

Minimering af jordpakning

Størrelse og fordeling af stress i trædefladen mellem hjul og jord

Reduction of soil compaction

Magnitude and distribution of stress in the contact area between wheel and soil

Per Schjønning, Mathieu Lamandé,
Frede A. Tøgersen, Jørgen Pedersen og Poul Otto Møller Hansen



Minimering af jordpakning

Størrelse og fordeling af stress i trædefladen mellem hjul og jord

Reduction of soil compaction

Magnitude and distribution of stress in the contact area between wheel and soil

Per Schjønning¹, Mathieu Lamandé¹,
Frede A. Tøgersen², Jørgen Pedersen³ og Poul Otto Møller Hansen⁴

¹ Afdeling for Jordbrugsproduktion og Miljø, Danmarks JordbrugsForskning

² Afdeling for Genetik og Bioteknologi, Danmarks JordbrugsForskning

³ Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret

⁴ Nordisk Dæk Import A-S

DJF rapporter indeholder hovedsagelig forskningsresultater og forsøgsopgørelser rettet mod danske forhold. Endvidere kan rapporterne beskrive større samlede forskningsprojekter eller fungere som bilag til temamøder. DJF rapporter udkommer i serierne: Markbrug, Husdyrbrug og Havebrug.

Abonnenter opnår 25% rabat, og abonnement kan tegnes ved henvendelse til:
Danmarks JordbrugsForskning
Postboks 50, 8830 Tjele
Tlf. 8999 1028

Alle DJF's publikationer kan bestilles på nettet:
www.agrsci.dk

Tryk: www.digisource.dk
ISBN 87-91949-08-4
ISSN 1397-9884

"Subsoil compaction by vehicles with high axle loads seems to pose the most severe long-term threat to soil productivity"

"Pakning af underjorden forårsaget af trafik med høje akselbelastninger forekommer at være den mest alvorlige trussel mod jordens produktivitet på langt sigt"

Inge Håkansson, 1994

"I often say that when you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind"

"Jeg siger ofte, at når man kan måle, hvad man taler om og udtrykke det i tal, da ved man noget om det; men hvis man ikke kan måle det, hvis man ikke kan udtrykke det i tal, da er ens viden svag og utilfredsstillende"

Lord Kelvin, 1883

Forord

Jordbrugets anvendelse af pesticider er i dag reguleret. Producenten af et nyt pesticid skal dokumentere, at det nye stof overholder visse kriterier. Derimod er der ingen regulering af trafik på landbrugsjord. Det er på trods af, at der er påvist blivende pakningsskader ved færdsel med tungt maskinel. Pakningsskader bør vurderes ud fra, om de er blivende. De er kun sekundært interessante, fordi de et enkelt år medfører nogle få procents nedgang i afgrødeudbyttet. De er primært interessante, fordi deformation af jorden i dybder, hvor skaden er blivende, over indflydelse på en lang række økologiske funktioner (herunder den fortsatte produktivitet). Jord er det mest komplicerede biomateriale på kloden, og det er uklogt at tro, at vi i dag er bevidst om alle jordens funktioner. En jordbrugspraksis er ikke bæredygtig, hvis den forringer ressourcegrundlaget.

Det er på ovenanførte grundlag, at Danmarks JordbrugsForskning i disse år har iværksat et forskningsarbejde omkring jordpakning. Mekaniseringen i landbruget har medført mekaniske belastninger af jorden i et omfang, der ville være helt utænkelig for bare få år siden. Der er et udtalt behov for øget viden om effekten af den i dag gældende praksis. Vi har vurderet, at et første skridt er en kvantificering af de kræfter, der virker i kontaktarealet mellem hjul og jord.

Denne rapport beskriver resultatet af et forskningsprojekt, der blev iværksat med støtte fra Fødevarerministeriets såkaldte Innovationspulje. Arbejdet er udført i et samarbejde mellem Danmarks JordbrugsForskning, Dansk Landbrugsrådgivning (Landscentret) og Nordisk Dæk Import A-S. Alle parter har selv bidraget med væsentlige midler til arbejdets gennemførelse.

Rapporten beskriver projektets resultater i detaljer og tjener dermed flere formål. Et af disse er en vejledning af landmænd og konsulenter samt fabrikanter og forhandlere af dæk. Rapporten indeholder imidlertid også syntese af viden, der kan interessere forskere på området. Da der således er tale om en sammensat målgruppe, er vi ikke helt konsekvente med brug af enheder og termer. F.eks. opgives hjullast både i tons og i kN (1 ton ~10 kN) og dæktryk angives dels i bar og dels i kPa (1 bar = 100 kPa). Når vi omtaler kræfter, der virker på jorden, er der hele vejen igennem tale om den vertikale (lodrette) kraftkomponent. Vi bruger termen 'stress' som betegnelse for denne specifikke kraft men af og til også 'tryk'. Vi har forsøgt at hjælpe den travle læser ved brug af farvede tekstbokse, der samler vigtige essenser af teksten.

Det er håbet, at rapporten sammen med det udarbejdede online beslutningsstøttværktøj (JORDVÆRN online) vil bidrage til større viden om, hvorledes man begrænser jordpakning i landbruget.

Per Schjønning, Forskningscenter Foulum, december 2006

Indholdsfortegnelse

Sammendrag.....	8
Summary	10
Symbolliste.....	12
Indledning.....	13
Materialer og metoder	15
Dæk og testareal	15
Målesystem	17
Gennemførsel af test.....	18
Beregninger og statistik	21
Resultater og diskussion.....	22
Jordens vandindhold og volumenvægt	22
Korrektion af stress-data til korrekt hjullast	22
Effekt af dæktryk på kontaktareal og stressfordeling	23
Kontaktareal	23
Stressfordeling - generelle aspekter	24
Stressfordeling i kørselsretningen - formparameter α	28
Stressfordeling på tværs af dækket - formparameter β	30
Dæktryk - opsummering	31
Effekt af hjullast på kontaktareal og stressfordeling	32
Kontaktareal	32
Stressfordeling.....	34
Effekt af dæktryk og hjullast på stress i jordprofilen	36
Sammenligning af 5 vogndæk	40
Kontaktareal	40
Stressfordeling.....	42
Sammenligning af 2 traktordæk.....	44
Kontaktareal	45
Stressfordeling.....	46
Sammenligning mellem traktor- og vogndæk.....	46
Stress i trædefladen i relation til dæktryk	46
Perspektivering af resultater.....	50
Stress i trædefladen og transmission i jordprofilen	50
Bedste bud på stress i forskellige dybder	50
Hvilke stressniveauer er kritiske?	52
Hvor dybt går 50 kPa isobaren?	55
Holder 8-8 regelen?.....	58

Trædefladedimensioner og stressfordeling	59
Prediktion af trædefladedimensioner og stressfordeling ud fra dækdimensioner	61
Trædefladearealet	63
Stressfordeling	65
JORDVÆRN online	67
Validering af prediktionsligninger	67
Opbygning af beslutningsstøttesystemet	68
Brug af JORDVÆRN online	71
Andre effekter og fremtidige tiltag	72
Konklusioner og anbefalinger	73
Erkendtlighed	74
Litteratur	75
Beskrivelse af Appendiks	81
Appendiks A: Specifikke hjullaster	83
Appendiks B: Model for areal og stressfordeling i kontaktfladen mellem hjul og jord	85
Appendiks C: Målte og superellipse-estimerede konturer af trædeflader i alle test	87
Appendiks D: Målte og model-fittede stressfordelinger i trædeflader for alle test	91
Appendiks E: Söhne-beregnet stress i jordprofilen under 5 dæk ved 30 og 60 kN hjullast... ..	101

Sammendrag

Mekaniseringen i jordbruget har medført trafik i marken med meget store og dermed tunge maskiner. Adskillige undersøgelser har vist, at det kan give skadelig pakning af jorden. Pakningsskader under ca. 50 cm dybde har vist sig stort set permanente, hvilket mindsker både afgrødeudbytte og dyrkningssikkerhed samt påvirker andre vigtige jordfunktioner. Der er et stort behov for en forøget viden om de kræfter, jorden udsættes for. De i dag anvendte dæk er langt bedre end tidligere og det er en almindelig antagelse, at dette løser pakningsproblemet. Der er dog stort set ikke foretaget målinger af stress (tryk) i kontaktfladen mellem hjul og jord.

