tonn. Slike broer kan begrense nytteverdien av flere akslinger, i og med at vogntogene må holde seg under denne totalvektbegrensningen når bruene passeres. Om lag 3 % av alle broer på riks- og fylkesvegnettet har begrensninger som gjør at de ikke kan oppklassifiseres til 74 tonn. I tillegg må 14 % av øvrige broer kontrolleres før de kan åpnes for 74 tonns vogntog.

Mye av tømmertransporten i Norge er slik at bilen kjøres tom oppover i terrenget og lastet ned igjen med tømmer. I mange områder ligger forholdene derfor godt til rette for å utnytte vogntog med 8 og 9 aksler for å redusere kostnader og klimagassutslipp fra tømmertransport.

Innhold

Sammendrag.....	2
Innledning.....	5
Bakgrunn	5
Mål og problemstilling	6
Materialer og metoder	7
Vogntogkombinasjoner	7
Datainnsamling	8
Generell tilnærming	8
Fletting av data fra ulike kilder for analyse.....	9
Lokalisering av turer	13
Teststrekninger	14
Statistikk	16
Resultater.....	17
Analyse av turdata	17
Resultater fra test-strekningene	18
Lastet kjøring.....	18
Kjøring uten last	19
Sammenligninger ved forskjellige avstandskategorier.....	21
Analyse av turdata for middels og lange transportavstander	23
Sesongvariasjon i lassvolum.....	25
Kostnadsberegning	25
Diskusjon og konklusjon	30
Problemstilling og metodikk	30
Drivstofforbruk	31
Nyttelastutnyttelse	32
Økonomisk evaluering av 8- og 9-akslede tømmervogntog.....	32
Fremkommelighet	33
Konklusjoner	34
Litteraturhenvisninger	35
Vedlegg	38
Detaljer om aggregering av arbeidssegmenter og klassifisering av arbeidselementer.....	38
Stopp aggregering.....	38
Stopp- og kjøreklassifisering	39

Innledning

Bakgrunn

Transport med tømmervogntog er den primære transportmetoden for rundvirke både globalt og her i Norge. Denne transporten står for en betydelig andel av kostnadene og CO₂-utslippene som er relatert til virkesforsyningen (Anttila et al. 2022). Transportavstand og nyttelast er de faktorene som påvirker transportkostnadene mest (Kärhä et al. 2024). Siden transportavstanden er gitt fra ressursens og industriens respektive beliggenhet, vil kjøretøykonfigurasjoner som tillater større nyttelast være den mest åpenbare nøkkelen for å forbedre transporteffektiviteten og redusere drivstofforbruket. Maks tillat totalvekt for tømmervogntog har økt i Finland og Sverige de siste årene, primært for å redusere transportkostnadene (Noreland, 2020, Väätäinen et al. 2020). Det er naturlig at en lignende tilnærming følges også i Norge.

Stortinget behandlet stortingsmeldingen «Verdier i vekst» den 31.01.2017, og ba i den forbindelse Regjeringen om å gjennomføre en prøveordning med tømmervogntog med en totalvekt på opptil 74 tonn. Ved gjennomføringen av denne prøveordningen, var det planlagt en arbeidsdeling mellom vegmyndighetene og næringen hvor Statens vegvesen var ansvarlige for FOU-aktiviteter rettet mot trafikksikkerhet og vegslitasje på offentlige veger, mens næringen var ansvarlig for aktiviteter rettet mot tilgjengelighet, spesielt på skogsbilveger, drivstofforbruk, lass-størrelse og kostnader. Det var også ønskelig å overvåke slitasje på skogsbilveger.

Maksimal totalvekt for tømmervogntog i Norge er per i dag 60 t, med krav om at vogntogene skal fordele denne vekten på minst 7 aksler. Disse vogntogene har vanligvis av en 3-akslet bil, hvor bakhjulene er konfigurert som en boggi med fire drivende tvillinghjul. Under prøveordningen som startet i 2021, ble vogntog med 65 t (3+5 aksler), 68 t (4+4 aksler) og 74 t (4+5 aksler) tillatt totalvekt testet på veger med bruksklasse for tømmervogntog Bk10/60. På bæresvake veger med bruksklasse BkT8/60 vil disse kjøretøyene kunne kjøre med totalvekter på hhv. 55, 57 og 60 t.

Forutsetningen for å oppnå kostnadsinnsparinger med bruk av 8- og 9-akslede tømmervogntog er et egnet vegnett. Lange bruer av eldre dato (byggeår før 1970) har ofte totalvektbegrensning på 50 eller 60 tonn (ref «Brutus» databasen hos Statens vegvesen), noe som vil hindre økt totalvekt på vegene som ligger «innenfor» slike bruer. Ifølge vurderinger gjort av Statens Vegvesen har 3% av bruene på riks- og fylkesvegnettet for liten bæreevne for 74 t vogntog, mens 14 % av bruene må kontrollregnes før de kan åpnes for 74 t totalvekt (Grefstad 2020-02-22, pers medd).

Ved kjøring i stigninger er det generelt slik at friksjonen mellom drivhjul og vegbane, og andelen av bilens totalvekt som ligger på drivhjulene, avgjør hvor bratt vogntoget kan kjøre (Hjort 2012). For transportetapper med bratte stigninger kan det derfor særlig vinterstid oppstå kjøreforhold hvor maksimal totalvekt ikke kan utnyttes for bil og henger. Som en nødløsning i vanskelige situasjoner kan fire-akslede biler øke trykket på drivhjulsboggien, og dermed komme seg ut av slike situasjoner.

Siden testkjøring av såkalte HCT-tømmervogntog (High Capacity Transport) startet i Finland (76 t) og Sverige (74 t) har mange aspekter blitt undersøkt, og mange resultater er behørig dokumentert. Tabell 1 under presenterer et utvalg slike studier fra de siste 10 år før prøveprosjektet ble igangsatt.

Tabell 1: Tidligere Nordiske undersøkelser om HCT-tømmerbiler.

FIN	SWE	Fokus	Referanse
	X	Valg av HCT-tømmervogntog for Södras geografi	Lindström 2014
	X	Effekt av totalvekt og transportavstand på dieselforbruk (74/90 t)	Widinghoff 2014
	X	Effekt av HCT-tømmervogntog på vegens livslengde	Granlund & Land 2016
	X	Krav til geometri for skogsbilveger ved innføring av HCT	Larsson 2017
X		Utvikling av bilparkens totalvekt (64/68/76 t) og nyttelast etter innføring av HCT (76 t)	Palander & Kärha 2017
	X	Effekter av HCT-tømmervogntog på togtransporter	Lööf 2017
	X	Effekter av blandet totalvekt (HCT) i lastebilsparken	Näslund 2017
X		Effekt av økt totalvekt (HCT) og transportavstand på transportprestasjoner	Väätäinen et al. 2018
	X	Ongoing work with HCT and public road deformation in Sweden – 74 tonne trucks and their impact on infrastructure.	Bergqvist 2018
X		Ongoing work with road bearing capacity and new planning tools in Finland	Strandström 2018
	X	Sluttrapport for prosjekt ETT (HCT) 2014-2016	Asmoarp et al. 2018
	X	HCT-Roadmap frem til år 2030	Hofsten & Enström 2018

I dag er den normale totalvekten for tømmervogntog 76 tonn i Finland. I en finsk studie av Venäläinen & Poikela (2022) fant de at en økning av totalvekten på tømmervogntoget fra 76 tonn til 84-104 tonn reduserte transportkostnadene med 8-12 % ved en transportavstand i intervallet 100-300 kilometer. Reduksjon av drivstofforbruk var 3.5-10.5 % per tonn transportert virke.

Mål og problemstilling

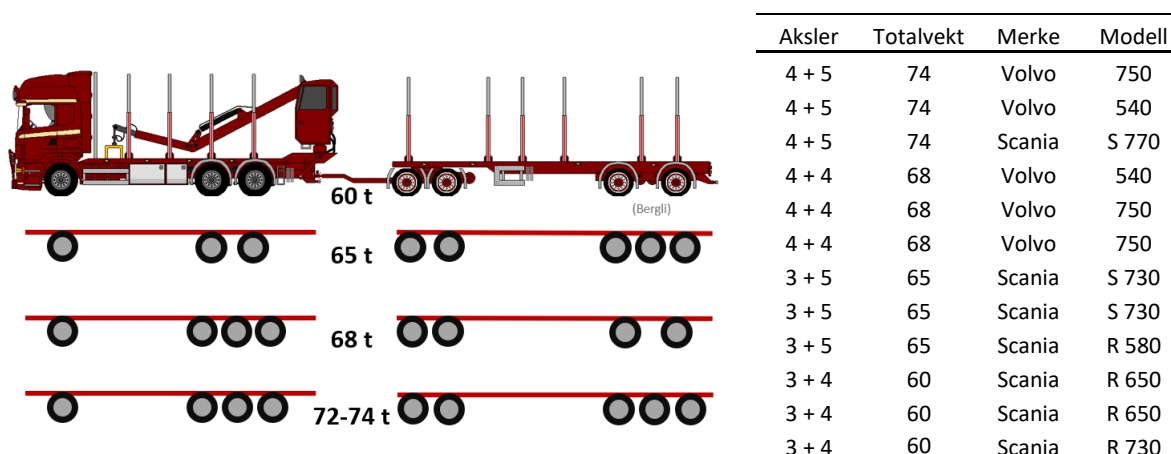
Hovedmålet med prosjektet er å kvantifisere nytte, kostnader og begrensninger ved bruk av - og 9-akslede tømmervogntog med totalvekt inntil 74 t i Norge. For å nå dette målet er det definert tre delmål:

- (1) Følge opp variasjon i nyttelast under drift, samt hvilke faktorer som er avgjørende.
- (2) Kvantifisere forskjellen i kjørehastigheter og dieselforbruk mellom standard 7-akslede 24 m vogntog og nye vogntogkombinasjoner med 8- og 9-aksler.
- (3) Kartlegge erfaringer hos transportør og transportledere og gjøre en syntese av nytte og kostnader økte vogntogvekter.

Materialer og metoder

Vogntogkombinasjoner

Basert på tidligere erfaringer og tilpasninger i Sverige og Finland, er det valgt ut tre vogntogkombinasjoner (Statens vegvesen, 2020), som skal sammenlignes med et standard 60t (3+4 aksler) tømmervogntog (Figur 1). For hver kombinasjon har det gått tre tømmervogntog, slik at i alt 12 vogntog var med i prosjektet. Kjøretøyene som deltok i prosjektet var integrert i bilparken hos kommersielle tømmertransportører, og ble kjørt av erfarne sjåførere. Vogntogene ble testet i 11 kommuner i Innlandet fylke: Kongsvinger, Grue, Åsnes, Våler, Elverum, Trysil, Åmot, Stor-Elvdal, Løten, Hamar og Stange.



Figur 1: Standard norsk tømmervogntog 60 t (3+4 aksler) og testkonfigurasjoner under prøveordningen med 65 t (3+5 aksler), 68 t (4+4 aksler) og 72-74 t (4+5 aksler). Til tross for økt antall aksler og lastekapasitet, er vogntoglengden 24 m for alle. Høyre: liste over kjøretøyer som var med i prosjektet.

Tridem-boggien på tømmerbilen har to drivende aksler med tvillinghjul og ett medsvingende singelhjul. Akslingen med singelhjul kan stå foran eller bak drivhjulene, og kan normalt løftes for å legge mer vekt på drivhjulene. Om denne singelhjulakslingen står bak drivhjulsboggien, vil bilen (vanligvis) ha kortere akselavstand mellom for- og bakaksel, og lengre overheng bak drivhjulsboggien, noe som reduserer svingradius og gir bedre sporfølgning for hengeren.

Tabell 2. Typisk egenvekt og nyttelast for de ulike vogntogkombinasjonene (Skjølaas 2020). Faktisk egenvekt og ditto nyttelast vil variere litt mellom ulike modeller, og med hvordan bilen er utstyrt med kran, dekk, kjettinger, strøkasser, og annet utstyr.

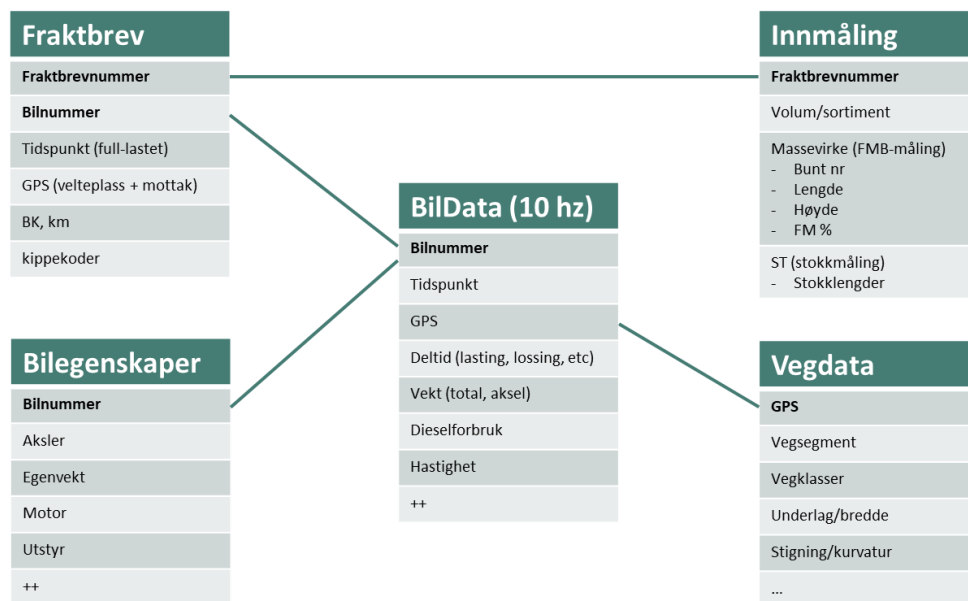
Vogntogkombinasjon	Egenvekt bil m/kran + henger	Nyttelast på Bk10-veg, (% av 60t vogntog)	Nyttelast på svake veger (BkT8/60)
60 t 3 + 4 aksler	16 + 6 = 22 t	38 t (100 %)	30 t (100 %)
65 t 3 + 5 aksler	16 + 7 = 23 t	42 t (+ 11 %)	32 t (+ 7 %)
68 t 4 + 4 aksler	17 + 6 = 23 t	45 t (+ 18 %)	34 t (+ 13 %)
74 t 4 + 5 aksler	17 + 7 = 24 t	50 t (+ 32 %)	36 t (+ 20 %)

Datainnsamling

Generell tilnærming

Diesel- og tidsbruk per transportert enhet er sentrale kostnadsdrivere i virkestransport. Diesel-forbruk er relatert til forskjellige faktorer, hvorav kjøretøyspesifikasjoner, kjørehastighet og vegtilstand/geometri er de viktigste. For å kartlegge hvordan kjøretøykonfigurasjon påvirker tidsbruk (herunder hastighet) og dieselforbruk ved ulike kjøreforhold ble detaljerte turdata fra kjøretøyene samlet inn og analysert.

Datainnsamlingen foregikk gjennom en metode for å flette sammen ferdsdata fra kjøretøyet, posisjonsdata fra GPS, vegdata fra vegdatabaser (NVDB), og lassdata fra fraktbrev, utviklet av Skogforsk i Sverige (Figur 2).