Vi udvalgte 7 dæk til undersøgelse af stress i trædefladen. Fem vogndæk og to traktordæk blev belastet med dels ca. 3 og dels ca. 6 tons. Dæktrykket blev afpasset til det anbefalede for kørsel i marken. Desuden blev to af vogndækkene testet ved 6 tons hjullast med et dæktryk under og et over det anbefalede. Endelig blev disse to dæk også testet ved ca. 8.5 tons hjullast. Undersøgelserne foregik på en stubmark ved Forskningscenter Foulum (fin lerblandet sandjord) ved et vandindhold lidt mindre end markkapacitet (forårets vandindhold). Marken blev inddelt i 60 parceller således, at hver af 20 kombinationer af dæktype, hjullast og dæktryk kunne undersøges med 3 målegentagelser. Forud for en stress-måling blev de øverste 10 cm jord fræset, et 'batteri' af 17 trykmålere pålimet en gummidug blev lagt ned på ubearbejdet jord, og 10 cm løs jord blev lagt tilbage. Dernæst blev testhjulet sat på en specialfremstillet vogn, belastet til ønsket hjullast, og kørt frem over trykmålerne. Både vogndæk og traktordæk blev monteret på testvognen, der kunne sideforskyde testhjulet i forhold til traktoren. En lasermåler sikrede, at trykmålingerne kunne relateres til en bestemt position af dækket.

Resultaterne viste, at dæktrykket har meget stor indflydelse på både trædefladearealet og stress i trædefladen. Trædefladearealet for to store vogndæk belastet med 6 tons var eksempelvis ved 240 kPa (≈ 2.4 bar) kun ca. to tredjedele af arealet ved det anbefalede dæktryk på 100 kPa. Stress i trædefladen var ujævnt fordelt. Det betød bl.a., at der blev målt spidsbelastninger gennemsnitligt ca. 100 kPa højere end dæktrykket. Det generelle stress-niveau havde et maksimum, der for alle dæk var ca. 50 kPa over dæktrykket. Det teoretiske gennemsnitlige stress, beregnet som hjullast divideret med trædefladearealet, var ved anbefalede dæktryk lavere end dæktrykket. Dæk opfører sig altså ikke som en 'ballon'.

En model kunne beskrive stressfordelingen dels i kørselsretningen, dels på tværs af dækket. Stressfordelingen i kørselsretningen var – uanset dæktype – bestemt af længden af trædefladen. En stigende trædefladelængde gav en eksponentielt stigende evne til at fordele stress. Trædefladelængden var videre i meget høj grad påvirket af dæktrykket. Stressfordelingen på tværs af dækket viste nogle gange en stress-top i midten af dækket og nogle gange en 'to-top' fordeling, – det vil sige med højest stress ved kanterne af dækket. Der var ingen enkel sammenhæng mellem trædefladens bredde (det vil sige dækbredden) og denne forskel i stress-fordeling. Lavt dæktryk gav en to-top fordeling.

Dæktrykket påvirkede dækkenes evne til at fordele stress over trædefladen forskelligt. Vores undersøgelser kan ikke afgøre, hvorvidt de registrerede forskelle skyldes dækkenes

dimensioner, eller om ikke-kendte konstruktionsdetaljer er afgørende. Resultaterne kan dog tolkes i retning af, at høj-profil dæk – det vil sige en stor sektionshøjde i forhold til dækkets bredde – er mere fleksible og dermed bedst i stand til at fordele stress over trædefladen både ved anbefalet og ikke-optimale dæktryk.

Målingerne viste, at lastvognsdæk, der kræver højt dæktryk, har en meget spids stressfordeling og overfører meget store kræfter til jorden. En sammenligning til 4 andre vogndæk viste, at dækkenes dimensioner har stor betydning for både trædeflade og fordeling af stress i trædefladen. Der var forbavsende lille forskel mellem de to testede traktordæk.

De målte trædefladedimensioner og stressfordelinger blev kombineret med en model til beskrivelse af, hvilke kræfter der transmitteres ned i jorden. Denne fremskrivning af resultaterne viste, at stress i de øvre jordlag (til ca. 30 cm) næsten udelukkende var bestemt af stress i trædefladen (og dermed af dæktrykket). Dæktrykket viste sig bemærkelsesværdigt også at have effekt på stress i 1 meters dybde, hvor hjullasten dog havde den altovervejende betydning.

Den omtalte fremskrivning af vores resultater viste, at dybden for 50 kPa stress kunne forudsiges med en enkel ligning, - den såkaldte '8-8 regel': dybden for 50 kPa stress stiger med 8 cm for hver ton ekstra hjullast og med 8 cm for hver fordobling af dæktrykket. Reglen blev valideret på grundlag af nyligt foretagne målinger af stress under forskelligt belastede hjul med forskellige dæktryk. Ved kombination af en række forslag til retningslinier for tilladelig stress i jordprofilen kan formuleres det såkaldte '50-50 krav' til forhindring af en permanent pakning af forårsfugtig jord: trafik på landbrugsjord bør tilrettelægges således, at den ikke giver anledning til stress over 50 kPa i 50 cm dybde. Anvendes dette bæredygtighedskriterium forudsiger den opstillede 8-8 regel, at dæk med 1 bar dæktryk ved kørsel på forårsfugtig jord maksimalt må belastes med ca. 2.5 tons. Gode lavtryksdæk med 50 kPa dæktryk må ifølge reglen kun belastes med op til 3.5 tons, hvis stress over 50 kPa skal undgås i dybder større end 50 cm.

Beregninger inkluderende alle gennemførte test viste, at trædefladens form og areal samt evnen til at fordele stress i kørselsretningen og på tværs af dækket var korreleret til dækkenes dimensioner, hjullasten og dæktrykket. Sidstnævnte indgik i beregningerne som forholdet mellem det aktuelle og det anbefalede dæktryk for kørsel i marken. På grundlag af sådanne beregninger kunne opstilles såkaldte prediktionsligninger, der kan forudsige trædefladeform og -areal samt stressfordelingen over trædefladen. Disse ligninger kan anvendes også for andre dæk end dem, der indgik i undersøgelsen. Dette gav basis for udarbejdelse af et beslutningsstøttesystem, der er implementeret online under betegnelsen 'JORDVÆRN online'. Systemet vil blive tilgængeligt på nettet i løbet af foråret 2007. Værktøjet giver mulighed for illustration af effekten af dæktryk og hjullast på de kræfter, der påvirker jorden.

Undersøgelsen har aflivet en række myter om stress i trædefladen hjul-jord og kvantificeret de kræfter, der overføres fra dækket til jorden. Resultaterne fremhæver vigtigheden af at anvende gode lavtryksdæk samt af altid at indstille dæktrykket til det anbefalede for kørsel i marken. Samtidig indikerer resultaterne, at selv de i dag bedste dæk ikke kan belastes med mere end 3.5 tons uden at overføre stress på 50 kPa til jordlag under 50 cm.

Summary

Modern agricultural machines are very heavy. Several investigations have documented the ensuing compaction of the soils and detrimental effects on various soil functions and crop yields. It is often believed that wide, low-pressure tyres make traffic with heavy loads safe. However, only a few investigations have quantified the stress in the soil-tyre contact area.

We selected seven tyres for studies of stress in the soil-tyre contact area. Five trailer tyres and two tractor tyres were loaded with either 3 or 6 tonnes and with the tyre pressure adjusted to that recommended by ETRTO for traffic in the field. In addition, two of the trailer tyres were tested at one inflation pressure below and one above the recommended level with a 6 tonne load. Finally, these two tyres were also tested at an 8.5 tonnes wheel load at the recommended inflation pressure. The tests were performed on a loamy sand with a water content slightly below field capacity. The soil had not been tilled for half a year before the measurements. The field was divided into a total of sixty plots, allowing tests of 20 combinations of tyre type, wheel load and inflation pressure with three replicates. Prior to performing a test, the soil was rotavated to a depth of ~10 cm. A battery of 17 stress transducers glued to a rubber blanket was then installed on the surface of the undisturbed soil, while the loose, rotavated soil layer was temporarily removed. A specially constructed trailer was loaded to the planned weight, and the wheel was driven across the stress transducers. A laser system allowed the tyre position relative to the transducers to be identified.

The results showed a significant influence of tyre inflation pressure on the size of the contact area and on the stress distribution within this area. The contact area for the two trailer tyres loaded with 6 tonnes at 240 kPa inflation pressure was approximately two thirds of that at the recommended inflation pressure of 100 kPa. The average ground pressure was lower than the inflation pressure for pressures at or above the recommended. However, the stress distribution was always uneven. Peak stresses were generally found at ~100 kPa above the tyre inflation pressure. The level of maximum stress found by model fitting was about 50 kPa above the inflation pressure.

The stress distribution was well described by a model that combined the distribution in the driving direction and perpendicular to that direction. The stress distribution in the driving direction correlated to the length of the contact area. The ability to distribute the stress increased exponentially with increasing contact length. This relation was independent of tyre type but influenced by wheel load. The stress distribution perpendicular to the driving direction for some tyres and inflation pressures had a parabolic form with the maximum in the middle of the tyre. In other cases we observed a U-shaped distribution, i.e., with a stress top near each edge of the tyre. We found no simple correlation between tyre width and stress distribution.

The tests with over- and under-inflated tyres included two trailer tyres with different dimensions. They differed with respect to the influence of tyre inflation pressure on the stress distribution. This may be due to differences in construction details of the tyres, but may also be interpreted as an effect of the aspect ratio: the tyre with an aspect ratio of 65% distributed the stress better than that with only 50%.

Our results confirmed an expectation of very high stresses below a heavy-truck tyre with high inflation pressure. Modern radial-ply tyres performed much better, but the results showed the need for big tyres when carrying high loads. The maximum stress could be estimated across all tyre types from the inflation pressure as mentioned above. Only small differences were observed between the two tractor tyres tested. They performed in general like the trailer tyres, although higher peak stresses were measured.

We used the measured data for contact area and stress distribution as input to a Söhne-type model for prediction of stresses in the soil below the wheel. Although the modelling necessarily is an extrapolation of our results, recent validations of the Söhne model indicate that such calculations are reliable. The observed uneven stress distributions in the contact areas did not change the well-known predictions obtained by the Söhne model when using even stress distributions: stresses in the topsoil were determined by the stress in the contact area, while the stresses in deep subsoil layers (~1 meter depth) were determined primarily by the wheel load. It ought to be mentioned, although, that the Söhne model predicted minor but statistically significant influence of inflation pressure also at a depth of one meter. Söhne-type estimates of the maximum depth of 50 kPa stress could be summarised by a model combining wheel load and tyre inflation pressure: this depth increased with ~8 cm per tonne additional wheel load and with ~8 cm for each doubling of the tyre inflation pressure. If taking a maximum of 50 kPa stress at 50 cm depth as a sustainability criterion, this model predicts a maximum wheel load of ~3.5 tonnes even when using low-pressure (50 kPa) tyres.

The observed characteristics of the contact area and the stress distribution were correlated to the dimensions of the tyres. Regression equations also including the relative tyre inflation pressure (actual / recommended pressure) and the wheel load explained 62-92% of the variation in data. The equations may be used for prediction of contact area dimensions and stress distributions for tyres not used in the present investigation. A first-generation decision-support system was constructed and set up for online use ('JORDVÆRN online'; available on the web in spring 2007). This tool is primarily suitable for illustration of the effects of wheel load and tyre inflation pressure on the stresses in the tyre-soil contact area.

This investigation has exploded some myths on stresses below wheels. The quantification of the stresses and an associated model for the stress distribution in the contact area has helped to understand the effects of tyre type, wheel load and inflation pressure. In particular, the study highlights the importance of the need to regulate the inflation pressure to the recommendation set up for use in the field.

Symboolliste

a	Halv-akse for superellipsen (halv trædefladelængde) (m) <i>Half-axis of the super ellipse (half length of the contact area) (m)</i>
A_{ellip}	Estimat for trædefladeareal beskrevet med superellipsen (m ²) <i>Contact area between wheel and soil calculated from the dimensions of the fitted super ellipse (m²)</i>
b	Halv-akse for superellipsen (halv trædefladebredde) (m) <i>Half-axis of the super ellipse (half width of the contact area) (m)</i>
A_{num}	Trædefladeareal beregnet ved at gange den længde, hver transducer har været i kontakt med hjulet, med afstanden til den næste transducer og dernæst summere disse del-arealer (m ²) <i>Contact area between wheel and soil calculated from the length of contact between wheel-soil for each individual stress transducer (m²)</i>
B	Sektionsbredde (m) <i>Tyre width (m)</i>
d_{50}	Söhne-predikeret maksimal dybde for 50 kPa stress (cm) <i>Söhne- predicted maximum soil depth affected by the 50 kPa stress isobar (cm)</i>
F_{app}	Hjullast beregnet som sum af belastninger på enkelttransducere (kN) <i>Apparent wheel load calculated from readings of stress transducers (kN)</i>
F_{hjul}	Hjullast målt fra brovægten (kN) <i>Wheel load measured on weighbridge (kN)</i>
H	Sektionshøjde (m) <i>Nominal section height of a tyre (m)</i>
LF	Lastfaktor (kvotienten $F_{\text{app}}/F_{\text{hjul}}$) (kN kN ⁻¹) <i>Load factor (the quotient $F_{\text{app}}/F_{\text{hjul}}$) (kN kN⁻¹)</i>
n	Parameter der udtrykker 'firkantethed' af superellipsen: for høje værdier bliver trædefladen næsten rektangulær, mens den er mere afrundet for små værdier (-) <i>Parameter governing the shape of the super ellipse (-)</i>
p_{max}	Model-fittet maksimum stress i kontaktfladen (kPa) <i>Model-fitted maximum stress in the contact area (kPa)</i>
p_{spids}	Målt spidsbelastning i kontaktfladen (kPa) <i>Measured peak stress in the contact area (kPa)</i>
p_{teor}	Teoretisk gennemsnitlig stress i kontaktfladen (hjullast divideret med trædefladeareal) (kPa) <i>Average ground pressure calculated from wheel load and contact area (kPa)</i>
α	Stressfordeling i kørselsretningen (-) <i>Form parameter for stress distribution in the driving direction (-)</i>
β	Stressfordeling på tværs af dækket (-) <i>Form parameter for stress distribution across the wheel (-)</i>

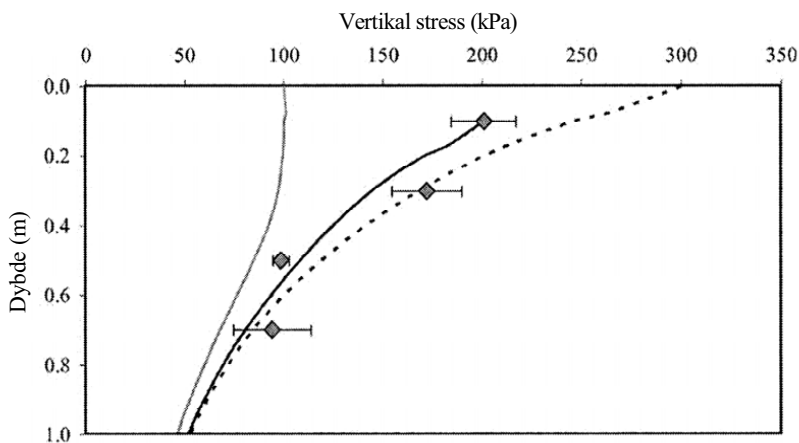
Indledning

Mekaniseringen i landbruget har de seneste årtier medført en markant forøgelse af størrelse og dermed også vægt af de maskiner, der bruges i landbrugsdriften. Det er i dag ganske almindeligt, at akselbelastningen på transportvogne og ikke mindst kartoffel- og roeoptagere er langt over 10 tons. De største moderne mejetærskere er ikke ualmindelige i Danmark og kommer helt op på ca. 20 tons på den drivende aksel. Tilsvarende findes ofte tandem (bogie) aksler med 20 tons og tridem aksler med 27 tons (Diserens, 2006). Forskning og undersøgelser har tidligere vist, at akselbelastninger på over 6 tons kan give skadelig pakning ikke alene i de øverste jordlag men også i underjorden (f.eks. Håkansson & Reeder, 1994; Alakukku, 2000). Internationale eksperter på området ser pakning af underjorden som den største trussel mod jordens frugtbarhed (Håkansson, 1994, 2000, 2005). En række undersøgelser har vist, at pakning af jorden under ca. 40 cm dybde må betragtes som stort set permanent (f.eks. Voorhees et al., 1986; Etana & Håkansson, 1994; Håkansson & Reeder, 1994; Schjønning & Rasmussen, 1994; Voorhees, 2000). Også for danske forhold er det gentagne gange konstateret, at jorden under pløjedybden er pakket til et u hensigtsmæssigt niveau (f.eks. Djurhuus & Olesen, 2000; Schjønning et al., 2000, 2002). Videre er det vist, at mekanisk løsning af jorden ikke umiddelbart er i stand til at løse problemet (f.eks. Munkholm et al., 2005ab).