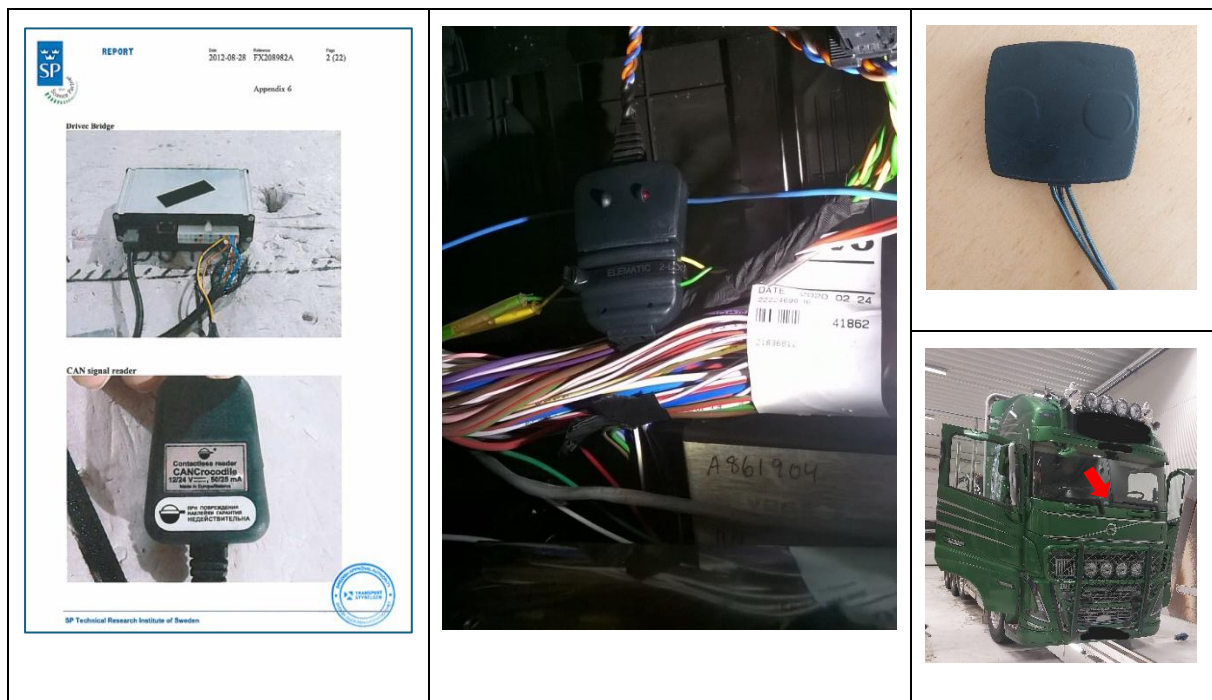


Figur 2: Skjema som viser datakilder brukt i prosjektet, og hvordan data sys sammen for videre analyser.

En sentral del av denne tilnærmingen var en datalogger montert på kjøretøyet med en GPS-antenne og CAN-bus¹ tilgangspunkt (CAN-krokodille), satt sammen av Drivec AB/Sverige (Figur 3). Dataloggeren fanger opp data fra bilens CAN-bus med en loggerfrekvens på 10 Hz, og videresender det via mobil-nettet til Skogforsk i Sverige. Der blir rådataene forhåndsbehandlet, konsolidert og knyttet til vegdataene i den nasjonale vegdatabasen ved hjelp av GPS-posisjonen for hvert datapunkt. For å verifisere og kalibrere spesielt kjøretøyvekten og drivstofforbruk hentet fra CAN-bus systemet, ble kalibreringsjournaler ført av kjøretøyenes eiere. Disse journalene inneholdt dokumentasjon av kjøretøyets fylling (liter diesel og kilometerstand) samt månedlige vektmålinger av kjøretøyet med og uten lass på offisielle vektstasjoner.

¹ **Controller Area Network** (CAN eller CAN-bus) er en protokoll utviklet for bruk i kjøretøy der de forskjellige kontrollene på bussen kan kommunisere med hverandre uten en sentral datamaskin (https://no.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network)

I tillegg ble fraktbrev som angir hentepunkt, leveringspunkt, lassvolum for hver tur hentet fra Skogdata og satt sammen med Skogforsk-dataene.



Figur 3: Datalogger med CAN-tilgang gjennom "krokodille" og GPS-antenne, plassert på frontruten til lastebilen (rød pil)

Det var planlagt å samle inn data fra alle tolv vogntogene over en periode på tolv måneder fra januar 2022 for å dekke alle sesonger, vær- og føreforhold. Men på grunn av at vogntogene ikke kunne leveres til planlagt tidspunkt, ble ikke datainnsamlingen gjennomført samtidig for alle kjøretøyene, og innsamlingsperioden ble forlenget til september 2023.

Fletting av data fra ulike kilder for analyse

Å koble sammen -CAN-bus-dataene fra Skogforsk (i Sverige), og måledata fra Skogdata, var avgjørende for å bestemme tids- og diesel-forbruket per transportert mengde for de individuelle arbeidsmomenter og kjøretøykonfigurasjoner. Denne flettingen krevde ytterligere behandling og rengjøring av dataene, for å sikre at CAN-bus dataene ble riktig knyttet sammen med de forskjellige arbeidsmomenter (tomkjøring, lasting, lasskjøring, lossing), og til riktig måledata fra virkesmottaket. Dette var utfordrende, siden Skogdata-informasjonen fra lastepunktet (sted og tid) var avhengig av at vogntogføreren kom på å utføre de nødvendige manuelle registreringer umiddelbart etter lasting, og at det også var mobildekning på velteplassen. Ved avvik fra disse momenter og rutiner ble det generert misvisende hentetidspunkt og henteposisjon, noe som gjorde det vanskelig eller umulig å finne ut hvilket fraktbrev CAN-bus dataene hørte til. Det var også en intensjon om at vogntogene skulle vise sin lassvekt kontinuerlig i CAN-bus-datasettet. Men denne metoden fungerte simpelt hen ikke etter hensikten, fordi feilmarginen i vektangivelsene fra CAN-bus var for store til at de kunne brukes til å angi lassvekt.

Tidsforsinkelse i logging av CAN-bus informasjonen gav ytterligere utfordringer i å koble data fra CAN-bus til riktig arbeidsoppgave og driftsforhold. Derfor ble en nokså komplisert metodikk for datafusjon utviklet av NIBIO.

Datahåndtering på bilnivå

Data fra tømmerbilene ble etter de foregående trinnene lagret i .csv-filer, med en oppløsning på 1 observasjon per sekund. Hver bil produserte mange .csv-filer av forskjellige lengder. Tidsrommet mellom forskjellige .csv-filer varierte fra noen sekunder, mest sannsynlig på grunn av en opptaksfeil, til flere dager om bilen var ute av drift. Alle slike .csv-filer fra en lastebil ble kombinert til ett datasett for videre analyse. Dette datasettet besto av en rekke variabler som for hvert enkelt tidspunkt beskriver bilens status i form av dieselforbruk, hastighet, anslått totalvekt og posisjon. Men det inneholdt enda ikke variabler som forteller hvilken oppgave bilen har (lasting, lasskjøring, lossing osv).

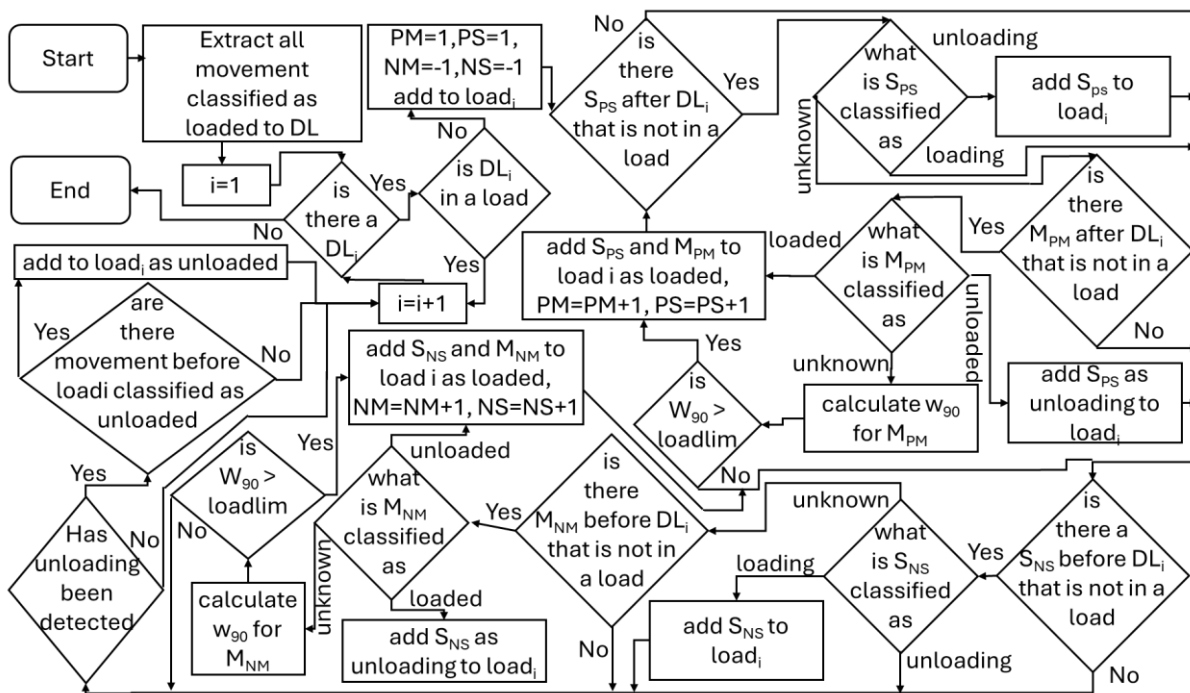
Dataene ble derfor klassifisert i arbeidssegmenter for perioder hvor det er grunn til å anta at kontinuerlig arbeid av en eller annen type har pågått. Det ble antatt at en periode på over 50 minutter uten nye data innebar en pause, og at den på følgende aktiviteten hørte til et nytt arbeidssegment. Denne grensen var basert på reglene for hvile og søvn for lastebilsjåfører, med litt ekstra tid lagt til.

Stopper i et arbeidssegment som var nær hverandre, ble deretter aggregert for å få aggregerte stopp. Etter at et stopp ble aggregert, ble enden trimmet om nødvendig. Alle observasjoner inne i et aggregert stopp ble betraktet som en del av et stopp, og alle observasjoner mellom aggregerte stopp ble betraktet som kjøring.

Observasjonene i datasettet ble deretter klassifisert i forskjellige arbeidsmomenter (oppgaver og aktiviteter). Først ble lasting og lossing identifisert basert på endringer i totalvekt på vogntoget, hvor en endring ned til 30 tonn eller lavere indikerer tomt vogntog og en forutgående lossing, mens en endring til 50 tonn eller mer indikerer fullt vogntog og en forutgående opplasting. Forflytninger mellom stopp ble klassifisert som lasskjøring og tomkjøring basert på gjennomsnittsvekten av de første og siste 10 % av observasjonene for hvert arbeidsmoment. Arbeidsmomenter med kortere sammenhengende varighet enn 180 sekunder ble ikke klassifisert på dette stadiet. Hvis vogntogvekten i begge ender av forflytningen var over 50 tonn, ble arbeidsmomentet klassifisert som lasskjøring, mens en vogntogvekt under 30 tonn i begge ender av forflytningen ble klassifisert som tomkjøring. På grunn av forsinkelse i vogntogets veiesystem, ble også forflytningen klassifisert som tomkjøring hvis de første 10 % var over 50 tonn og de siste under 30 tonn (stoppet før ble klassifisert som lossing), og som lasskjøring hvis det var motsatt (stoppet før ble klassifisert som lasting). Logikken til klassifiseringen er vist i Appendix.

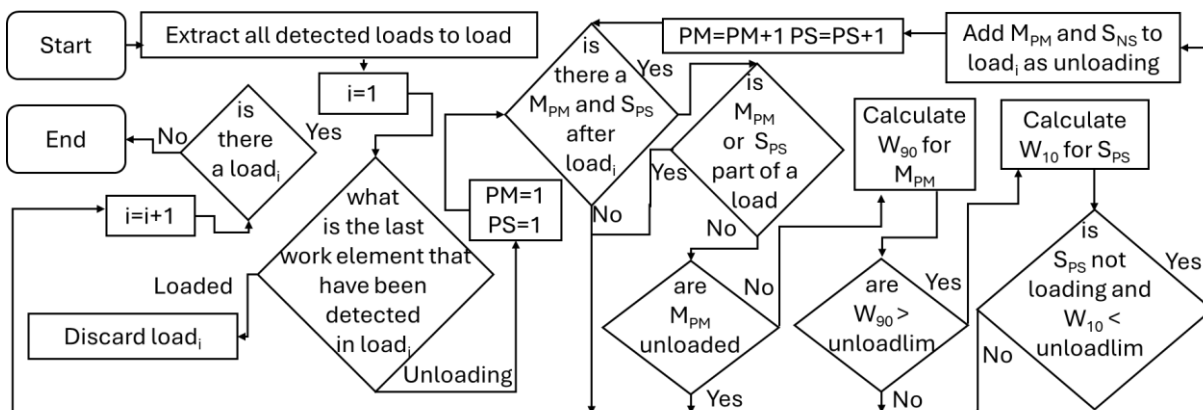
Lasskjøring

Algoritmen for å finne arbeidselementer som skulle klassifiseres som lasskjøring tok utgangspunkt i de arbeidselementene som allerede var blitt klassifisert som lasskjøring. Klassifiseringen av arbeidselementene til lasskjøring begynte fra arbeidselementene som allerede var blitt klassifisert som lasskjøring (Figur 4).



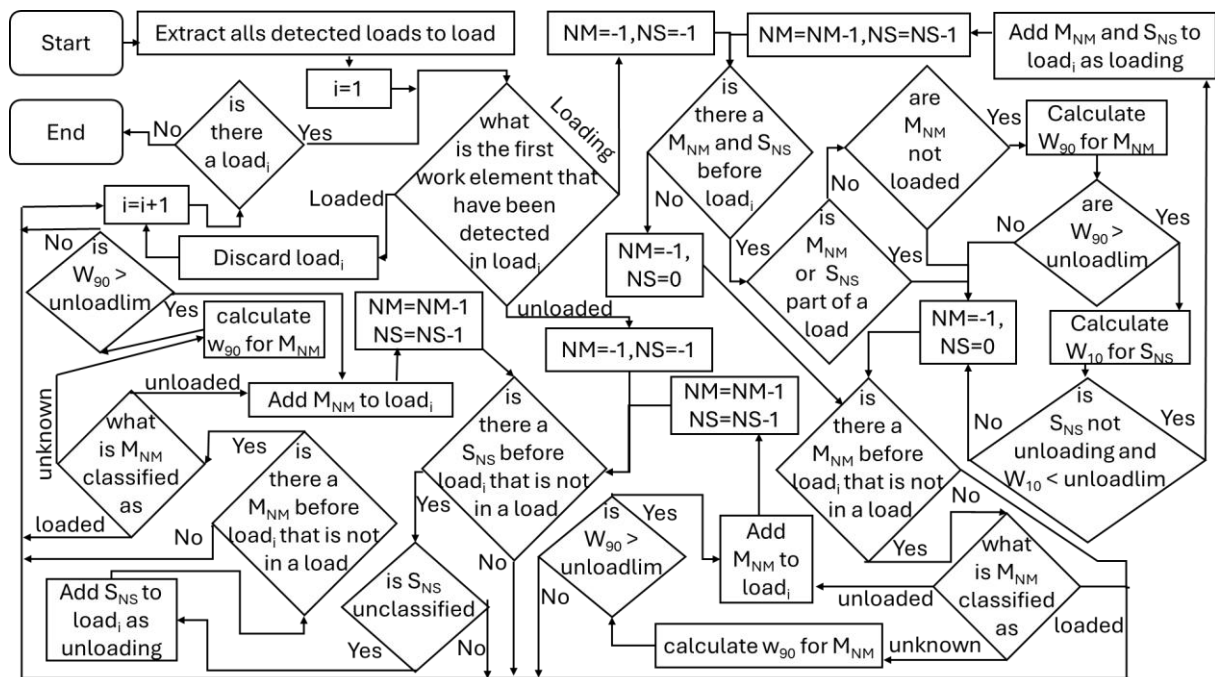
Figur 4: Første del i klassifisering av lasskjøring. DL er en tabell med de observasjonene som er klassifisert som lasskjøring, S er aggregerte stopp, M er forflytning, i er en teller for DL og last, PS og NS er tellere for undersøkelse av aggregerte stopp før og etter den klassifiserte lasten, og PM og NM er tellere for undersøkelse av bevegelse før og etter den klassifiserte lasten. W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under arbeidselementet. Siden i brukes som teller for last og DL er nummereringen av oppdagede laster, er den ikke kontinuertlig.

Etter den første klassifiseringen ble avlastingen ytterligere undersøkt for å se om hele arbeidselementet hadde blitt oppdaget (Figur 5).



Figur 5: Finere klassifisering av avlesing. $Load$ er tabell over oppdagede laster, S er aggregerte stopp, M er bevegelse, i er en teller for last, PS er teller for å undersøke aggregerte stopp etter den klassifiserte lasten, og PM er teller for å undersøke bevegelse etter den klassifiserte lasten. W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under arbeidselementet.

Etter det ble lessing og avlesing ytterligere undersøkt for å se om hele arbeidselementet hadde blitt oppdaget (Figur 6).