Jord er for nylig i en artikel i det ansete tidsskrift 'Science' blevet kaldt for 'det mest komplicerede biomateriale på Jorden' (*the most complicated biomaterial on Earth*; Young & Crawford, 2004). I den vand-umættede zone fra jordoverfladen til grundvandet foregår en lang række omsætningsprocesser af vital betydning ikke alene for jordbrugets planteproduktion men for effekten på miljøet, herunder udveksling af drivhusgasser. Med de meget store belastninger, der med dagens maskiner pålægges landbrugsjorden, må forventes, at der sendes trykpåvirkninger ned til jordlag, der ikke tidligere har været direkte påvirket af menneskets aktiviteter. Der ligger et åbenlyst skisma i problemstillingen. Moderne landbrug er baseret på de store maskiner. Samtidig ved man, at færdsel med maskinerne vil føre til permanente pakningsskader. I Tyskland er man begyndt at diskutere en vej ud af dette skisma (Lebert, 2006). Man mener ikke at kunne komme uden om maskinernes størrelse og vælger derfor at acceptere permanent pakning af jorden, idet man sætter kriterier for tilladelig pakning op, der baseres på simple jordegenskaber som vandledningsevnen (Lebert, 2006). Dette må imidlertid betragtes som en yderst risikabel strategi. Ud over jordens kendte funktioner, vil der givet forekomme processer, som vi end ikke har kendskab til. Jordpakning er ikke 'kun' et spørgsmål om en evt. effekt på jordbrugerens udbytte det aktuelle og de førstkomende år efter pakningen sker. Kriteriet for en bæredygtig landbrugsdrift er, at der slet ikke sker pakning af underjorden (van den Akker & Schjønning, 2004).

Nutidens store maskiner er nødvendigvis udstyret med langt bedre dæk end man rådede over før i tiden. Moderne flotationsdæk bygget efter radial-princippet har givet mulighed for en langt større trædeflade samt tilladt lavere dæktryk ved store hjullaster. Der er ingen tvivl om, at moderne lavtryksdæk mindsker pakningen af de øvre jordlag (Vermeulen & Perdok, 1994). Desuden opnås med radial- i forhold til diagonaldæk et mindre brændstofforbrug, en

mere jævn slitage, og en mere stabil kørsel (Jørgensen et al., 2003). På baggrund af den skitserede alvor i pakningsproblematikken er spørgsmålet imidlertid, i hvor høj grad anvendelsen af disse dæk løser problemet. Der er forbavsende få egentlige målinger af stress (tryk) i trædefladen mellem jord og hjul. Ofte har man til brug for vurdering af et hjuls trykpåvirkninger alene anvendt dæktrykket som sådan eller måske dæktrykket tillagt et fast tilskud beroende på dækkets stivhed (van den Akker, 1992). Andre fremgangsmåder har været opmålinger af trædeflade-arealet på forskellige måder og dernæst en beregning af gennemsnitlig stress i trædefladen ud fra hjullasten. Nye målinger har imidlertid vist spidsbelastninger under dæk, der langt overstiger de nævnte, simple estimater for trædefladetrykket (van den Akker, 2003; Keller, 2005). Disse spidsbelastninger er sammen med stressfordelingen iøvrigt samt størrelsen af det samlede trædefladeareal bestemmende for de kræfter, der transmitteres til underjorden (Söhne, 1953, 1958). Fordelingen af stress i trædefladen er afgørende for at kunne sige noget om de kræfter, der transmitteres til jordprofilen (Keller & Arvidsson, 2004; Keller, 2005; Keller et al., 2007). Figur 1 viser således stress-fordelingen under et tungt lastet hjul på en roeoptager (målepunkter) samt beregninger ud fra antagelser om stress i trædefladen eller ud fra målinger af stressfordelingen i trædefladen. Det ses, at antagelsen om en ensartet fordeling giver en helt forkert prediktion af stress i jorden, mens anvendelse af den målte fordeling af stress i trædefladen giver prediktioner tæt på det målte. Det er på dette grundlag klart, at der er et stærkt behov for at øge kendskabet til stressfordelingen i kontaktfladen jord-hjul.



Figur 1. Fordeling af stress i jordprofilen midt under et 1050/50R32 dæk på roeoptager (hjullast 86 kN, dæktryk 100 kPa) målt med krafttransducere i 4 dybder samt beregnet med den såkaldte Söhne-model. Rude-symboler viser målt stress. Linier er Söhne-prediktioner: den grå, fuldt optrukne linie er med antagelse af jævn fordeling i trædefladen, den sorte er med brug af målt stressfordeling og den stiplede med antagelse af lineær (kegle)fordeling (efter Keller & Arvidsson, 2004).

Measured vertical stress (grey rhombi) beneath the centre of the left front wheel of a sugarbeet harvester (1050/50R32, wheel load 86 kN, inflation pressure 100 kPa), and calculated vertical stress using uniform (grey solid curve), measured (black solid curve) and linear contact stress distribution (black dotted curve) (from Keller & Arvidsson, 2004).

Danmarks JordbrugsForskning gennemførte 2004-2007 i samarbejde med Nordisk Dæk Import og Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, et såkaldt Innovationsprojekt med det formål at kvantificere de kræfter, der virker i kontaktfladen mellem jord og dæk. Målet var endvidere at få en bedre forståelse af, hvilke egenskaber ved dækket, der har størst indflydelse på stress-fordelingen. Nærværende rapport beskriver resultatet af disse undersøgelser.

Materialer og metoder

Dæk og testareal

Vi udvalgte syv forskellige dæk ud fra et ønske om at kunne udtale os om både traktordæk og dæk til transportvogne og om dæk med forskellige dimensioner (Tabel 1). Dækkene var – bortset fra Trelleborg-dækket – fabriksny og forsynet med fælge, der gjorde det muligt at montere dem på en specialfremstillet vogn. Fem af dækkene er vogndæk, der normalt bruges til gylleudbringning og græshøst mm og to dæk er traktordæk. Euroband dækket er et højtryks lastvogndæk, der er blevet anvendt en del til transportvogne i landbruget. Trelleborg TWIN dækket er bygget som en mellemting mellem et diagonal- og et radialdæk, mens de øvrige dæk er egentlige radialdæk. I Tabel 1 er dækkene listet efter stigende totaldiameter. Bemærk, at profilet (sektionshøjden divideret med sektionsbredden) er mellem 45 og 65% for vogndækkene og mellem 60 og 75% for traktordækkene. Dækkene er vist i forholdsmæssigt omtrentlig korrekt størrelse i Foto 1.

Tabel 1. Dimensioner for de udvalgte syv dæk, der indgik i undersøgelserne.

Dimensions of tyres selected for the investigation.

Navn	Type	Total diameter	Sektions-højde, H	Dæk-bredde, B	H/B	Dæk-volumen
			m		%	m ³
Euroband SA 385/65R22.5	Vogn-dæk	1.072	0.250	0.385	64.9	0.150 ¹
Nokian ELS Radial 560/45R22.5		1.076	0.252	0.560	45.0	0.347
Trelleborg TWIN 404 700/50-26.5		1.373	0.350	0.700	50.0	0.520
Michelin CargoXbib 650/65R30.5		1.623	0.424	0.662	64.1	0.827
Nokian ELS Radial 800/50R34		1.650	0.393	0.800	49.1	0.887
Michelin XEOBIB 650/60R38	Traktor-dæk	1.735	0.385	0.650	59.2	0.719
Kleber Topker 650/75R38		1.977	0.506	0.650	74.5	0.945

¹Vurderet ud fra dimensioner på tilsvarende dæk

Tabel 2 viser de kombinationer af dæk, hjullast og dæktryk, som blev undersøgt for stress-fordeling i trædefladen hjul-jord. Tallene i tabellen er dæktryk i kPa, idet tal i kursiv afviger fra de fabriks-anbefalede dæktryk. Med andre ord indeholdt undersøgelsen test af, hvorledes de to udvalgte dæk opførte sig ved både unormalt lavt og højt dæktryk ved en belastning på 6 tons. I Appendiks A findes en Tabel med de eksakte hjullaster, der blev brugt ved undersøgelserne. For de to laveste hjullaster lykkedes det at ramme de tilstræbte niveauer ret

godt. Til gengæld var det ikke praktisk muligt at komme højere op end ca. 83 kN for det højeste hjullast-niveau, hvor vi tilstræbte 90 kN.



Foto 1. De undersøgte dæk i omtrentlig korrekt relativ målestok. Dimensioner findes i tabel 1.
The investigated tyres in approximately comparative scales. Consult Table 1 for exact dimensions of the tyres.

Forsøgsmarken er beliggende ved Forskningscenter Foulum på en fin lerblandet sandjord (JB4; Tabel 3). Marken (nordlige del af A8) var pløjet i efteråret 2004 og en vårbygafgrøde etableret i foråret 2005. Midt i juni blev bygafgrøden afhugget med lav stub og forsøgsparcerne straks dækket med sort plast for at forhindre genvækst af afgrøden og opfugtning ved regn samt for at minimere fordampning gennem forsøgsperioden.

De i alt 20 kombinationer af dæktype, hjullast og dæktryk, der er vist i tabellen, blev undersøgt i et markforsøg med 3 blokke. Det vil sige, at hver kombination blev testet på 3 uafhængige jordparceller. Alt i alt blev der således foretaget 60 test. Forsøgsperioden strakte sig fra 15. juni til 7. juli 2005.

Tabel 2. Kombinationer af dæk, dæktryk og tilstræbt hjullast i undersøgelsen for stressfordeling i trædefladen hjul-jord. Tallene i tabellen er dæktrykket i kPa (100 kPa=1bar). Alle dæktryk bortset fra de kursiverede er anbefalede dæktryk for kørsel ved 10 km pr. time. *Combinations of tyres, wheel loads, and tyre inflation pressures tested for stress in the tyre-soil contact area. The figures in the Table are inflation pressure in kPa. All pressures except those in italics are factory-recommended inflation pressures at 10 km h⁻¹.*

Navn	Dæktype	Hjullast ¹ (kN)		
		30	60	90
Euroband SA 385/65R22.5	Vogndæk	270	550	
Nokian ELS Radial 560/45R22.5		140	340	
Trelleborg TWIN 4004 700/50-26.5		50	130	
Michelin CargoXbib 650/65R30.5		50	50, 100, 240	200
Nokian ELS Radial 800/50R34		50	50, 100, 240	200
Michelin XEOBIB 650/60R38	Traktordæk	70	200	
Kleber Topker 650/75R38		50	140	

¹Specifikke hjullaster for hvert test er angivet i Appendix A (10 kN ~ 1 ton)

I hver forsøgsparcel blev der straks efter udført test udtaget en jordprøve i løs lejring til bestemmelse af vandindhold. Desuden blev der i hver blok udtaget 10 stk. 100 cm³ ringprøver midt i pløjelaget af ikke-pakket jord til bestemmelse af jordens volumenvægt (tæthed).

Tabel 3. Tekstur, vandindhold, samt partikeldensitet og volumenvægt for jord i pløjelaget på test-marken på Foulumgaard Forsøgsstation. Partikelstørrelserne er anviget i mm. *Soil texture, water content, and dry bulk density of non-compacted plough layer soil at the test field. Particle sizes are in mm.*

ler	Silt	Finsand	Grov-sand	Organisk stof	Partikel densitet	Tør volumen-vægt	Vand-indhold
<0.002	0.002-0.02	0.02-0.2	0.2-2				
kg kg ⁻¹				kg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
0.076	0.134	0.451	0.299	0.040	2585	1351	0.248

Målesystem

Der blev opbygget et specialmålesystem til det aktuelle formål. Cylindriske stålstænger (50 mm Ø, 32 mm højde) blev udboret til ca 25 mm dybde med det formål at der kunne placeres en vejecelle (DS Europe Series BC 302) i bunden og at et stålstempel med nøjagtig tilsvarende diameter (Ø=20 mm) kunne placeres over denne. Stemplets overflade flugtede nøjagtig med overkanten af den udborede stålstang (transducerhuset) og kunne dermed transmittre kræfter ned til vejecellen. 17 af disse transducerhuse blev i en linie limet på en 6 mm tyk, fleksibel gummidug (6 cm fra centrum til centrum af transducerhuse). Dermed opnåede vi et målesystem, hvor hver enkelt transducerhus kunne bevæge sig vertikalt næsten uafhængigt af de øvrige transducere. Ledninger fra hver enkelt vejecelle blev ledt til dataopsamlingssystemet gennem en ca. 30 mm Ø fleksibel PVC slange, der ligeledes blev fæstnet til gummidugen. Systemet kunne foretage målinger på alle 17 transducere med en meget høj frekvens. Vi opsamlede samhoørende værdier (2µs mellem aflæsning af to

nabotransducere) med en frekvens på 2kHz (500µs mellem hvert sæt af data) for på den måde at få et meget detaljeret billede af kræfterne under hjulet i forbindelse med overkørsel. Detaljer af måleudstyret er vist i Foto 2. Flere detaljer er beskrevet af Lamandé et al (2006a).

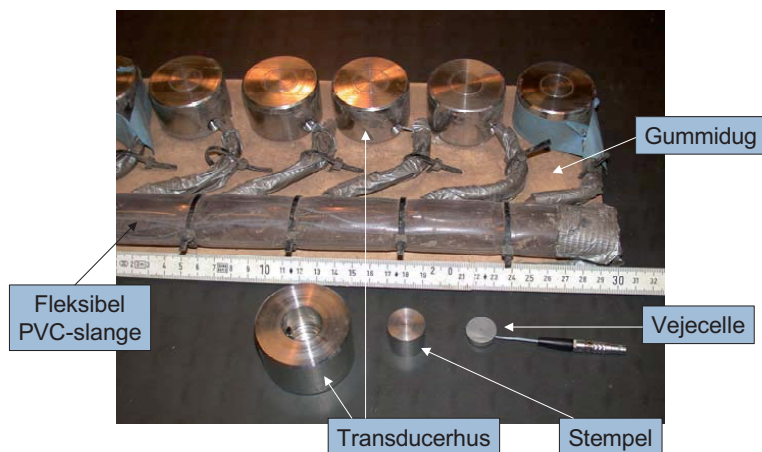


Foto 2. Udsnit af målesystemet, der består af et batteri af 17 vejeceller indlagt i transducerhuse, der er limet på en fleksibel gummidug.

Part of the battery of stress transducers glued onto a flexible rubber band.

Gennemførsel af test

Hver forsøgsparcel blev fræset til ~10 cm dybde umiddelbart før et test. Vi brugte en stor rotationshastighed kombineret med en langsom fremkørselshastighed, idet vi ønskede at pulverisere knolde og skabe et meget homogent jordlag samt en veldefineret, vandret overflade af ikke-bearbejdet jord. Dernæst blev med skovl manuelt fjernet et bånd (ca. 30 × 100 cm) af fræset jord. Med hjælp af en specialfremstillet 'høvl' og en skabelon til at styre denne blev der derefter lavet en grube i den ikke-fræsed jord (Foto 3). Gruben svarede nøjagtig til transducersystemets dimensioner. Gummidugen med de tilhørende 17 transducere, PVC slange mm kunne dernæst forsigtigt lægges ned i 'gruben' på uforstyrret, plan jord (Foto 4). Løs jord blev lagt tilbage mellem stål-transducerhusene og pakket med hånd til en tæthed omtrentlig som den ikke-bearbejdede jord. Rækken af transducerhuse blev placeret således, at testhjulet ville nå stressmålerne før det betrådte jordlaget over arealet med ledninger mm. Derved opnåedes en situation med en uforstyrret jord med omtrent identisk tæthed helt frem til de 17 transducerhuse, hvis overflade var i nøjagtig samme højde som overkanten af den ikke-fræsed jord. Endelig blev løs, fræset jord lagt tilbage i samme løse lejrning og dybde som for den omgivende jord. Med den beskrevne procedure opnåede vi følgende:

- Transducerhusenes overflade var i ~10 cm dybde i forhold til overfladen af den løse, fræsed jord
- I dybden under 10 cm blev alene den jord forstyrret, hvor transducersystemet blev placeret

- Jorden i umiddelbar afstand af transducerhusene (dvs over gummidugen og mellem transducerhusene) havde omtrent samme tæthed som den øvrige jord under 10 cm
- Jorden over målesystemet var ensartet og med et minimum af knolde, der ville kunne give lokalt store trykpåvirkninger under målingen



Foto 3. Med en specialfremstillet 'høvl' understøttet af en skabelon lavet af støbekrydsfinerplade blev der lavet en grube nøjagtig svarende til målesystemets dimensioner.

A trench in the undisturbed >10 cm soil layer is prepared by using a specially constructed Dutch hoe guided by a wooden template.



Foto 4. Placering af transducersystemet forud for måling. Se også Foto 8 (side 26).

The transducer battery is placed in the trench with the top of transducer housings exactly in line with the surface of the undisturbed soil layer. Before performing the tests, 10 cm of loose soil was backfilled on top of the transducer battery. Also see Photo 8 (page 26).