Figur 6: Finere klassifisering av lasting og tomkjøring. Load er tabell over oppdagede laster, S er aggregerte stopp, M er bevegelse, i er en teller for last, NS er teller for å undersøke aggregerte stopp før den klassifiserte lasten, og NM er teller for å undersøke aggregerte stopp før den klassifiserte lasten, og NM er teller for å undersøke bevegelse før den klassifiserte lasten. W_{90} er gjennomsnittsverken i løpet av de siste 10 % av tiden under arbeidselementet.

Til slutt ble også den uklassifiserte tiden mellom ulike lass innenfor ett arbeidsskift analysert. Hvis det var en klar deteksjon av avlesing og en klar deteksjon av lasting i neste last, ble alt uklassifisert arbeid i mellomtiden betraktet som tomkjøring.

Uttrekking av verdier for lassene

Tidsbruk, drivstofforbruk og tilbakelagt avstand for arbeidselementene i hvert lass ble hentet ut fra basisdataene. Tidsbruken ble beregnet som summen av alle registreringer som hadde gyldig verdi for drivstofforbruk og hastighet.

Fletting med målenota fra Skogdata

Alle fraktbrevdata med samme tidsstempel under lasting eller kjøring med last ble betraktet som en del av det samme lasset. Tidsstempelet i datasettet indikerer tidspunktet når vogntoget sendte melding om at det var fullastet.

Filtrering for å få kun fullastede vogntog

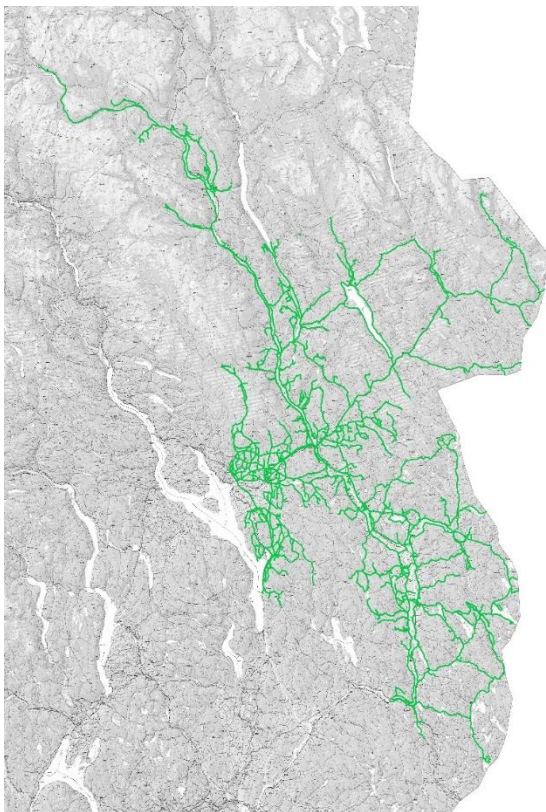
Bare fullastede turer ble inkludert i videre analyser. Hovedgrunnen er at tømmervogntogene delvis har kjørt utenfor studieområdet, hvor det ikke var tillatt med vogntogvekt over 60 tonn. Lassene ble derfor filtrert som vist i Tabell 3. Den øvre grensen i filtreringen var nødvendig fordi det forekom noen åpenbare feil i dataene, hvor enkelte lass hadde flere hundre m³ i lasset. Dataene ble ytterligere filtrert slik at turer med kjøreadstand under 5 km og over 200 km ble fjernet.

Tabell 3: Grenser (tonn) brukt for å filtrere sagtømmer- og massevirkelaster.

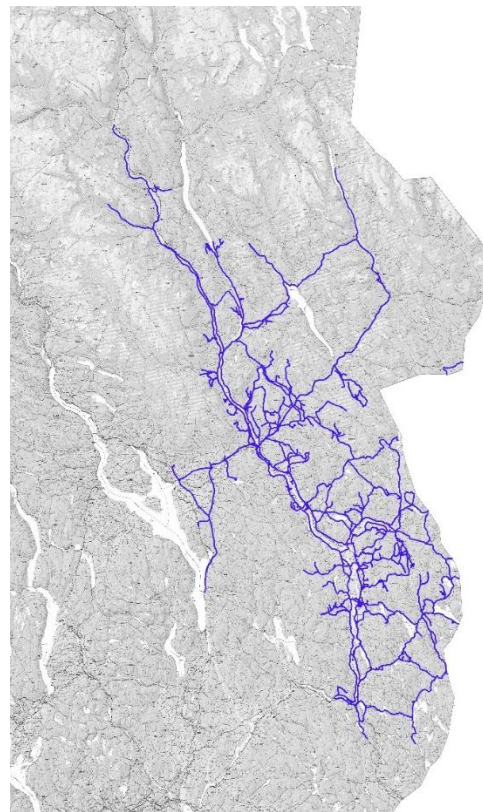
	Vogntogkombinasjon			
	60 t	65 t	68 t	74 t
Sagtømmerlaster	38.0-47.5	42.0-52.5	45.0-56.3	50.0-62.5
Massevirkerlaster	34.5-47.5	38.2-52.5	40.9-56.3	45.5-62.5

Lokalisering av turer

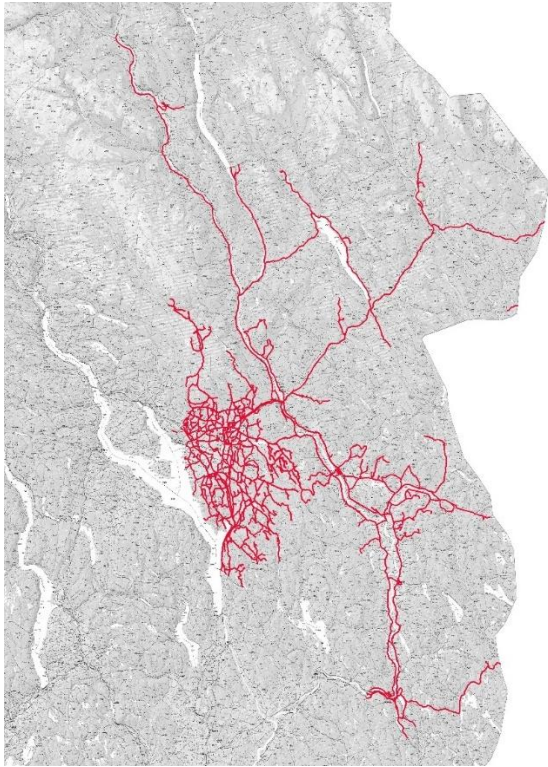
Turene som var koblet til fraktbrev fra skogdata ble plottet på kart (Figur 7, Figur 8, Figur 9 og Figur 10).



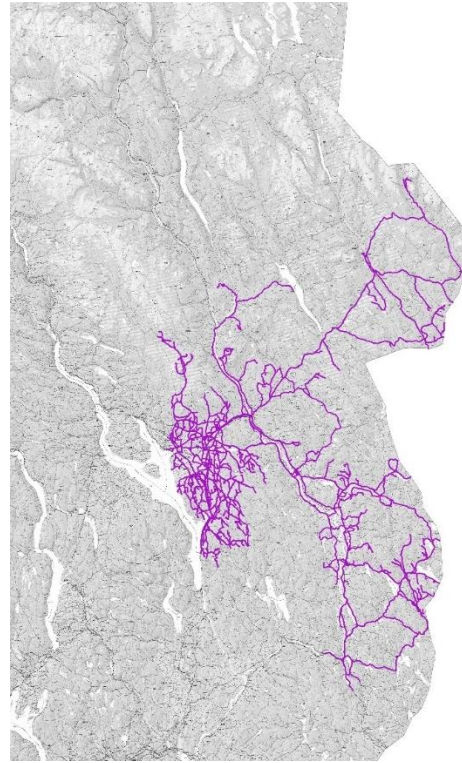
Figur 7: Turer med 60 tonn vogntog som er koblet til målenotaer fra Skogdata



Figur 8: Turer med 65 tonn vogntog som er koblet til målenotaer fra Skogdata



Figur 9: Turer med 68 tonn vogntog som er koblet til målenotaer fra Skogdata



Figur 10: Turer med 74 tonn vogntog som er koblet til målenotaer fra Skogdata

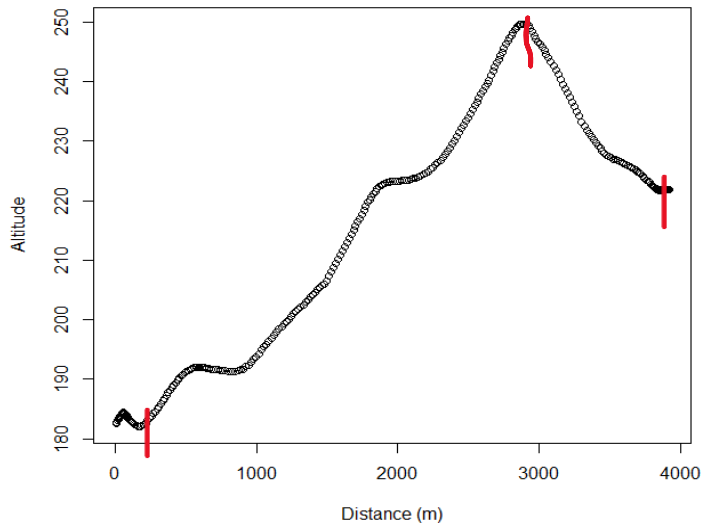
Figurene viser at de ulike vogntogkombinasjonene har gått i litt forskjellige områder. Vogntog med 65 t totalvekt har for det meste gått langs eller øst for Glomma. Vogntog med 68 og 74 tonn har hatt utgangspunkt på Hedmarken der massevirke er kjørt til Sørli-terminalen sør for Stange, og sagtømmeret er kjørt til Løten eller Våler.

Teststrekninger

De ulike vogntogkombinasjonene har gått i ulike områder, og det har vært vanskelig å vurdere om de ulike kombinasjonene har gått under sammenlignbare forhold. For å kunne sammenligne vogntogkombinasjonene under så like forhold som mulig, ble det valgt ut to teststrekninger som var mye brukt. Den ene teststrekningen hadde betydelig stigning opp mot en ås og fall ned på den andre siden, mens den andre strekningen var tilnærmet flat. Transporten på disse strekningene ble analysert nøye. Det var ikke mulig å hente ut detaljert informasjon om lassvolum eller vekt, og derfor måtte sammenligningen begrenses til hastighet og drivstofforbruk per km.

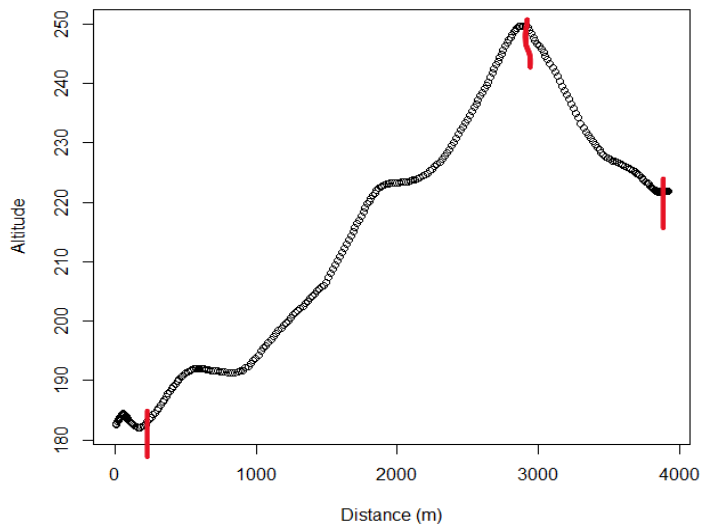
E6 til Sørli-terminalen

Fylkesveg 1902 fra E6 og vestover til Sørli tømmerterminal sør for Stange er en strekning med betydelig stigning fra E6 opp til toppen ved Tallbergroa, og nedoverbakke derfra ned til terminalen (



Figur 11). Kun turer som gikk hele strekningen fra E6 til terminalen eller motsatt ble inkludert i analysen. Det var kun data tilgjengelig for vogntogkombinasjonene på 60, 68 og 74 tonn, og ingen data fra vogntogkombinasjonen på 65 tonn for denne strekningen.

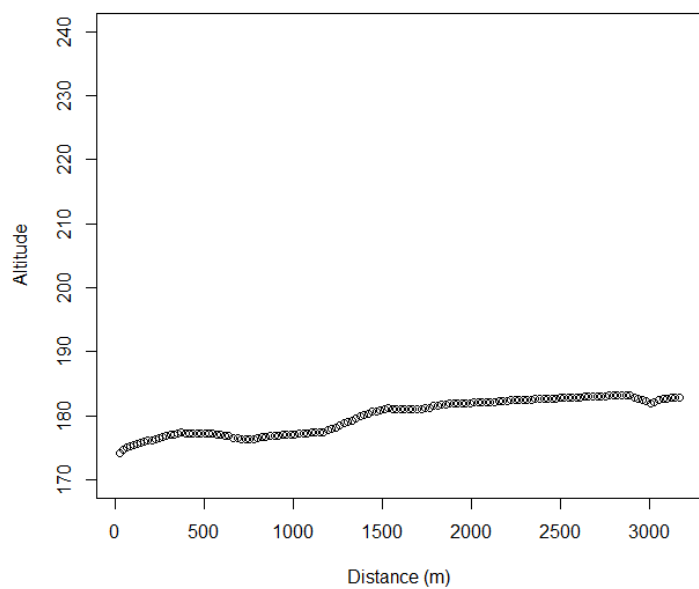
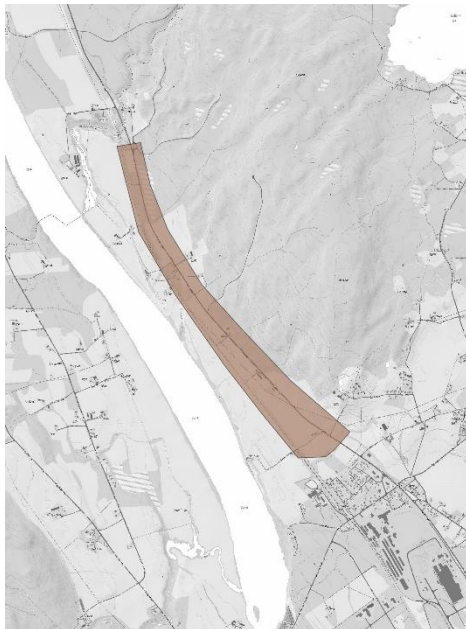




Figur 11: Øverst: kart over veien til Sørli-terminalen. Nederst: høydeprofil for Sørivegen, fra E6 til tømmerterminalen

Braskereidfoss

Riksveg 2 nord for Braskereidfoss er ett eksempel på en relativt flat strekning (Figur 12). Lastede vogntog i sørgående retning og ulastede vogntog i nordgående retning er inkludert i analysen. Her var det et ganske stort antall observasjoner fra alle fire vogntogkombinasjoner.



Figur 12: Venstre: kart over veien nord for Braskereidfoss terminalen. Høyre: høydeprofil for veien til Braskereidfoss.

Statistikk

Analyser av varians (ANOVA) ble utført for å undersøke forskjeller mellom vogntogklasser for fullastede vogntog (Tabell 1). Vogntogklasse ble brukt som forklaringsvariabel, og separate variansanalyser ble utført for responsvariablene: kjøreavstand, kjørehastighet, drivstofforbruk per 10 km (L/10km), og drivstofforbruk per 100m³km (L/100m³km). ANOVAer ble også utført for å undersøke forskjeller mellom vogntogklasse for tomme vogntog, for den tomkjøring som er koblet til et lass. I dette tilfellet ble vogntogklasse igjen brukt som uavhengig variabel, og separate ANOVAer ble utført for responsvariablene: kjøreavstand, kjørehastighet, og drivstofforbruk per 10 km (L/10km). Tukey's HSD-test ble brukt for post-hoc test av gjennomsnitt for å analysere intrafaktorforskjeller.

Ytterligere ANOVAer ble utført for både fulle og tomme vogntog over følgende avstandsgrupper: under 40 km, 40-70 km, og over 70 km. Begge faktorene (vogntogklasse og avstandsgruppe) samt deres interaksjon (vogntogklasse:avstandsgruppe) ble inkludert. Samme responsvariabler som ovenfor ble brukt. Hvis interaksjonseffekten var signifikant, ble post-hoc-analyse utført ved hjelp av estimerte marginale gjennomsnitt og parvise sammenligninger med Tukeys korreksjon for multippel testing. Hvis interaksjonseffekten ikke var signifikant, ble Tukeys HSD post-hoc test brukt.

ANOVAer ble også utført for fullastede og ulastede vogntog på de to vegtypene (Braskereidfoss og Sørli). Vogntogklasse og hellingsklasse (flat, oppover og nedover) ble brukt som forklaringsvariabel samt deres interaksjon (vogntogklasse:hellingsklasse).. Separate ANOVAer ble utført for responsvariablene: kjørehastighet og drivstofforbruk per 10 km (L/10km) for lastede vogntog og ulastede vogntog. Marginale middelverdier ble brukt for post-hoc test av gjennomsnitt som ble brukt for å analysere intrafaktorforskjeller.

En siste ANOVA ble utført mellom vogntogklasse for fullastede og ulastede vogntog, men der kun lastede og ulastede med kjøring over 39 km var med. Vogntogklasse ble brukt som forklaringsvariabel, separate ANOVAer ble utført for responsvariablene: kjøreavstand, kjørehastighet, drivstofforbruk per 10 km (L/10km), og drivstofforbruk per 100m³km (L/100m³km) for lastede vogntog. For ulastede vogntog ble separate ANOVAer utført for responsvariablene: kjøreavstand, kjørehastighet, og drivstofforbruk per 10 km (L/10km). Tukey's HSD ble brukt for post-hoc test av gjennomsnitt ble brukt for å analysere intrafaktorforskjeller.

Forskjell i lass-størrelse mellom sommer og vinterforhold ble undersøkt. Alle lass fra perioden desember til mars ble klassifisert som vinterlass. Alle lass i perioden juni – august ble klassifisert som sommerlass. Forskjellen i volum mellom sommer og vinterforhold ble undersøkt med hjelp av ANOVA der sesong og lassbilstørrelse var forklaringsvariabel og volum var responsvariablen samt deres interaksjon (vogntogklasse:sesong). Marginale middelverdier ble brukt for post-hoc test av gjennomsnitt lass størrelse for å analysere intrafaktorforskjeller.

Alle analyser og statistiske tester ble utført i RStudio (versjon 2023.06.0-421).

Resultater

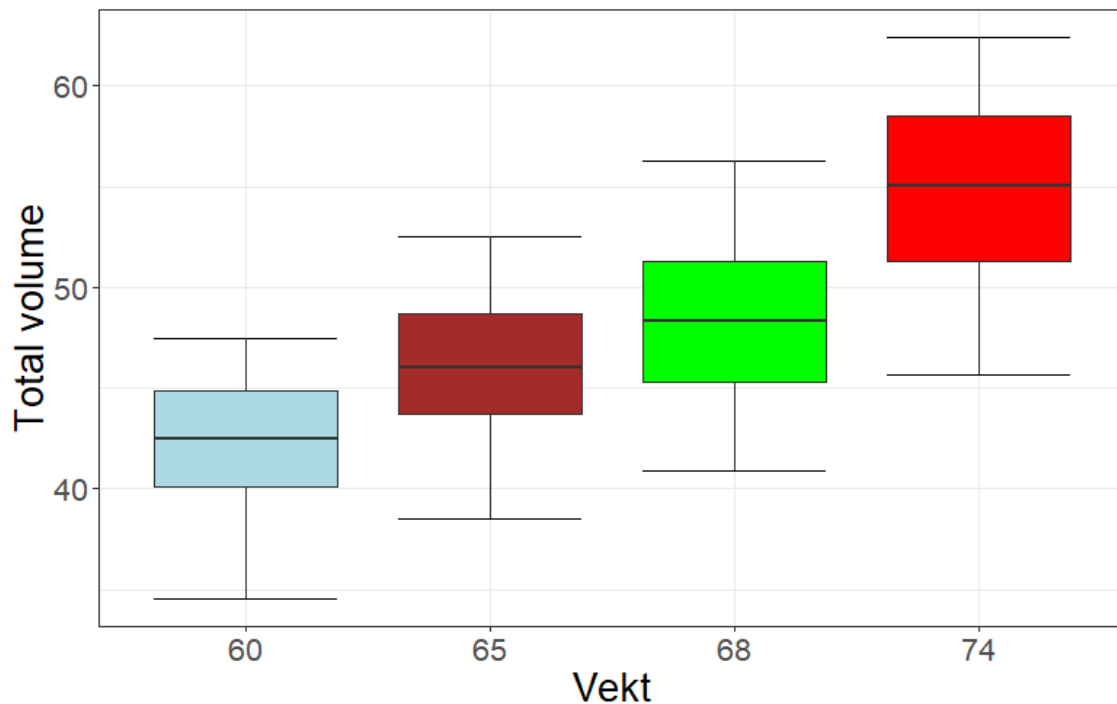
Analyse av turdata

Totalt ble det identifisert 3,916 turer som inneholdt lasting, lasskjøring og lossing. Disse turene utgjør 38,101 timer med data fra CAN-bus. For de fleste ble også kjøringen til velteplassen registrert som tomkjøring (Tabell 4). Av disse ble 854 lass fjernet fra datasettet på grunn av at det var uklart om bilen var lastet under turen, og ytterligere 1,109 turer ble fjernet av forskjellige andre grunner. Alle turer gyldige for analyse etter filtreringen utgjorde 11,540 timer med data.

Tabell 4: Sammendrag av vurderte laster

Analyserte turer			
Vogntogkombinasjon	Lasskjøring	Tomkjøring	Turer fjernet under filtrering
60 t 3+4 aksler	472	446	181
65 t 3 + 5 aksler	258	222	101
68 t 4 + 4 aksler	983	953	706
74 t 4 + 5 aksler	240	234	121

Generelt utnyttet vogntogene lastekapasiteten godt (tabell 3, figur 13). Gjennomsnittsverdiene blant alle vurderte laster økte i henhold til vogntogklassene, og var 42.8 m³ (60t), 45.7 m³ (65t), 48.2 m³ (68t) til 55.1 m³ (74t) (Figur 13).



Figur 13: Median og kvartilområde av lassvolum (m³) for vogntogkombinasjonene (60 t, 65 t, 68 t, 74 t) for alle validerte turer.

Resultater fra test-strekningene

Lastet kjøring

Drivstofforbruket økte med økende totalvekt både i stigningen inn mot Sørli-terminalen og på den flate strekningen ved Braskereidfoss, mens det ikke var noen signifikant forskjell i dieselforbruket under kjøring i nedoverbakke (tabell 6).

Ved lass-kjøring på den flate strekningen ved Braskereidfoss var hastigheten størst for 74 t vogntogene og lavest for 60 t og 65 t vogntogene **Feil! Fant ikke referanseilden..** Ved lasskjøring i bakkene mot Sørli-terminalen hadde 60 t vogntogene større hastighet enn 68 t og 74 t vogntogene (65 t vogntogene kjørte ikke denne strekningen).

Tabell 5: Drivstofforbruk og hastighet for lastede vogntog på test-strekningene. Verdier innenfor samme helningsgruppe som deler bokstav er ikke signifikant forskjellige.

Vogntog-kombinasjon	Drivstofforbruk		Kjørehastighet		Antall lass
	(L/10km)	Std-avvik	(km/h)	Std-avvik	
Flat strekning					
60t	6.06 ^A	0.51	78.7 ^A	1.8	276
65t	6.87 ^B	0.59	78.8 ^A	1.7	187
68t	6.50 ^C	0.59	80.0 ^B	2.8	548
74t	7.30 ^D	0.67	81.5 ^C	2.9	816
Motbakke					
60t	13.61 ^A	0.53	66.4 ^A	4.2	30
68t	14.67 ^B	1.04	60.9 ^B	4.5	488
74t	15.94 ^C	1.31	61.6 ^C	4.1	748
Nedoverbakke					
60t	0.18 ^A	0.09	49.0 ^A	4.4	24
68t	0.30 ^A	0.33	45.4 ^B	4.2	369
74t	0.33 ^A	0.37	46.1 ^C	4.9	596

Kjøring uten last

Ved tomkjøring på den flate strekningen ved Braskereidfoss økte dieselforbruket med økende vogntogvekt. Forskjellen var signifikant mellom 60 t, 68 t og 74 t mens 65 t ikke var signifikant forskjellig fra 60 t (tabell 6). Det var ingen statistisk signifikant forskjell i drivstofforbruk i nedoverbakke for ulastede vogntog. Ved tomkjøring i stigningene ved Sørli-terminalen økte drivstoff-forbruket signifikant med økende totalvektklasse..

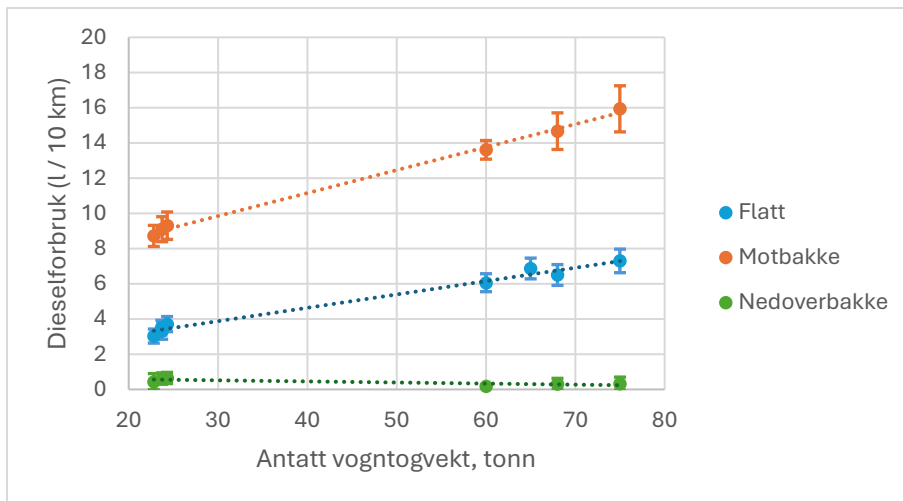
Ved tomkjøring på den flate strekningen ved Braskereidfoss økte hastigheten med økende totalvektklasse for vogntogene (**Feil! Fant ikke referanseskilden.**). I unnakjøring ved Sørli-terminalen var det en liten men signifikant forskjell på kjørehastighet mellom alle vogntogkombinasjonene, hvor hastigheten også i dette tilfellet økte med økende

totalvektklasse. I stigningene sank hastigheten med økende totalvektklasse, men forskjellen var signifikant bare mellom 68 t og 74 t vogntogene

Tabell 6: Drivstofforbruk og hastighet for ulastede vogntog på ulike test-strekningene. Verdier innenfor samme helningsgruppe som deler bokstav er ikke signifikant forskjellige.

Vogntog-kombinasjon	Drivstofforbruk		Hastighet		Antall lass
	L/10km	Std-avvik	(km/h)	Std-avvik	
Flat strekning					
60 t	3.03 ^A	0.40	79.50 ^A	1.39	249
65 t	3.51 ^B	0.42	80.10 ^{ABC}	0.73	23
68 t	3.33 ^{BC}	0.48	80.72 ^B	2.82	354
74 t	3.71 ^C	0.43	82.76 ^C	1.96	624
Motbakke					
60 t	8.72 ^A	0.60	56.28 ^{BC}	5.52	33
68 t	9.10 ^B	0.71	53.97 ^B	5.87	477
74 t	9.30 ^C	0.78	52.12 ^C	5.71	735
Nedoverbakke					
60 t	0.44 ^A	0.46	68.58 ^A	4.73	33
68 t	0.62 ^A	0.32	69.75 ^B	6.46	479
74 t	0.65 ^A	0.32	70.55 ^C	6.90	732

Figur 14 illustrerer dieselforbruket per mil fra **Feil! Fant ikke referanseilden.** for de ulike vogntogklassene når de kjører med og uten lass på strekningene med flatt terreng, i stigning og i nedoverbakke. Figuren indikerer at drivstofforbruket øker med økende lass-størrelse både ved kjøring i stigninger og på flate veger, mens forskjellen er nokså ubetydelig i nedoverbakker.



Figur 14. Registrert dieselforbruk for de ulike veg-hellinger og vogntogkombinasjoner.

Sammenligninger ved forskjellige avstandskategorier

For å se hvorvidt kjøreavstand påvirker dieselforbruk og hastighet for de ulike vogntogkombinasjonene, ble datasettet klassifisert i tre forskjellige avstandskategorier: langturer med mer enn 70 km transportavstand, mellomlange turer med 40-70 km avstand, og korte turer med mindre enn 40 km transportavstand.

For lastede vogntog på lange transporter var hastigheten noe høyere for 60 t og 68 t enn for 65 t og 74 t bilene, men forskjellen var statistisk signifikant bare mellom 60 t og 65 t vogntogene (Tabell 7). Dieselforbruket økte med økende totalvekt, men forskjellen var nokså liten og statistisk signifikant bare mellom vogntogene på 74 t og de øvrige vogntogkombinasjonene. Når dieselforbruk regnes per transportert enhet, synker forbruket med økende vogntogvekt (Tabell 7).

For ulastede vogntog på strekninger over 70 km, hadde 60 t vogntogene vesentlig lavere hastighet enn de øvrige vogntogene. Dieselforbruket ved tomkjøring på lange strekninger var omtrent likt for alle vogntogene (Tabell 7).

På mellomlange distanser (40-70 km) var det stort sett ikke noen forskjell i hastighet mellom vogntogkombinasjonene når de kjørte hhv med og uten last. Unntaket var 60t vogntogene, som hadde en lavere hastighet enn de andre ved tomkjøring. Drivstoff-forbruket økte med økende vogntogstørrelse når de kjørte med lass, men var nokså likt mellom de ulike vogntogene ved tomkjøring (Tabell 7). Dieselforbruket per kubikkmeter gikk ned med økende totalvekt.

For korte kjøreavstander var kjørehastigheten for lastede vogntog nokså lik, med unntak av 68t vogntogene som hadde en litt høyere hastighet enn de øvrige vogntogene. Drivstoff-forbruket økte med økende vogntogvekt, både ved kjøring med og uten lass. Drivstoff-forbruket per kubikkmeter sank derimot med økende vogntogstørrelse.

Tabell 7: Gjennomsnitt og standardavvik for vogntogkombinasjonene når dataene deles inn i forskjellige avstandsklasser. For verdier på samme rad med samme bokstav er ikke forskjellen statistisk signifikant.

	Vogntogkombinasjon			
	60t	65t	68t	74t
Lasskjøring >70 km				
Kjøreavstand (km)	93.3 (25.0) ^A	106.7 (30.7) ^B	96.9 (31.3) ^A	83.3 (10.2) ^D
Hastighet (km/h)	59.1 (8.9) ^A	54.8 (10.4) ^B	58.1 (9.8) ^{AB}	55.6 (11.3) ^{AB}
Drivstofforbruk (L/10km)	5.73 (0.96) ^A	5.81 (0.83) ^A	5.96 (0.70) ^A	6.54 (0.69) ^B
Drivstofforbruk (L/100m ³ km)	1.33 (0.23) ^A	1.25 (0.20) ^{AB}	1.22 (0.16) ^B	1.17 (0.16) ^B
Tomkjøring >70 km				
Kjøreavstand (km)*	85.6 (18.6) ^A	123.7 (45.0) ^B	99.8 (33.7) ^C	81.7 (10.0) ^A
Hastighet (km/h)	53.1 (13.3) ^A	60.3 (8.8) ^B	59.6 (8.2) ^B	58.8 (6.3) ^B
Drivstofforbruk (L/10km)	4.29 (0.78) ^A	4.06 (0.62) ^A	4.29 (0.44) ^A	4.31 (0.33) ^A
Lasskjøring 40-70 km				
Kjøreavstand (km)	51.6 (7.9) ^A	57.0 (9.2) ^B	53.0 (9.0) ^{BA}	54.2 (9.0) ^{BA}
Hastighet (km/h)	53.1 (8.8) ^A	54.8 (6.5) ^A	55.2 (10.0) ^A	55.1 (8.1) ^A
Drivstofforbruk (L/10km)	5.71 (1.04) ^A	5.46 (0.78) ^A	6.06 (0.83) ^B	6.42 (0.77) ^B
Drivstofforbruk (L/100m ³ km)	1.35 (0.24) ^A	1.21 (0.21) ^{CD}	1.26 (0.20) ^C	1.15 (0.15) ^D
Tomkjøring 40-70 km				
Kjøreavstand (km)	51.1 (7.7) ^A	53.0 (7.6) ^A	49.9 (8.1) ^A	51.9 (9.1) ^A
Hastighet (km/h)	51.3 (12.8) ^A	53.3 (7.1) ^{AB}	56.1 (8.4) ^B	56.4 (8.3) ^B
Drivstofforbruk (L/10km)	4.32 (0.65) ^A	3.99 (0.58) ^B	4.40 (0.62) ^A	4.42 (0.49) ^A