Foto 5. Specialfremstillet vogn med sideforskudt testhjul. Her påmonteret Nokian ELS 800/50R34 dækket. Hjullasten blev reguleret ved at lægge et forskelligt antal belastningslodder á ~500 kg på vognen. Begge vognens hjul var monteret med samme type dæk under testet. Se også Foto 10 (side 59).

The test trailer equipped with the 800/50R34 tyre. Notice that the test wheel is running beside the tractor track. Also see Photo 10 (page 59).



Foto 6. Jordoverfladen umiddelbart efter overkørsel med Michelin Cargo xbib dækket.

A picture of the soil surface immediately following a test with the Michelin Cargo xbib 650/65R30.5 tyre.

Vi brugte en ombygget transportvogn til undersøgelserne (Trautner, 2003). Denne vogn kunne via et hydraulisk system bringes til at køre ca. 1 meter sideforskudt i forhold til den trækkende traktor (Foto 5). Fremkørselshastigheden var ca. 1.9 km pr. time. Med den tidligere nævnte dataopsamlings-frekvens betyder dette, at der blev målt stress i alle 17 transducere for ca. hver 0.26 mm fremkørsel af køretøjet. En laser sensor registrerede gennem hele måleforløbet positionen af test-hjulet og gjorde det dermed muligt at korrelere de registrerede data fra stresstransducerne med afstanden fra hjulakslen. Foto 6 og 7 viser situationen efter test med henholdsvis Michelin Cargoxbib og Euroband dækkene. Flere detaljer omkring måleproceduren kan findes hos Lamandé et al. (2006a).

Testvognen kunne belastes med 'lodder' á ca. 500 kg, hvilket gjorde det muligt at variere akselbelastningen fra ca. 6 tons til næsten 17 tons (Foto 5). Dermed kunne gennemføres test ved de planlagte hjullaster på ca. 3, 6 og 9 tons. Forud for hvert test blev det belastede testhjul vejlet på brovægt.



Foto 7. Jordoverfladen og transducersystemet efter test med Euroband dækket. Bemærk transducerhusenes store evne til at bevæge sig uafhængigt af hinanden. Se også Foto 12 (side 71).
The uncovered transducer battery following a test with the Euroband tyre. Notice the high individual flexibility of the transducer housings. Also see Photo 12 (page 71).

Beregninger og statistik

Tilbagelægningen af 10 cm løs jord oven på transducerne gav et lille start-niveau for stress, der ikke skyldtes kontakt med hjulet. Når hjulet belastede jorden steg den målte kraft indtil hjulet havde passeret. Et stressniveau på over 10 kPa (0.1 bar) blev taget som udtryk for, at en given transducer havde kontakt med hjulet. Ved kombination med lasermålingerne kunne på

denne måde beregnes datapunkter, der beskrev hjulets trædeflade (Figur 2). Vi brugte en superellipse model (Appendiks B) til beskrivelse af trædefladens form, idet ligning B1 (se Appendix B) blev fittet til data med en procedure beskrevet af Rosin & West (1995).

Trædefladen er det jordareal, der er i kontakt med hjulet. Det har form som en superellipse, der kan betegnes som en mellemting mellem en ellipse og et rektangel.

Fordelingen af stress i trædefladearealet blev beskrevet med en sammensat model for stress-fordelingen i kørselsretningen henholdsvis på tværs af hjulet (ligning B2 i Appendix B). Vi brugte en ikke-lineær fitte facilitet i det statistiske program R (R Development Core Team, 2005) til at estimere parametrene i ligning B2, B2a og B2b (Appendiks B). Vi henviser til en detaljeret beskrivelse af betydningen af form-parametrene α og β for stressfordelingen i kørselsretning hhv på tværs af hjulet (Schjønning et al., 2007).

Effekten af dæktype, hjullast og dæktryk på trædeflade-parametre og stress-fordeling blev analyseret ved hjælp af PROC MIXED i SAS-programmet SAS (SAS Institute, 1996). Desuden blev anvendt PROC REG og PROC GLM i samme programpakke til bestemmelse af korrelationer mellem parametre samt til parametrisering af modeller baseret på kontinuerte variable.

Resultater og diskussion

Jordens vandindhold og volumenvægt

Det gennemsnitlige vandindhold for alle parceller var 0.184 g per g jord. Med en gennemsnitlig volumenvægt på 1.351 g cm⁻³ svarer det til 24.8 volumenprocent (Tabel 3), hvilket er lidt lavere end markkapacitet (forårets vandindhold) vurderet ved sammenligning til data fra et naboareal (Jacobsen, 1989). Variationsanalyse viste, at der ikke var signifikant forskel på volumenvægten i de 3 blokke. Til gengæld var vandindholdet signifikant stigende ned gennem marken (23.1, 25.4 og 26.2 volumenprocent for henholdsvis blok 1, 2 og 3). Der var ingen signifikant ændring i vandindholdet gennem forsøgsperioden. Det betød samtidig, at der ikke var signifikant forskel på vandindholdet i testjorden for de 20 kombinationer af dæk, hjullast og dæktryk, der blev testet.

Korrektion af stress-data til korrekt hjullast

Ud fra stress-data, afstanden mellem stress-transducere (6 cm) samt afstand mellem nabo-målepunkter i kørselsretningen (ca. 0.3 mm, kendes nøjagtigt fra laser-målingen) kan beregnes et estimat for den samlede vægt, F_{app} , der belaster hjulet (mere detaljeret beskrevet af Keller, 2005). Denne blev sammenlignet med den kendte vægt fra brovægten, F_{hjul} . Det viste sig, at F_{app} oftest var større end det rigtige tal, F_{hjul} . Kvotienten F_{app}/F_{hjul} varierede mellem 0.95 og 1.64. Median-værdien (den mest hyppige værdi) var 1.216, altså en overprediktion af vægten på 21.6%. Der var ingen signifikant effekt af hverken dæktype, hjullast eller dæktryk (analyseresultater ikke vist). Fænomenet kan formodentlig tilskrives en vekselvirkning mellem dækket og ståltransducerhusene (Kirby, 1999). Principielt kan ikke måles korrekte stress-værdier med transducere, der har en anden stivhed end det omgivende

materiale (her jord). Det stive stål i transducerhusene medfører, at kræfterne omkring disse ikke afspejler stresset under dækket helt korrekt. Gennemsnitligt fås altså en overprediktion. Da der ikke var nogen signifikante effekter af de dækegenskaber, der skal testes for i denne sammenhæng, vurderes det at være korrekt at anvende de målte værdier, idet disse dog naturligvis skal korrigeres til det belastningsniveau, der er kendt i testet (hjullast målt på brovægt). På dette grundlag blev alle målte stress-værdier multipliceret med en såkaldt 'lastfaktor' værdi $LF = F_{hjul}/F_{app}$ beregnet for hvert specifikke hjultest.

Effekt af dæktryk på kontaktareal og stressfordeling

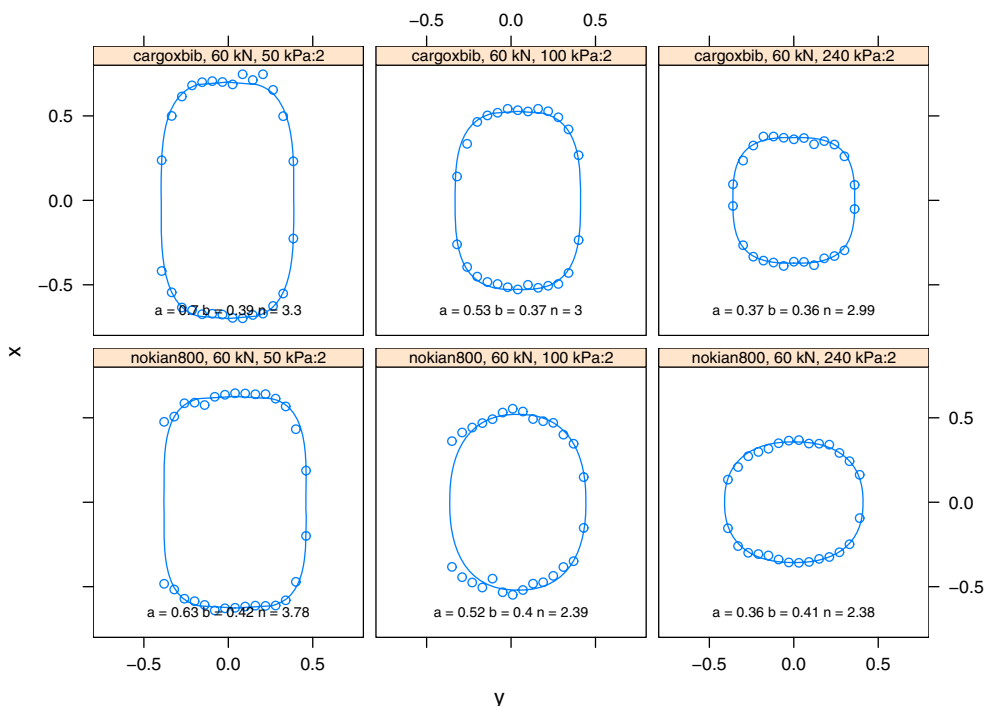
De to vogndæk Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 blev testet ved 3 forskellige dæktryk med en hjullast på 6 tons (Tabel 2). Der skal her erindres om, at det midterste af de 3 dæktryk var fabrikantens anbefalede dæktryk ved den anvendte belastning ved kørsel med 10 km pr. time. De 2 andre dæktryk var valgt for at undersøge effekten af et for lavt henholdsvis et for højt dæktryk.