Lasskjøring <40 km				
Kjøreavstand (km)	27.2 (9.0) ^A	28.1 (9.2) ^A	26.7 (7.7) ^A	22.1 (8.7) ^B
Hastighet (km/h)	46.8(9.1) ^A	48.5 (9.5) ^{AB}	50.0 (8.1) ^B	47.4 (8.0) ^A
Drivstofforbruk (L/10km)	5.73 (1.54) ^A	5.76 (0.86) ^A	6.14 (1.02) ^C	7.53 (1.63) ^D
Drivstofforbruk (L/100m ³ km)	1.37 (0.35) ^A	1.25 (0.22) ^B	1.29 (0.25) ^B	1.44 (0.32) ^A
Tomkjøring <40 km				
Kjøreavstand (km)	25.4 (10.0) ^A	24.1 (9.6) ^{AB}	22.4 (10.1) ^B	21.8 (10.0) ^B
Hastighet (km/h)	45.5 (11.6) ^A	45.3 (11.1) ^A	48.3 (9.8) ^B	45.7 (10.5) ^A
Drivstofforbruk (L/10km)	4.70 (1.02) ^A	4.85 (1.10) ^A	4.86 (0.92) ^A	5.21 (1.52) ^B

Analyse av turdata for middels og lange transportavstander

Om man ser på datasettet for middels lange og lange transportavstander under ett får man følgende observasjoner (Tabell 8). For lastede vogntog var det en signifikant økning i dieselforbruket med økende totalvekt. Unntaket var 65 t vogntogene, som hadde et litt lavere forbruk enn 60 t vogntogene, men forskjellen var ikke statistisk signifikant. Dieselforbruk per transportert enhet (l/ 100m³ km) gikk likevel ned ved økende totalvekt. Reduksjonen var på hhv 8,2, 7,5 og 13,4 % for vogntogkombinasjonene på 65, 68 og 74 tonn. Det var ingen signifikant forskjell i hastighet mellom de ulike vogntogkombinasjonene ved lasskjøring. Ved tomkjøring var dieselforbruket likt for alle vogntogkombinasjoner bortsett fra de på 65 t, som ved tomkjøring hadde et signifikant lavere dieselforbruk enn de øvrige. De litt overraskende resultatene for 65 t vogntogene kan komme av at disse vogntogene i stor grad holdt seg langs eller øst for Glomma, mens de øvrige i større grad kjørte i områdene rundt Hamar, og at dette gav merkbare forskjeller i topografi og kjøremønster. Det var ingen signifikant forskjell mellom vogntogkombinasjonene i kjørte distanser. Resultatene viser videre at de lettere vogntogene (60 t og 65 t) har kjørt tomturene med noe lavere hastighet enn de tyngre vogntogene (tabell 8).

Tabell 8 Drivstofforbruk, hastighet, gjennomsnitt transportavstand og drivstofforbruk per m³km for lastede og ulastede vogntog på middels og lange transportavstandsklasser. Verdier innenfor samme variabel og vogntogkombinasjon som deler bokstav er ikke signifikant forskjellige. Verdier i parentes er standardavvik.

Vogntogkombinasjon				
	60 t	65 t	68 t	74 t
Lasskjøring				
Antall obs.	259	128	431	131
L/10km	5.72 (1.01) ^A	5.58 (0.81) ^A	6.01 (0.77) ^B	6.48 (0.73) ^C
Avstand (km)	66.1 (25.54) ^A	73.67 (30.38) ^B	73.9 (31.45) ^A	68.84 (17.46) ^C
km/h	55.15 (9.27) ^A	54.84 (8.02) ^A	56.59 (9.98) ^A	55.37 (9.81) ^A
L/100m ³ km	1.34 (0.24) ^A	1.23 (0.21) ^B	1.24 (0.19) ^B	1.16 (0.15) ^C
Tomkjøring				
Antall obs.	203	87	249	98
L/10km	4.31 (0.69) ^A	4.01 (0.59) ^B	4.36 (0.57) ^A	4.39 (0.43) ^A
Avstand (km)	61.42 (20.02) ^A	68.1 (36.68) ^A	65.28 (30.72) ^A	62.89 (17.49) ^A
km/h	51.77 (12.88) ^A	54.9 (7.9) ^{AB}	57.13 (8.43) ^B	57.2 (7.64) ^B

I Tabell 9 er distanser, hastigheter og drivstofforbruk sammenlignet ved bruk av hele datasettet. De korte turene utgjør om lag halvparten av turene i hele datasettet (tabell 4), og dette gjør at resultatene her skiller seg en del fra de middels lange og lange turene. For lastede vogntog var det ingen betydelig forskjell i gjennomsnittlig kjørelengde mellom vogntogkombinasjonene (tabell 9). Den gjennomsnittlige kjørehastigheten var høyest for 68 t og lavest for 60 t vogntogene, men det var ikke noen klar trend for at vogntogkombinasjonene med større totalvekt generelt oppnådde hverken lavere eller høyere hastighet. Drivstofforbruket per 10 km økte generelt med økende vekt klasse både ved kjøring med og uten lass, men forskjellen var ikke alltid signifikant mellom vogntogkombinasjonene. Drivstofforbruket per transportert enhet (l / 100m³km) var betydelig høyere for vogntogkombinasjonen på 60 t sammenlignet med de tre andre vogntogkombinasjonene, som oppnådde nokså likt dieselforbruk per transportert enhet i denne sammenligningen. For ulastede vogntog var gjennomsnittlig kjørelengde kortere for 68t vogntogene sammenlignet med alle andre (tabell 9). Hastigheten var litt høyere for vogntogklasse 68 t sammenlignet med vogntogklasse 60 t, men det var ikke noen trend som indikerer at økende totalvekt klasse påvirker kjørehastigheten ved tomkjøring i noen bestemt retning.

Tabell 9: Gjennomsnitt og standardavvik for vogntogkombinasjon når hele datamengden brukes. Verdier med samme bokstav i en rad er ikke signifikant forskjellige.

	Vogntogkombinasjon			
	60 t	65 t	68 t	74 t
Lasskjøring				
Distanse per tur (km)	48.6 (27.7) ^A	50.7 (31.9) ^A	47.4 (31.9) ^A	47.6 (27.3) ^A
Hastighet (km/h)	51.4 (10.1) ^A	51.7 (9.3) ^{AB}	52.9 (9.5) ^B	51.8 (9.8) ^{AB}
Drivstofforbruk (L/10km)	5.75 (1.27) ^A	5.67 (0.84) ^A	6.08 (0.92) ^B	6.96 (1.32) ^D
Drivstofforbruk (L/100m ³ km)	1.36 (0.29) ^A	1.24 (0.21) ^B	1.27 (0.22) ^B	1.28 (0.28) ^B
Lassvolum (m ³)	42.81 (2.89)	45.86 (3.6)	48.17 (3.75)	55.11 (4.38)
Tomkjøring				
Distanse per tur (km)	41.7 (23.7) ^A	41.2 (32.4) ^A	33.5 (26.0) ^B	38.9 (24.5) ^A
Hastighet (km/h)	48.3 (12.6) ^A	49.0 (11.1) ^{AB}	50.5 (10.2) ^B	50.5 (11.1) ^{AB}
Drivstofforbruk (L/10km)	4.52 (0.91) ^A	4.53 (1.02) ^A	4.73 (0.88) ^B	4.87 (1.27) ^B

Sesongvariasjon i lassvolum

Vogntogkombinasjonene for 68 t og 74 t totalvekt hadde signifikant lavere lassvolum om vinteren enn om sommeren (tabell 10). For vogntogkombinasjonene for 65 og 60 tonn var det ikke noe signifikant forskjell i lassvolum mellom sommer og vinter.

Tabell 10. Gjennomsnitt lass-volumer i ulike sesonger. Verdier for samme vogntog som har forskjellige bokstaver har signifikant forskjell.

Sesong	Vogntogkombinasjon			
	60 t	65 t	68 t	74 t
Sommer	42.8 ^A	46.6 ^A	49.2 ^A	55.1 ^A
Vinter	42.4 ^A	45.6 ^A	47.5 ^B	53.7 ^B

Kostnadsberegning

Målet med kostnadsberegningen var å sammenligne kostnadseffektiviteten (i kr/tonn-km og kr/m³-km transportert virke) for de ulike vogntogkombinasjonene. Drivstofforbruk og hastighet ble hentet fra dataene som var samlet inn gjennom studiet. Kjøreavstanden ble satt til 75 kilometer hver veg (tur-retur), med maksimale laster for hver vogntogkombinasjon.

Kostnadsfaktorer ble dels samlet inn fra offentlig statistikk og dels innhentet fra deltakende transportører. Siden det ikke var belegg for å hevde at vogntogkombinasjonene påvirket hastigheten i noen bestemt retning, ble hastigheten satt til 54 km/h både for tomkjøring og lasskjøring for alle vogntogkombinasjoner. Diesel-forbruk ble hentet fra resultatene for avstandsklassene over 70 kilometer i tabell 7.

Kostnadsberegningene er basert på standard metoder for maskinkostnadskalkyler, med inndeling i faste og variable kostnader. De faste kostnadene bestod av avskrivninger, renter, vegavgift, forsikring og personalkostnader. Variable kostnader bestod av dekk, vedlikehold og reparasjon, AdBlue og drivstoff.

Alle kostnadsfaktorer som inngår i beregning av totale kostnader er presentert i tabell 11.

*Tabell 11: Faste og variable kostnadsfaktorer for hver vogntogklasse i eksempelkostnadsberegningen. * refererer til data samlet inn fra intervjuer, ** volum er beregnet med omregningsfaktor 0,919 t/m³ (50 % gransagtømmer/ 50 % granmassevirke) basert på Fjeld & Dahlin (2020) og nyttelasskapasitet (tonn)., *** data fra tabell 7. Dieselpriisen er fra ssb.no og AdBlue-priisen er basert på priser i nettbutikker.*

Kostnadsfaktor	Vogntogkombinasjon				Unit
	60t	65t	68t	74t	
Kjøpesum på bil*	2,975,000	2,975,000	3,100,000	3,100,000	kr
Kjøpesum på henger*	1.050.000	1.150.000	1.050.000	1.150.000	kr
Kjøpesum på kran*	1.100.000	1.100.000	1.100.000	1.100.000	kr
Avskrivningstid for bil, henger og kran	5	5	5	5	år
Restverdi bil*	750.000	750.000	850.000	850.000	kr
Restverdi henger*	315.000	345.000	315.000	345.000	kr
Restverdi kran*	330.000	330.000	330.000	330.000	kr
Rentenivå	7.5	7.5	7.5	7.5	%
Vegavgift*	5.000	5.000	5.000	5.000	kr/år
Forsikring*	55.000	55.000	55.000	55.000	kr/år
Administrativ kostnad*	150.000	150.000	150.000	150.000	kr/år
Arbeidstid per år	2400	2,400	2,400	2,400	timer/år
Lønn, timepris uten sidekostnader*	266	266	266	266	kr/time
Nyttelass	38	42	45	50	tonn /lass
Nyttelass, m ³ fast**	41.35	45.70	48.97	54.41	m ³ /lass

Dekk-kostnader*	1,10	1,27	1,27	1,38 kr/km
Reparasjon/vedlikehold*	2,50	2,71	2,83	3,08 kr/km
AdBlue forbruk, andel av dieselforbruk*	5	5	5	5 %
AdBlue	9	9	9	9 kr/L
Dieselpriis	15,5	15,5	15,5	15,5 kr/L
Dieselforbruk, lasskjøring***	0.573	0.581	0.596	0.654 L/km
Hastigheten lasskjøring, antatt	54	54	54	54 km/h
Kjøredistanse med lass	75	75	75	75 km
Dieselforbruk, tomkjøring***	0.429	0.406	0.429	0.431 L/km
Hastigheten tomkjøring, antatt	54	54	54	54 km/h
Distanse tomkjøring	75	75	75	75 km
Lasting, gjennomsnitt*	0.75	0.83	0.92	1.00 timer/lass
Lossetid, gjennomsnitt*	0.25	0.25	0.25	0.25 timer/lass
Pausetid, gjennomsnitt*	0.25	0.25	0.25	0.25 timer/lass

I beregningen av faste kostnader brukte vi lineær avskrivning for å beregne kapitalkostnadene for tømmervogntog.

$$C_{avskr} = \frac{Pr_1 - Pr_2}{Avskrivningstid} \quad [1]$$

Hvor;

C_{avskr} er den årlige avskrivningskostnaden for en maskin/kjøretøy, kr

Pr_1 is kjøpesum for maskinen/kjøretøyet, kr

Pr_2 er maskinens/kjøretøyets restverdi etterlevetid, kr

Avskrivningstiden er forventet avskrivningstid for maskinen, i antall år

Denne metoden fordeler kostnadene jevnt over vogntogets brukstid. Den årlige avskrivningen er deretter inkludert i den samlede kostnadsberegningen for vogntoget. Metoden er enkel, noe som gjør den til en hyppig brukt avskrivningsmetode i kostnadsberegninger. Imidlertid antar den at lastebilens verdi avtar med en konstant hastighet, noe som kanskje ikke gjenspeiler det reelle verditapet år for år gjennom bilens levetid.

Rentekostnadene for kapitalen som er bundet i vogntoget ble beregnet med følgende ligning:

$$C_{int} = \left(\frac{Pr_1 + Pr_2}{2} \right) * Int \% \quad [2]$$

Hvor;

C_{int} er den årlige rentekostnaden for en maskin/kjøretøy, kr

$Int \%$ er renten, %

I kostnadsberegningene ble faste kostnader summert opp til totale årlige kostnader for hver vogntogklasse og deretter delt på antall arbeidstimer. Deretter ble de faste timekostnadene beregnet per enhet ut fra medgått arbeidstid per lass. Variable kostnader ble beregnet ut fra tilbakelagt avstand (kjøring tom og lastet) og tidsbruken på hver enkelt arbeidsoperasjon (tomkjøring, lasting, lasskjøring, lossing) samt pausetid. Til slutt ble både faste og variable kostnader summert opp per lass og delt med nyttelasten.

De største faste kostnadene var lønnskostnader og avskrivninger (tabell 12). Rentekostnadene utgjorde en relativt liten del (10 %) av de faste kostnadene. Vogntog med flere aksler har noe høyere faste kostnader, men økningen er relativt liten. Vogntogkonfigurasjonene på 65 t, 68 t og 74 t hadde henholdsvis 0.9 %, 0.6 %, og 1.5 % høyere faste kostnader enn referansevogntoget på 60 t totalvekt.

Tabell 12: Faste kostnader for de studerte vogntogklassene i eksempelberegningen.

Kostnadsfaktor	Vogntogkombinasjon				Enhet
	60 t	65 t	68 t	74 t	
Rente på bil	139.688	139.688	148.125	148.125	kr/år
Rente på henger	51.188	56.063	51.188	56.063	kr/år
Rente på kran	53.625	53.625	53.625	53.625	kr/år
Avskrivning bil	445.000	445.000	450.000	450.000	kr/år
Avskrivning henger	147.000	161.000	147.000	161.000	kr/år
Avskrivning kran	154.000	154.000	154.000	154.000	kr/år
Lønnskostnader (50 % tilleggskostnader inkludert)	997.500	997.500	997.500	997.500	kr/år
Total faste kostnader (forsikring og administrasjon inkl.)	2.198.000	2.216.875	2.211.438	2.230.313	kr/år

Det var små forskjeller i faste kostnader mellom de alternative vogntogkombinasjonene. For 60 tonns vogntog utgjorde de faste kostnadene 916kr / time. For 65 tonns vogntog var denne kostnaden 924kr / time, for 68 tonns bil var den 921kr / time, og for 74 tonns vogntog utgjorde de faste kostnadene kr 929 per time.

Basert på både de faste og variable kostnadene beregnet vi kostnaden per lass og per m³ for transport. Vi benyttet de faste timekostnadene og tidsforbruket for hver arbeidssyklus (tabell 11), samt de variable kostnadene for å finne kostnad per lass.

De største kostnadspostene er faste kostnader, diesel, dekk og reparasjon. Kostnadene økte litt med økende antall akslinger, og var 9% høyere for et 74 t vogntog enn et 60 t vogntog. Kostnader per lass for er presentert i tabell 13.

Tabell 13: Beregnede variable og faste kostnader per lass ved 75 km transportavstand.

Kostnadsfaktor	Vogntogklasse				Unit
	60 t	65 t	68 t	74 t	
Variable kostnader					
Dieselskostnad tomkjøring	499	472	499	501	kr/lass
AdBlue-kostnad, tomkjøring	14,5	13,7	14,5	14,5	kr/lass
Dieselskostnad lasskjøring	666	675	693	760	kr/lass
AdBlue-kostnad, lasskjøring	19,3	19,6	20,1	22,1	kr/lass
Dekk- og reparasjon, tomt og lastet	540	596	614	668	kr/lass
Faste kostnader					
Tomkjøring	1.272	1.283	1.280	1.291	kr/lass
Lessing	687	769	848	929	kr/lass
Lasskjøring	1.272	1.283	1.280	1.291	kr/lass
Avlessing	229	231	230	232	kr/lass
Pausetid	229	231	230	232	kr/lass
Alle kostnader, (tomkjøring, lasting, lasskjøring, avlessing, pause)	5.427	5.574	5.708	5.941	kr/lass

Til slutt ble de totale kostnadene for hver vogntogkombinasjon delt på nyttelasten for å få sammenlignbare tonnbaserte kostnader for hver kombinasjon, for en standardisert rundtur (75km lasskjøring, 75km tomkjøring, inkludert gjennomsnittlig lastetid, lossing og pausetider). For 60-tonns vogntog var kostnaden per tonn for hele turen 143kr / tonn. For 65-tonns vogntog var kostnaden 133kr / tonn (93 % av kostnadsnivået for 60-tonns vogntog), for 68-tonns vogntog 127kr / tonn (89 %), og for 74-tonns vogntog var kostnaden 119kr / tonn (83 %).

Beregnet per kubikkmeter per 10 kilometer var kostnadene for 60-tonns kombinasjonen 8,88 kr / m³ / 10 km, for 65-tonns kombinasjonen 8,13 kr / m³ / 10 km, for 68-tonns kombinasjonen 7,78 kr / m³ / 10 km, og for 74-tonns kombinasjonen 7,28 kr / m³ / km i vår standardiserte rundtur.

Diskusjon og konklusjon

Problemstilling og metodikk

Prosjektet hadde som mål å identifisere den optimale kjøretøykonfigurasjonen for typiske forhold og geografier i Norge, med hensyn til bruk av 8- og 9-akslede tømmervogntog med en totalvekt på opptil 74 tonn. Tre potensielle vogntogkombinasjoner (65 t med 3+5 aksler; 68 t med 4+4 aksler; og 74 t med 4+5 aksler) sammen med dagens standard vogntog (60 t med 3+4 aksler) var med i prosjektet. Data fra kjøretøyene, med resultatene fra påfølgende analyser, ble lagt til grunn for å gjøre en sammenligning av økonomien i de alternative kombinasjonene.

Studiedesignet og datamaterialet gav noen utfordringer og begrensninger som bør hensyntas ved vurdering av resultatene. En begrensning ligger i at tre studerte enheter av hver vogntogkombinasjon gir en begrenset representasjon, som gjør det vanskelig å skille effekten av vogntogkombinasjon fra effekten av andre faktorer som spiller inn på målinger og resultater. Dette gjelder både tekniske forskjeller som stammer fra grunnkjøretøyet (motor, drivlinje, dekk, osv.), og individuelle kjørevaner som også kan ha stor innvirkning på drivstofforbruket (Noreland, 2024). Videre vil ulikheter i veg-geometrien (stigning, kurvatur, rullemotstand) på vegene som ble kjørt av det enkelte kjøretøy bidra til forskjeller i observasjonene som ikke blir forklart av analysene. Geografien som er kjørt av den enkelte vogntogkombinasjon er vist i figur 7, figur 8, figur 9 og figur 10, og indikerer at vogntogene har gått i litt forskjellig geografi. Alle sagbruk og terminaler som ligger i Glomma-dalføret ligger f.eks. lavt i terrenget med flate områder rundt, noe som gir lite motkjøring med lass. Vegen inn til Sørli-terminalen i Stange har betydelig mer stigning som må forseres med lass, noe som vil påvirke drivstofforbruket. Forskjeller i terrengforhold og stigninger på vegnettet kan derfor ha påvirket resultatene i studien, spesielt for korte avstander.

Prosjektet ble igangsatt under Covid19-perioden, noe som forstyrret bilindustriens produksjonskapasitet. Dette forsinket leveringen av vogntogene med flere aksler som var bestilt for prøveordningen. Følgelig ble datainnsamling fra de tolv enhetene ikke utført samtidig, noe som undergraver noen av de sesongmessige effektene som skulle bli utjevnet gjennom en felles tolv måneders overvåkningsperiode. Spesielt de 9-akslede kombinasjonene er generelt representert gjennom en kortere overvåkningsperiode sammenlignet med de andre. Selv om ett av de 9-akslede vogntogene ble fulgt lengre enn de planlagte 12 månedene, opererte dette vogntoget hovedsakelig utenfor pilotområdet, slik at den ekstra nyttelasten i liten grad kunne nyttiggjøres.

Sammenstillingen av lassmålinger fra Skogdata og CAN-bus-data fungerte ikke rett frem etter intensjonene. En stor mangel ved CAN-bus-avlesningene var at vektdataene fra dette systemet var upålitelige, til tross for flere kalibreringsforsøk gjennom journaler ført av sjåførene. Samsvaret av turinformasjon basert på fraktbrev fra skogdata fungerte heller ikke bra. En årsak til dette var at kjøretøynumrene i Skogdata-systemet var upålitelige, siden det er sjåførnumre og ikke bilnummer som benyttes som identifikator på leveransene. Det var derfor mange registrerte turer fra CAN-bus-filene som ikke lot seg gjenfinne i Skogdata-systemet, og mange lassmålinger som ble assosiert med feil kjøretøy, siden noen av kjøretøyene i prøveordningen har blitt brukt av flere sjåførere. På grunn av den forsinkede starten av datainnsamlingen, sammenfalt datainnsamlingsperioden med en stor systemendring hos Skogdata hvor en del kjøretøynumre ikke ble korrekt migrert. Dette førte også til at en del kjøretøyspesifikke turdata ikke lot seg gjenfinne.

En annen stor utfordring var å konsolidere leveranser til en “full tur” og finne ut når kjøretøyet var fullt lastet, delvis lastet eller ulastet. Misvisende tidsstempler på grunn av mobildekning, pauser og lass med spredte opplastingspunkter gjorde det ofte umulig å flette data fra fraktbrevene med CAN-bus lesningene. Dette fenomenet reduserte også antallet turer hvor datainnsamlingen og datatolkningen kunne betraktes som en pålitelig observasjon for videre analyser.

De overnevnte utfordringene medførte en betydelig reduksjon i antallet tømmertransporter som kunne brukes i analysene. Få gyldige observasjoner og det begrensede antallet kjøretøy og sjåfører gir derfor en risiko for at effekter som tilskrives kjøretøykonfigurasjon i virkeligheten kan skyldes forskjeller i veg-geometri, føreradferd, eller andre tekniske forskjeller mellom mellomvogntogene. Hvis CAN-bus data om vogntogvekt, posisjon, drivstoff-forbruk osv. hadde vært synkrone og pålitelige slik som intensjonen var, ville det vært mulig å lage bedre modeller og gjøre sikrere konklusjoner når det gjelder drivstoff-forbruk, kjørehastighet osv. ved ulike forutsetninger.

Drivstofforbruk

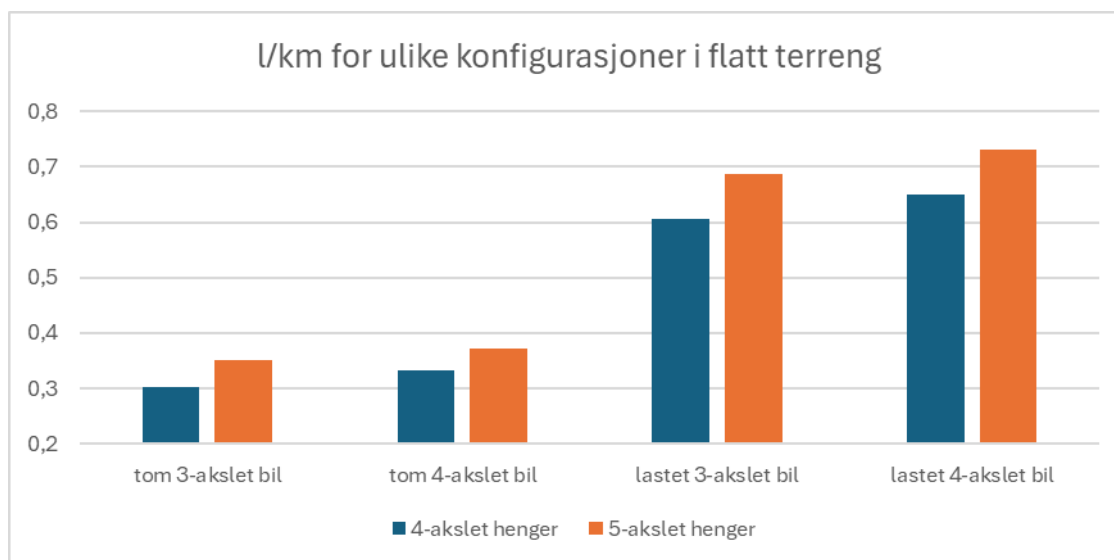
Generelt er det forventet at drivstofforbruket øker med økt totalvekt, men at det likevel blir lavere forbruk per transportert enhet. Imidlertid kan individuelle forhold som sjåførens vaner, ulikhet i kjøreforhold og kjøretøyenes tilstand påvirke resultatene. For eksempel finnes det ikke noen plausibel forklaring på hvorfor 65t vogntogene hadde et høyere registrert drivstofforbruk på flate strekninger enn 68t vogntogene, men det kan som sagt skyldes forhold som ikke ble registrert i datainnsamlingen. Men også under de intensivt gjennomførte svenske studiene ble lignende resultater observert, med forbrukstall som delvis viste høy spredning, og i et individuelt tilfelle skjedde det til og med at et 74t kjøretøy hadde lavere forbruk per 10 km enn et 64t kjøretøy (Noreland 2020).

Gjennomsnittlige drivstoff-forbrukstall for blandet kjøring (lastet og ulastet) med vogntog med lignende konfigurasjon (med kran og tilhenger), men litt forskjellig totalvekt, har blitt undersøkt i Skogforsk sin HCT-undersøkelse (Noreland 2020). I den studien var forbrukstallene 54 L/100 km (totalvekt 64 t), 56 L/100 km (totalvekt 70 t) og 58 L/100 km (totalvekt 74 t). Beregnet drivstofforbruk for en standardisert blandet transport brukt i kostnadsberegningene (**Feil! Fant ikke referanseilden.**), viser lavere forbrukstall for Norge i de tre klassene 65t (47.25 L/100 km), 68t (52.30 L/100 km) og 74t (54.20 L/100 km). Dette kan skyldes at Norge og Sverige skiller seg når det gjelder høydeforskjellen mellom skogressursen og virkesmottakene. Tallene fra Svenson og Fjeld (2017) for en 60t lastebil i Sverige, viser et dieselforbruk på 69.8 L/100 km, noe som er mye høyere enn tallene som kom frem i denne studien og de som ble presentert av Noreland (2020) for de tynge lastebilene i Sverige. Interessant er også Svenson og Fjelds (2016) tall med svært høyt forbruk på 90.80 L/100 km når man kjører lastet, sammenlignet med mer moderate tall på 48.80 L/100 km når man kjører uten last. Faktisk er tallene for kjøring uten last for 60t fra Sverige, nesten i samme område som for blandet (lastet og uladet) transport av en 76t lastebil (49.41 L/100 km) presentert av Venäläinen & Poikela (2024) under finske forhold.

De varierende drivstofforbrukstallene fra denne studien og tidligere forskning i våre naboland, viser vanskeligheten med å sammenligne slike forbrukstall direkte. Effekten av terreng, føre, og individuelle kjørevaner til sjåførene kan være stor. Men også den tekniske tilstanden til kjøretøyet, motorens og drivlinjens effektivitet, samt tilleggsegenskaper knyttet til for eksempel aerodynamikk, kan ha ytterligere effekt spesielt hvis lengre strekninger kjøres på motorveger. Samlet viser dette at det trolig er nødvendig å teste ulike vogntogkombinasjoner under helt like

kjøreforhold og på de samme strekningene for å få forbrukstall som med sikkerhet kan sammenlignes direkte.

Drivstofforbruket for kjøring på test-strekningene ser videre ut til å være noe høyere for vogntogkombinasjoner med 5-akslede tilhengere enn for kombinasjoner med 4-akslede tilhengere (Figur 15). Det kan skyldes at 5-akslet tilhenger har en stiv trippelboggi bak, og at den derfor er tyngre å dra med seg gjennom svinger. Den ekstra akselen på en 4-akslet bil svinger med under kjøring, og påvirker derfor ikke drivstofforbruk i samme grad. En av transportørene opererte både 4- og 5-akslet tilhenger i pilotordningen, og hadde gjort seg samme erfaring. Det er mulig å utstyre trippelboggier med en selvstyrende aksel som den siste akselen på tilhengeren. Et slikt system er selvfølgelig mer komplekst og øker innkjøpsprisen, men kan dempe de negative effektene av den femte akselen og har vist drivstoffbesparelser på opptil 4 % i blandet trafikk (BPW, 2020).



Figur 15: Dieselforbrukstall visualisert fra flate strekningsobservasjoner, tom og lasskjøring (Feil! Fant ikke referanseilden., Feil! Fant ikke referanseilden.) relatert til akselkonfigurasjonen

Nyttelastutnyttelse

En detaljert analyse av faktisk lastet vekt og volum lot seg ikke gjøre, da CAN-buss avlesningene for kjøretøyvektene ikke var pålitelige nok, til tross for kalibreringsforsøk gjennom målinger ved veiestasjoner. Likevel bekrefter de observerte lastvolumene og de betydelige forskjellene mellom sommer- og vinterdrift i 68 t- og 74 t vogntogene den generelle antakelse om sesongmessige forskjeller i lastevikt og lastevolum som skyldes forskjeller i trevirkets egenvekt i ulike sesonger. Det indikerer at større volum kunne lastes i de tyngste vogntogene når virke var lettere, noe som kan gi en økonomisk fordel i sommermånedene.

Økonomisk evaluering av 8- og 9-akslede tømmervogntog

En økonomisk evaluering av de alternative vogntogkombinasjonene ble gjort med utgangspunkt i generelle metoder for maskinkostnadsberegning, som ble satt i nært samarbeid med transportører og andre med erfaring eller kompetanse på det feltet. Resultatene av beregningene er avhengige av mange valg, f.eks. rentesats, restverdi og avskrivninger.

Verdiene ble valgt i samarbeid med transportørene for å få et så realistisk bilde av hver vogntogkombinasjon som mulig.

De faste kostnadene, som hovedsakelig kommer fra kapitalkostnadene for bil, tilhenger og kran, utgjør omtrent 65 % av de totale kostnadene, mens variable kostnader utgjør en tredjedel av kostnadene. Det er verdt å merke seg at prisforskjellen mellom den dyreste og billigste vogntogkonfigurasjon (bil, tilhenger og kran) var mindre enn 5 % i denne studien. Selv om det 9-akslede vogntoget hadde de høyeste totale kostnadene, ble dette den mest kostnadseffektive løsningen per transportert enhet virke, med en kostnadsreduksjon på 17 % sammenlignet med 7-akslede 60-tonns vogntog. Disse kostnadsforskjellene er på samme nivå som den finske studien Venäläinen & Poikela (2022), selv om de gjennomsnittlige transportavstandene i den studien var lengre, terrenget generelt flatere og vogntogene var større (76-104 tonn).

Vi gjennomførte en sensitivitetsanalyse for å undersøke effekten av prisene på lastebil, kran og tilhenger på de totale kostnadene. En prisøkning på 10 % resulterte i en økning på 3.6 % i de totale kostnadene per tonn i alle vektclasser. Tilsvarende økning på 10 % i restverdien for lastebilen, tilhengeren og kranen påvirket de totale kostnadene med omtrent 0.8 % i alle klasser. Dekk-kostnader ble også analysert ved å øke dem med 10 %, noe som gav en gjennomsnittlig økning på 0.3 % på de totale kostnadene. En økning på 10 % i reparasjonskostnadene førte til en økning på 0.7 % i de totale kostnadene i alle vektclasser. Disse analysene viser at transportkostnadene er mer følsomme for endringer i anskaffelseskostnadene enn for endringer i restverdi, dekk og reparasjonskostnader.