Data fra een af de tre målegentagelser for Cargobib 650/65R30.5, 6 tons hjullast, 50 kPa dæktryk gik tabt. For denne behandling er der således kun 2 gentagelser.

Kontaktareal

Dæktrykket viste sig – som forventeligt – at have markant indflydelse på størrelsen af kontaktarealet mellem hjul og jord (Figur 2 samt Tabel 4 og 5). Superellipse-modellen gav en god beskrivelse af omridset af trædefladen (Figur 2). Dette fremgår også af den gode overensstemmelse mellem A_{num} og A_{ellip} (Tabel 4 og 5). A_{num} er arealet af trædefladen beregnet ved at gange den længde, hver transducer har været i kontakt med hjulet, med afstanden til den næste transducer og dernæst summere disse del-arealer. A_{ellip} er et estimat for trædefladearealet beskrevet med superellipsen. Der var en tendens til ($P=0.09$; Tabel 4), at sidstnævnte estimat for trædefladearealet ændrede sig mere med dæktrykket for højprofil-dækket 650/65R30.5 end for 800/50R34 (Tabel 5). Kontaktarealet blev mere end fordoblet ved at ændre dæktrykket fra 240 til 50 kPa (Tabel 4 og 5). Det er bemærkelsesværdigt, at højprofil-dækket på trods af de mindre dimensioner end 800/50R34 dækket havde omtrent samme trædefladeareal og ved det laveste dæktryk var tæt på at dække 1 m² jord. På trods af den lidt mindre diameter af 650/65R30.5 dækket (Tabel 1) var længden af kontakthorizonten i kørselsretningen (kan læses som 2 gange a i tabellerne) signifikant højest for dette dæk (Tabel 4). Også denne parameter viste tendens til ($P\sim 0.10$; Tabel 4) at ændre sig mere med dæktrykket for højprofil-dækket end for lavprofil-dækket (Tabel 5). Estimatet for b (halv trædefladebredde) var selvfølgelig højest for det bredeste dæk (Tabel 4). Mere bemærkelsesværdigt er, at b ikke ændrede sig med dæktrykket for 800/50R34 mens der var en tendens til større b med faldende dæktryk for højprofil-dækket (Tabel 5). Selv om denne ændring ikke var signifikant i sig selv ($P\sim 0.11$), er sandsynligheden for vekselvirkning mellem dækkene ($P\sim 0.08$; Tabel 4) endnu en indikation af en effekt af forskellig profil eller måske konstruktionsforskelle mellem de to undersøgte dæk: højprofil-dækket reagerede mest på ændringer i dæktrykket. Parameteren n udtrykker 'firkantethed' af superellipsen; for høje værdier bliver trædefladen næsten rektangulær, mens den er mere afrundet for små værdier.

Resultaterne viser, at trædefladen var signifikant mere firkantet ved 50 kPa dæktryk end ved det høje dæktryk på 240 kPa. De her observerede effekter af dæktrykket på trædefladen er også rapporteret af Raper et al. (1995) for et traktordæk.



Figur 2. Kontaktfladen mellem hjul og jord for de to vogndæk 650/65R30.5 og 800/50R34 ved 3 forskellige dæktryk. Cirkelsymbolerne er måledata, mens strengen angiver den modellerede superellipse. Kørselsretning er 'nedefra og op' i figuren (x-retningen). a , b og n beskriver superellipsen (se Appendiks B). Der er tale om målegentagelse nummer 2 for hver kombination af dæk og dæktryk. I Appendiks C findes tilsvarende figurer for målegentagelse 1 og 3.

The contact area between tyre and soil for the two trailer tyres 650/65R30.5 and 800/50R34 at three different inflation pressures. The circle symbols point out the periphery of the contact area detected by the stress transducers, and the full line indicate a super ellipse fitted to data. Driving direction is 'up-down' (along the x-axis). a , b and n describe the super ellipse (see Appendix B). Selected, individual field tests. Consult Appendix C for inspection of all three replicate tests.

Stressfordeling - generelle aspekter

På trods af den naturlige variation, der må forventes ved stressmålinger i almindelig jord, var den anvendte model (ligningerne B2, B2a og B2b i Appendiks B) i stand til at give en god beskrivelse af fordelingen af stress i trædefladen (Figur 3 og 4 samt Appendiks D). Ved 50 kPa dæktryk udviste begge dæk tydeligt en såkaldt U-formet stress-fordeling. Det vil sige, at stresset var mindre midt under dækket end ude ved de to kanter. Derimod var der ved 240 kPa en såkaldt parabolisk fordeling med højest stress midt under dækket. Ved det anbefalede

dæktryk var situationen en mellemting mellem de to ekstremer, idet der stadig var en tendens til to stress-toppe men meget mindre udtalt. Det er vanskeligt ud fra figurene at vurdere effekten af dæktryk på stressfordelingen i kørselsretningen, og dette vil blive omtalt nærmere lidt senere.

Trædefladearealet ved 2.4 bar dæktryk var kun ca. to tredjedele af arealet ved anbefalet dæktryk på 1 bar.

Tabel 4. Karakteristika ved kontaktarealet hjul-jord og for stressfordeling i kontaktarealet for Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 dækkene (gennemsnitligt over 3 dæktryk) og for 3 dæktryk (gennemsnitligt over de 2 dæk). Tal mærket med samme bogstav er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$). Kolonnerne mærket 'Vekselvirkning' angiver sandsynligheden for vekselvirkning mellem dæktype og dæktryk (d.v.s. forskellig trend i dæktrykkenes effekt for de to dæk). Data for hvert af de to dæk findes i Tabel 5.

Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for the 650/65R30.5 and the 800/50R34 tyres (averaged accross three inflation pressures) and for three inflation pressures (averaged accross the two tyres). Figures labelled with the same letter are not significantly different ($P=0.05$). The right-hand column gives the probability of interaction between tyre type and inflation pressure. Data for each individual tyre are found in Table 5.

Parameter	Dæk		Dæktryk, kPa			Vekselvirkning
	650/65R 30.5	800/50R 34	50	100	240	P
Kontaktareal						
a -parameter, m	0.52 ^b	0.49 ^a	0.64 ^c	0.51 ^b	0.36 ^a	0.101
b -parameter, m	0.37 ^a	0.40 ^b	0.40 ^b	0.39 ^{ab}	0.37 ^a	0.078
n -parameter, -	3.30 ^a	3.30 ^a	4.05 ^b	3.07 ^{ab}	2.79 ^a	0.250
A_{num} , m ²	0.71 ^a	0.72 ^a	0.97 ^c	0.71 ^b	0.47 ^a	0.276
A_{ellip} , m ²	0.71 ^a	0.70 ^a	0.95 ^c	0.69 ^b	0.46 ^a	0.090
Stress						
p_{spids} , kPa	212 ^a	233 ^a	141 ^a	189 ^b	337 ^c	>0.3
p_{max} , kPa	173 ^a	179 ^a	90 ^a	143 ^b	295 ^c	>0.3
p_{teor} , kPa	92 ^a	91 ^a	62 ^a	85 ^b	129 ^c	0.214
α -parameter, -	4.09 ^b	3.28 ^a	6.72 ^c	2.69 ^b	1.65 ^a	<0.001
β -parameter, -	1.52 ^a	1.60 ^a	2.24 ^c	1.67 ^b	0.77 ^a	0.100

Figur 3 og 4 viser, at der forekom ret høje spidsbelastninger i trædefladen (p_{spids}). Der synes ikke at være signifikante forskelle mellem dækkene med hensyn til disse høje tryk (Tabel 4). Til gengæld var der naturligt nok en signifikant stigning med stigende dæktryk (Tabel 4 og 5). Niveaue for maksimum stress (p_{max}) fundet ved fitning med modellen beskrevet i Appendiks B var 40-50 kPa højere end dæktrykket (Figur 3 og 4, Tabel 4 og 5). Heller ikke her var der signifikant forskel på dækkene. Det teoretiske gennemsnitlige stress (p_{teor}) kan udregnes som hjullast divideret med trædefladeareal og er det hidtil oftest anvendte udtryk for stress i trædefladen mellem hjul og jord. Det viser sig at være et dårligt udtryk for

de kræfter, der påvirker jorden (Tabel 4 og 5, Figur 5). Det samme er fundet i andre undersøgelser (Smith, 1985; Burt et al., 1992; Gysi et al., 2001; Keller, 2005).