Fremkommelighet

Det ble ikke gjennomført noen forsøk for å undersøke fremkommeligheten til de ulike vogntogkombinasjonene i dette prosjektet. De sammenhenger som bestemmer vogntogenes evne til å kjøre i stigninger er nokså godt kjent i litteraturen. Noen betraktninger kan derfor gjøres selv om det ikke foreligger empiriske data fra dette prosjektet. De ulike vogntogkombinasjonene er beskrevet innledningsvis i kapittel Materialer og Metoder. Generelt bestemmes vogntogenes evne til å kjøre i stigninger av friksjonen mellom drivhjul og vegbane, samt andelen av vogntogenes totalvekt som ligger på drivhjulene (Hjort 2012). Et tømmervogntog med tvillinghjul på drivakslene i boggikonfigurasjon kan ha inntil 19 tonn på drivakslene (Samferdselsdep 1990 §5-4), dvs 32% av vogntogvekten av et 60-tonns tømmervogntog. Med større totalvekt og samme drivhjulskonfigurasjon vil maksimal kjørbar stigning dermed gå ned. De 4-akslede bilene vil ha en trippel-boggi bak, og kan ifølge forskriften laste inntil 24 tonn på denne trippel-boggien. Friksjonen er lavest og fremkommeligheten derfor dårligst på vinterføre med snø og is i vegbanen (Statens vegvesen 2005; Hjort 2012). På dette føret vil vegene vanligvis være frosne, slik at de tåler svært store aksel-laster (Berntsen 2022). I nødsituasjoner vinterstid kan derfor hele vekten fra trippel-boggien overføres til drivhjulene. Med denne metoden vil et vogntog på 74 tonn fortsatt ha over 32% av totalvekten på drivhjulene. Ved å benytte systemer for dekktrykkregulering kan også friksjonen mellom drivhjul og vegbane forbedres (Belbo 2023).

Bruer med totalvektbegrensning vil være et hinder for å utnytte større totalvekt. I prøveområdet var det 15 broer på Bk10-vegnettet som ikke tåler 74 tonn totalvekt. Dette var bruer med byggeår tidligere enn 1970. For Norge sett under ett er 3 % av broene for svake for 74 tonns vogntog, mens ytterligere 14 % må styrkeberegnes for å avgjøre hvilken totalvekt de tåler (Grefstad 2020-02-22, pers medd). Siden det i mange tilfeller vil være flere alternative bruer

mellom skogressursen og virkesmottaket, er det vanskelig å tallfeste hvor mye denne utfordringen vil påvirke nytteverdien av 9-akslede vogntog med inntil 74 tonn totalvekt.

Konklusjoner

Den presenterte studien har en del begrensninger knyttet til innsamlede data og analyse, samt forskjeller i kjøreforhold mellom de deltakende vogntogene og loggførte turene. Dette gir noe usikkerhet i hva som kan konkluderes når det gjelder forventet hastighet og dieselforbruk for de ulike vogntogkombinasjoner under ulike kjøreforhold. Erfaringene fra prosjektet og tallene i datamaterialet gir likevel grunnlag for noen konklusjoner:

- Vogntogkombinasjonene har stort sett kunnet utnytte den ekstra nyttelast-kapasiteten de får ved økt tillatt totalvekt. Gjennomsnittslasten var 42.8 m³ for 60 t vogntogene, 45.7 m³ for 65 t, 48.2 m³ for 68 t, og 55.1 m³ for 74 t vogntogene når de kjørte i forsøksområdet (figur 13). Dette representerer en økning i nyttiggjort nyttelast på 6 %, 13 % og 29 % for den respektive vogntogklassen.
- Dieselforbruket øker med økt vekt på bil og last, men synker likevel per transportert enhet ved økende nyttelast. Tallene fra denne studien indikerer en reduksjon i dieselforbruk per transportert volum på hhv 15 %, 12 % og 18 % for 65t, 68t og 74t vogntog. Forskjeller i geografien som er brukt av det enkelte vogntog, samt andre forskjeller i kjøreforhold, kan ha påvirket disse resultatene.
- Fra teststrekningene var det en tendens til at hastigheten økte med økende antall aksler og totalvekt ved kjøring på flate strekninger. Ved kjøring i stigninger var det derimot en tendens til at 60 t vogntogene hadde høyere hastighet enn de øvrige. Disse sammenhengene var likevel ikke helt entydige, og andre faktorer enn antall akslinger og totalvekt kan ha påvirket resultatene.
- For å sammenligne transportkostnadene for de ulike vogntogkombinasjonene, ble transportkostnadene beregnet i et scenario med 75 km transportavstand, og en antagelse om at de vil kjøre med samme hastighet under samme driftsforhold. Kalkylene indikerer at de tyngre vogntogkombinasjonene vil gi en besparelse i transportkostnader per m³ virke på hhv 7 %, 11 % og 17 %. Forskjellen vil øke med økende transportavstander, og krympe ved kortere transportavstander, siden transportavstand påvirker andelen av tiden som er terminaltid og «transport-tid». Jo større andel tid til transport, jo større blir forskjellen. De tilfeldighetene som kan ha påvirket dieselforbruket til den enkelte vogntogkombinasjon, har også påvirket resultatene i denne sammenligningen. For å få sikrere tall på effekten av økt totalvekt, bør det kjøres forsøk hvor vogntogene testes under identiske forhold.
- Pilotforsøket er gjennomført i Innlandet fylke. Andre deler av landet har mer krevende kjøreforhold, med større andel veger som har brattere stigninger eller krav om kortere biler. Dette kan påvirke muligheten for å utnytte vogntogenes lastekapasitet, særlig på tilhengeren. Om forskriftsendringen som gir mulighet for å klassifisere vegstrekninger til BkT8/60 materialiserer seg i veglistene, vil nytten av 8- og 9-akslede kombinasjoner øke.
- Fireakslede tømmerbiler gir økt fleksibilitet for ulike situasjoner. De kan gi redusert svingradius og bedre sporing, kan som nødløsning flytte større last til drivhjul når det

blir for lite friksjon, og de kan bytte mellom ulike hengere ut fra hva som er maksimal total vogntogvekt og vogntoglengde på det lokale vegnettet.

- Mye av tømmertransporten i Norge er slik at vogntoget i hovedsak kjøres tomt oppover og lastet nedover. Gevinsten i drivstoff-forbruk med større vogntog er størst ved kjøring nedover. Slik sett ligger forholdene derfor godt til rette for å utnytte vogntog med 8 og 9 aksler for å redusere klimagassutslipp fra og kostnader til tømmertransport.

Litteraturhenvisninger

Anttila P, Nummelin T, Väätäinen K, Laitila J, Ala-Illomäki J, Kilpeläinen A. 2022. Effect of vehicle properties and driving environment on fuel consumption and CO2 emissions of timber trucking based on data from fleet management system. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 15:100671. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>

Asmoarp et al. 2018. Effektivare transporter på väg – slutrapport från ETT 2014-2016. Skogforsk Arbetsrapport 962- 2018.

Belbo H. 2023. Variabelt dekktrykk for tømmerbiler - Effekt på fremkommelighet, vegslitasje og økonomi. NIBIO Rapport 9/150. <https://hdl.handle.net/11250/3107575>.

Bergqvist, M 2018. Ongoing work with HCT and public road deformation in Sweden – 74 tonne trucks and their impact on infrastructure. Cost modeling approaches and latest news from the front. Nordic-Baltic transport workshop in Oslo 11-12 Sept 2018.

Berntsen G. 2022. Belastningsforsøk - sammenligning av vegslitasje. Statens vegvesen Statens vegvesens rapporter nr. 804. <https://hdl.handle.net/11250/2982155>.

BPW, 2020: Benefits of a self-steer axle. Technical Bulletin TB36-0220: <https://www.bpw.co.za/downloads/bulletins/2020/benefits-of-a-self-steer-axle-1.pdf> Granlund J, Land, J 2016. Förkortad väglivslängd – orsaker och kostnader. Utredning för Volvolastvagnar, Mercedes Benz Sverige samt Sveriges Åkeriföretag. WSP Sluttrapport 2016-05-23

Fjeld D, Dahlin B. 2020. Nordic logistics handbook - Forest operations in wood supply. (V 17-11-20). Sveriges Lantbruksuniversitet, Helsinki University.

Hjort M. 2012. Vinterdäck på drivaxel till tunga fordon: en väggreppsstudie. Statens väg- och transportforskningsinstitut. VTI notat 23 2012. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-587>.

Hofsten von, H 2018. Vägning av hela fordonsklass – möjligheter och felkällor. Skogforsk Arbetsrapport 974-2018.

Kärhä K, Seuri M, Mac Donagh PM, Bradley A, Röser D, Pinto C, Dian W, Pandur Z, Dvořák J, Torbjørn Jørgensen M, et al. 2024. Overview of Global Long-Distance Road Transportation of Industrial Roundwood. *Croat j for eng* (Online). 45(1):217–236. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2286>

Larsson, A 2016. Påverkas geometriska krav på skogsbilvägar om ST-fordon införs. Examensarbete Linnéuniversitet, Institutionen för Skogs- och Träteknik. 2016-06-06.

Lindström, J 2014. Analys av potentiell kostnadsbesparing vid införandet av ST-kran. Arbetsrapport 16 2015. Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, SLU.

Löf, M 2017. En systemanalys av tyngre lastbilars påverkan på tågtransporter. Examensarbeten Nr 161. Institutionen för skogens produkter, SLU.

Noreland D 2020. HCT-fordon för rundvirkesvirkestransporter - ÄR DET EN LÖNSAM INVESTERING? (*HCT vehicles for roundwood transports – a profitable investment?*). Skogforsk Arbetsrapport 1065-2020. På svensk. 27 s https://www.skogforsk.se/cd_20210107141246/contentassets/3e3ac1ac1a4d449b8a9ff59ee75698d1/arbetsrapport-1065-2020.pdf

Noreland D. 2024. Semi-empirical model for timber truck speed profile and fuel consumption. *International Journal of Forest Engineering*. 35(3):470–481. <https://doi.org/10.1080/14942119.2024.2346881>

Palander, T, Kärha, K 2017. Potential traffic levels after increasing the maximum vehicle weight in environmentally efficient transportation system: The case of Finland. *Journal of sustainable development of energy, water and environment systems* 2017 Vol 5 Issue 3 417-429.

Samferdselsdep. 1990. Forskrift om bruk av kjøretøy. <https://lovdata.no/forskrift/1990-01-25-92>.

Skjølaas D. 2020. En sammenligning av vegslitasje fra 7-, 8- og 9-akslede tømmervogntog gjennom modellberegninger. <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/fokusomrader/forskning-innovasjon-og-utvikling/proveordninger/vegslitasje-fra-tommervogntog.pdf?v=49e299>

Statens vegvesen 2020. <https://www.vegvesen.no/om-oss/presse/aktuelt/nasjonalt/tester-tommervogntog-pa-74-tonn/>

Statens vegvesen. 2005. Friksjonsmåling på veger - Statusrapport. Trondheim: Statens vegvesen, Vegdirektoratet Intern rapport Nr: 2376

Strandström, M 2018. Ongoing work with road bearing capacity and new planning tools in Finland. Cost modeling approaches and latest news from the front. Nordic-Baltic transport workshop in Oslo 11-12 Sept 2018

Svenson G, Fjeld D. 2017. The impact of road geometry, surface roughness and truck weight on operating speed of logging trucks. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 32(6):515–527. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1259426>

Väätäinen, K, Laitila, J, Anttila, P 2018. The effect of truck size and transport distance on timber trucking performance – case study in central Finland. Cost modeling approaches and latest news from the front. Nordic-Baltic transport workshop in Oslo 11-12 Sept 2018.

Väätäinen K, Laitila J, Anttila P, Kilpeläinen A, Asikainen A. 2020. The influence of gross vehicle weight (GVW) and transport distance on timber trucking performance indicators – Discrete event simulation case study in Central Finland. *International Journal of Forest Engineering*. 31(2):156–170. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14942119.2020.1757324>

Venäläinen P, Poikela, A. 2022. Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset – aiheen 3. väliraportti. (*Effects of Increasing the Masses of Timber and Chip Vehicles - Interim Report on Topic 3. / Effekter av å øke massene til tømmer- og flisbiler - Mellomrapport om emne 3*). Metsätehon raportti 265. In Finnish/På finsk. 90 s.

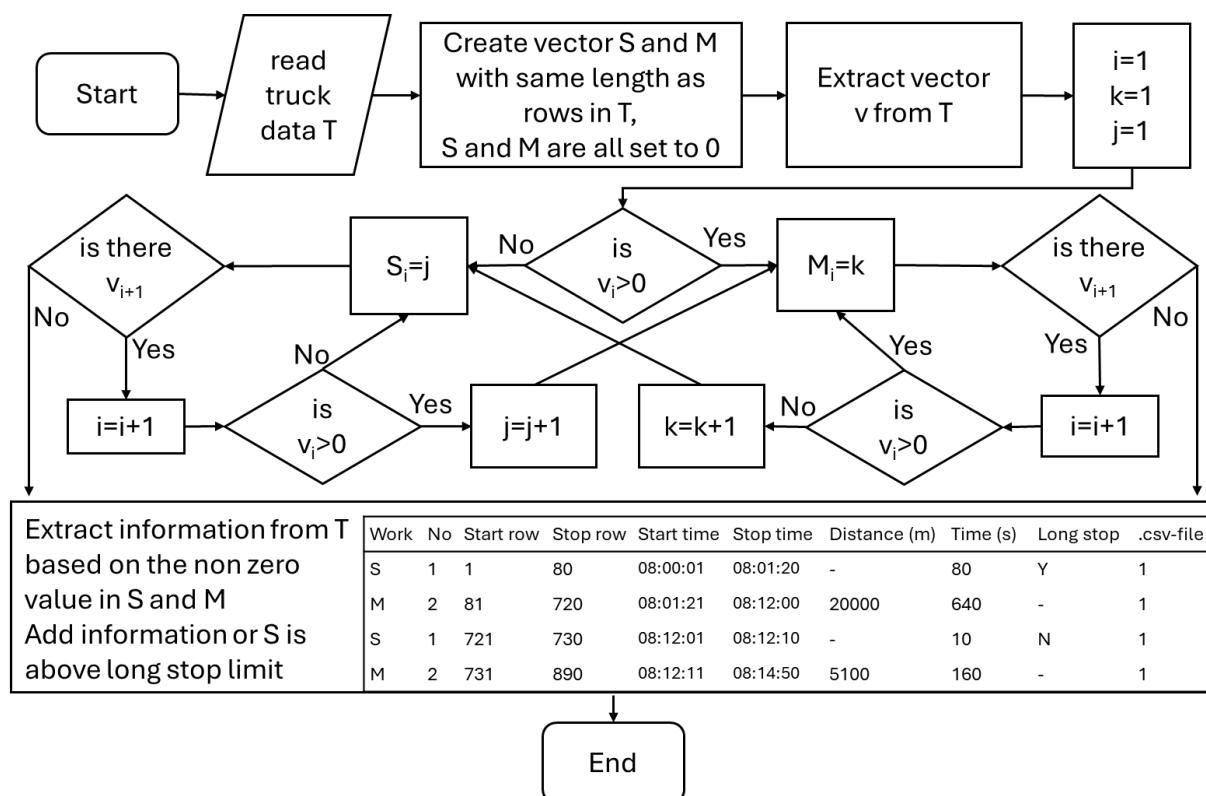
Venäläinen P, Poikela, A. 2024. Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset (Effects of lifting the masses of timber and wood chip vehicles) Metsätehon raportti 270 (aiheen 4. väliraportti)

Widinghoff, J 2014. Kontinuerlig uppföljning av drivmedelsförbrukning och lastfyllnadsgrad för ETT- och ST-fordon. Skogforsk Arbetsrapport 831-2014.

Vedlegg

Detaljer om aggregering av arbeidssegmenter og klassifisering av arbeidselementer

Dataene fra lastebilene ble etter de foregående trinnene lagret i .csv-filer, med en oppløsning på 1 sekund. Hver lastebil produserte mange .csv-filer av forskjellige lengder. Tidsrommet mellom forskjellige .csv-filer varierte fra noen få sekunder, mest sannsynlig på grunn av en opptaksfeil, opptil flere dager, som over en helg. Alle .csv-filene fra en lastebil ble kombinert til en enkelt fil for analyse slik at korte pauser kunne vurderes. Hver fil fikk et annet nummer for fremtidig analyse. Avstanden mellom hver observasjon ble også beregnet og lagt til i dataene.

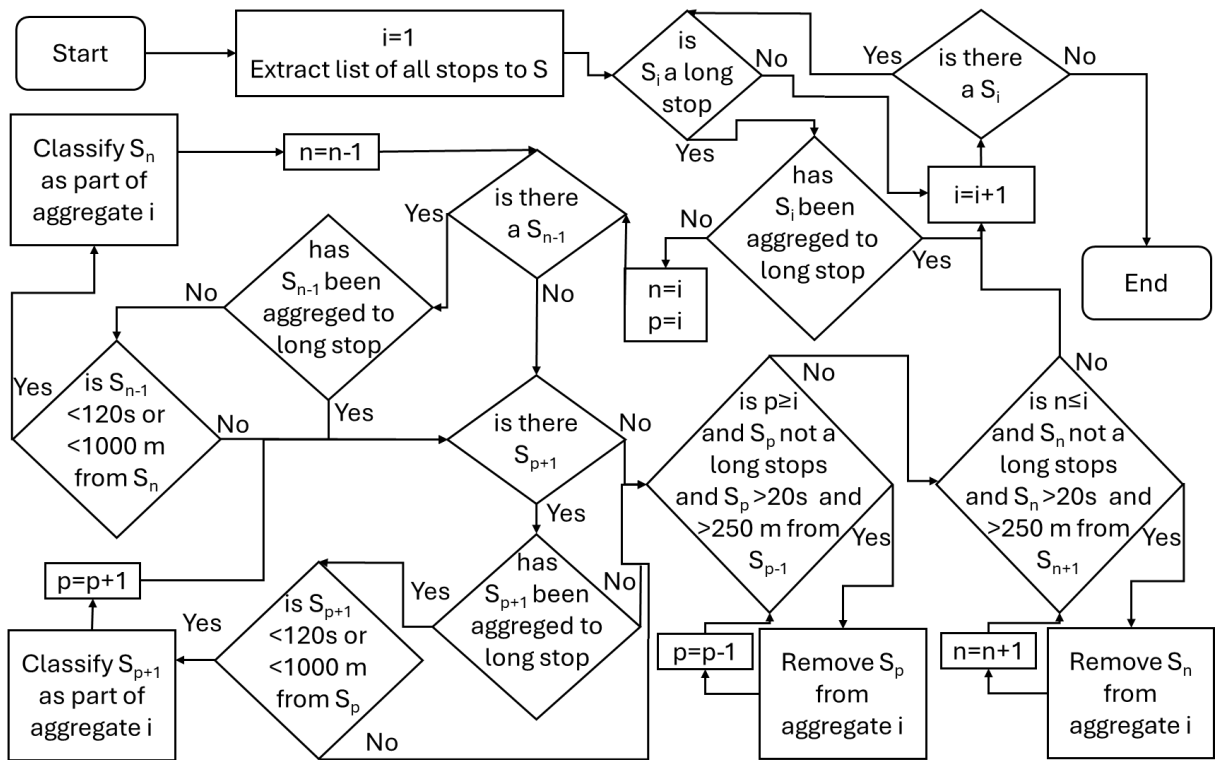


Figur 16: Klassifisering av innledende data i kjøring og stopp. S-vektor for stoppklassifisering, M-vektor for bevegelsesklassifisering, i-teller for plassering i vektor S, M, og v, j-teller for kontinuerlig stopp, k-fuger for kontinuerlig kjøring. Grensen for lange stopp var 30 sekunder.

Dataene ble klassifisert i arbeidssegmenter der det er mulig å anta at kontinuerlig arbeid kunne ha forekommet. Det ble antatt at hvis pausen uten dataregistrering var over 50 minutter, startet et nytt arbeidssegment etter pausen. Grensen var basert på reglene for hvile og søvn for lastebilsjåførere med noe ekstra tid. Senere analyser ble bare gjort i dataene inne i et arbeidssegment.

Stopp aggregering

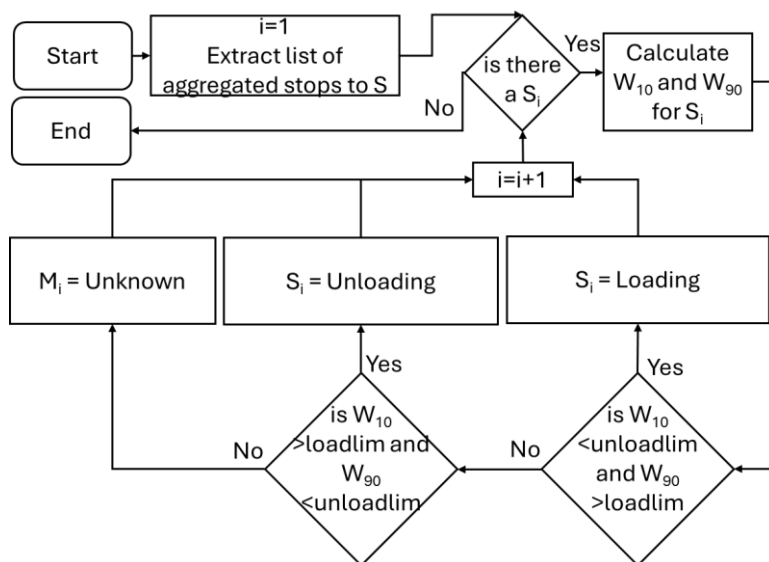
Stopp i et arbeidssegment som var nær hverandre ble deretter aggregert for å få aggregerte stopp (Figur 17). Etter at et stopp var aggregert, ble slutten beskåret om nødvendig. Alle observasjoner inne i et aggregert stopp ble ansett som en del av et stopp og alle observasjoner mellom aggregerte stopp ble betraktet som kjøring.



Figur 17: Aggregering av stopp og beskjæring av aggregerte stopp. S -liste over stopp, i -teller for posisjon på S , n og p -teller for aggregering og beskjæring av stopp til klynge i . Langt stopp = 30 sekunder.

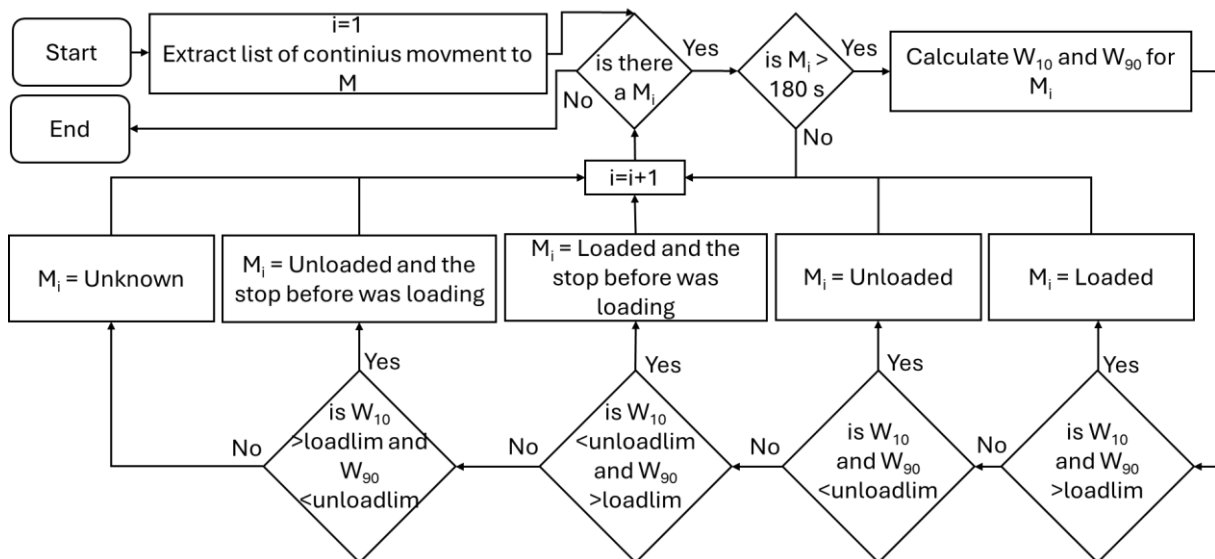
Stopp- og kjøreklassifisering

Når stoppene hadde blitt klassifisert, ble det først klassifisert om det ikke var forskjellige arbeidselementer gjort (Figur 18). Klassifiseringen ble gjort basert på endringer i den registrerte vekten fra lastebilene. Grensene som ble brukt var 30,000 kg for lossing og 50,000 kg for lasting. Den store marginen ble satt fordi de registrerte vektene er relativt usikre.



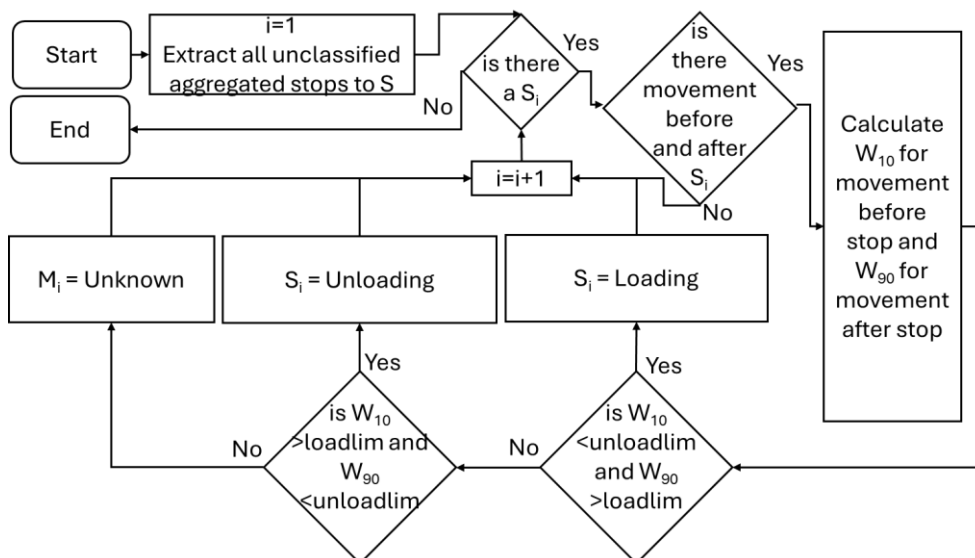
Figur 18: Første klassifisering for aggregerte stopp. S er en tabell for alle stopp, i er en teller, $unloadlim$ er 30,000 kg, $loadlim$ er 50,000 kg, W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under et aggregert stopp, og W_{10} er gjennomsnittsvekten i løpet av de første 10 % av tiden under et aggregert stopp.

Etter det ble en første klassifisering av den antatte kontinuerlige bevegelsen mellom stoppene gjort (Figur 19). Videre ble ikke kjøring segmenter kortere enn 180 s klassifisert i dette trinnet. De kan imidlertid klassifiseres senere.



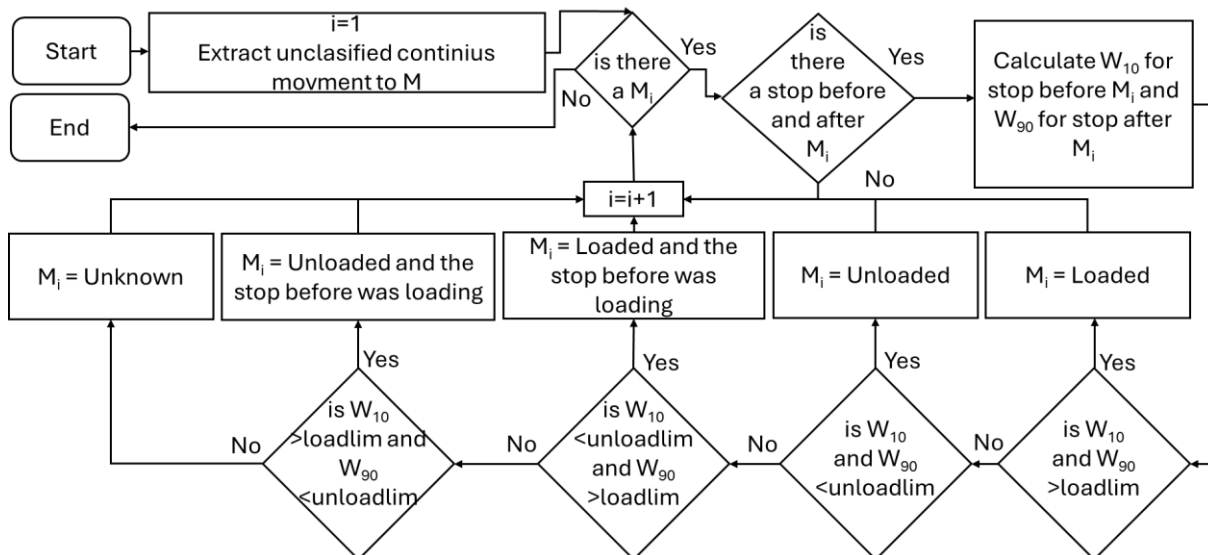
Figur 19: Første klassifisering av kontinuerlig bevegelse, og klassifisering av aggregerte stopp som har hatt ukjent klassifisering. M er en tabell for all bevegelse, i er en teller, $unloadlim$ er 30,000 kg, $loadlim$ er 50,000 kg, W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under bevegelse, og W_{10} er gjennomsnittsvekten i løpet av de første 10 % av tiden under bevegelse.

Stopp som ikke kunne klassifiseres på denne måten ble ytterligere undersøkt ved også å inkludere bevegelsen før og etter stoppet i analysene (Figur 20).



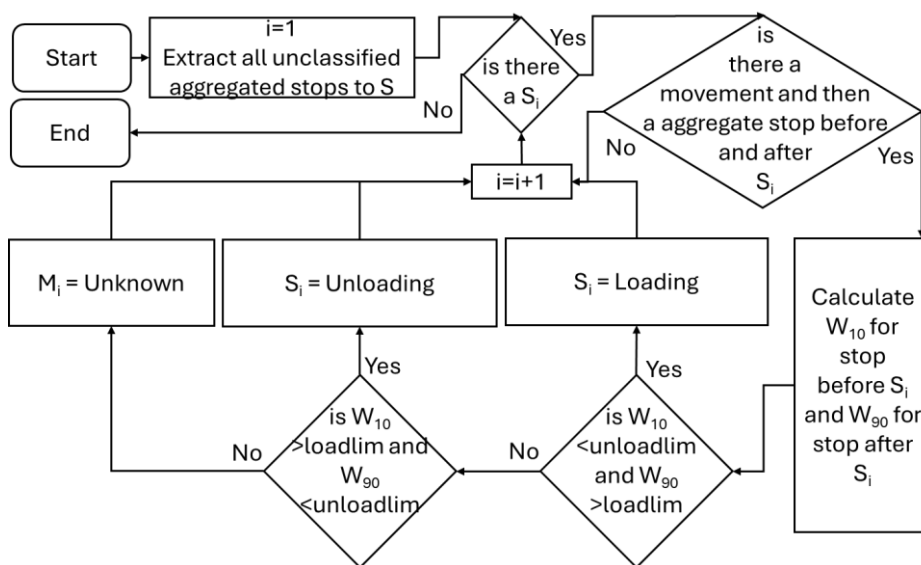
Figur 20: Andre klassifisering av stopp basert på vekt under bevegelse før og etter stopp. S er en tabell for alle stopp, i er en teller, $unloadlim$ er 30,000 kg, $loadlim$ er 50,000 kg, W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under bevegelse, og W_{10} er gjennomsnittsvekten i løpet av de første 10 % av tiden under bevegelse.

Deretter ble sammenhengende bevegelse som ikke hadde blitt klassifisert undersøkt (Figur 21). I denne analysen ble også stoppene før og etter inkludert.



Figur 21: Andre klassifisering av bevegelse. M er en tabell for bevegelse, i er en teller, $unloadlim$ er 30,000 kg, $loadlim$ er 50,000 kg, W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under et aggregert stopp, og W_{10} er gjennomsnittsvekten i løpet av de første 10 % av tiden under et aggregert stopp.

Deretter ble de gjenværende uklassifiserte stoppene undersøkt en tredje gang (Figur 22). Dette ble gjort ved å inkludere både bevegelsen og stoppet før og etter stoppet. Velger den første bevegelsen før og etter stoppet og klassifiserer basert på de første 10 % før og de siste 10 % etter. Samme logikk som før.



Figur 22: Tredje klassifisering av stopp basert på bevegelse og stopp før og etter stoppet. S er en tabell over alle stopp, i er en teller, $unloadlim$ er 30,000 kg, $loadlim$ er 50,000 kg, W_{90} er gjennomsnittsvekten i løpet av de siste 10 % av tiden under et aggregert stopp, og W_{10} er gjennomsnittsvekten i løpet av de første 10 % av tiden under et aggregert stopp.