Tabel 5. Karakteristika for kontaktarealet hjul-jord og stressfordeling i kontaktarealet for hvert af dækkene Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 ved 3 forskellige dæktryk (gennemsnit findes i Tabel 4). Tal mærket med samme bogstav indenfor et givet dæk er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$).

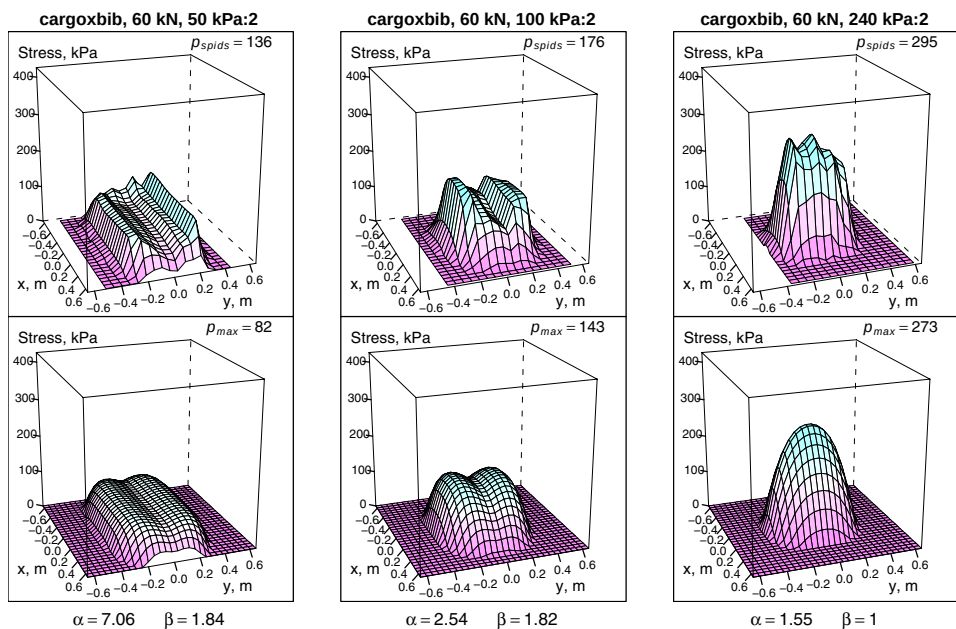
Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for each of the 650/65R30.5 and the 800/50R34 tyres at three inflation pressures (averages are found in Table 4). Figures labelled with the same letter within each tyre are not significantly different ($P=0.05$).

Parameter	650/65R30.5			800/50R34		
	Dæktryk, kPa			Dæktryk, kPa		
	50	100	240	50	100	240
Kontaktareal						
a -parameter, m	0.68 ^c	0.52 ^b	0.37 ^a	0.61 ^c	0.50 ^b	0.35 ^a
b -parameter, m	0.39 ^a	0.37 ^a	0.34 ^a	0.41 ^a	0.40 ^a	0.40 ^a
n -parameter, -	3.58 ^a	3.19 ^a	3.13 ^a	4.51 ^a	2.95 ^a	2.45 ^a
A_{num} , m ²	0.97 ^c	0.70 ^b	0.46 ^a	0.96 ^c	0.71 ^b	0.48 ^a
A_{ellip} , m ²	0.98 ^c	0.69 ^b	0.45 ^a	0.93 ^c	0.69 ^b	0.47 ^a
Stress						
p_{spids} , kPa	131 ^a	184 ^a	321 ^b	150 ^a	194 ^a	353 ^b
p_{max} , kPa	82 ^a	144 ^b	290 ^c	97 ^a	142 ^b	299 ^c
p_{teor} , kPa	61 ^a	85 ^b	131 ^c	63 ^a	85 ^b	127 ^c
α -parameter, -	8.04 ^b	2.68 ^a	1.54 ^a	5.40 ^c	2.70 ^b	1.75 ^a
β -parameter, -	2.03 ^b	1.56 ^b	0.96 ^a	2.44 ^c	1.79 ^b	0.57 ^a



Foto 8.
Installation af
transducersystem.
Venstre: skabelon
til høvl for grube.
Højre: Transducer-
systemet nedlagt,
mangler kun løs
jord.
*Installation of
transducer system.*



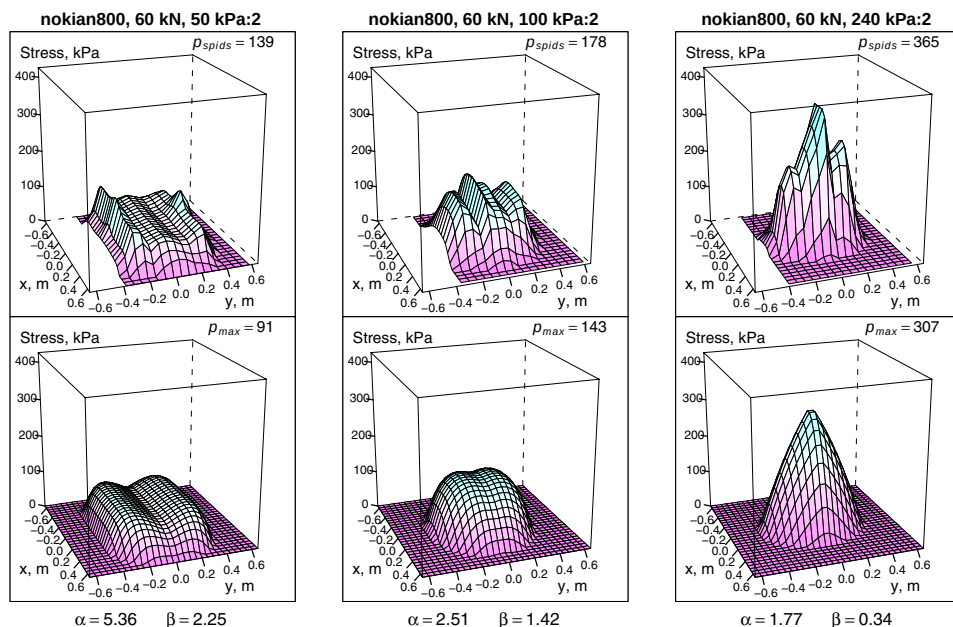


Figur 3. Målt (øverst) og model-fittet (nederst) stress i trædefladen for Michelin Cargo Bib 650/65 R30.5 lastet med ~60 kN og testet ved 3 forskellige dæktryk. Kørselsretning er ind i billedet. Der er tale om målegentagelse nummer 2 for hvert dæktryk. I Appendiks D findes tilsvarende figurer for målegentagelse 1 og 3.

Measured (top) and model-fitted (bottom) stress distribution in the contact area between tyre and soil for the 650/65R30.5 tyre loaded with ~60 kN wheel load and tested at three different inflation pressures. Driving direction is from front to back in the Figures. Selected, individual field tests (same as those in Figure 2). Consult Appendix D for inspection of all three replicate tests.



Foto 9. Hjulskift på testvogn (Euroband og Nokian 800).
Wheel change on test trailer (Euroband and Nokian 800).



Figur 4. Målt (øverst) og model-fittet (nederst) stress i trædefladen for Nokian ELS 800/50R34 lastet med ~60 kN og testet ved 3 forskellige dæktryk. Kørselsretning er ind i billedet. Der er tale om målegentagelse nummer 2 for hvert dæktryk. I Appendiks D findes tilsvarende figurer for målegentagelse 1 og 3.

Measured (top) and model-fitted (bottom) stress distribution in the contact area between tyre and soil for the 800/50R34 tyre loaded with ~60 kN wheel load and tested at three different inflation pressures. Driving direction is from front to back in the Figures. Selected, individual field tests (same as those in Figure 2). Consult Appendix D for inspection of all three replicate tests.

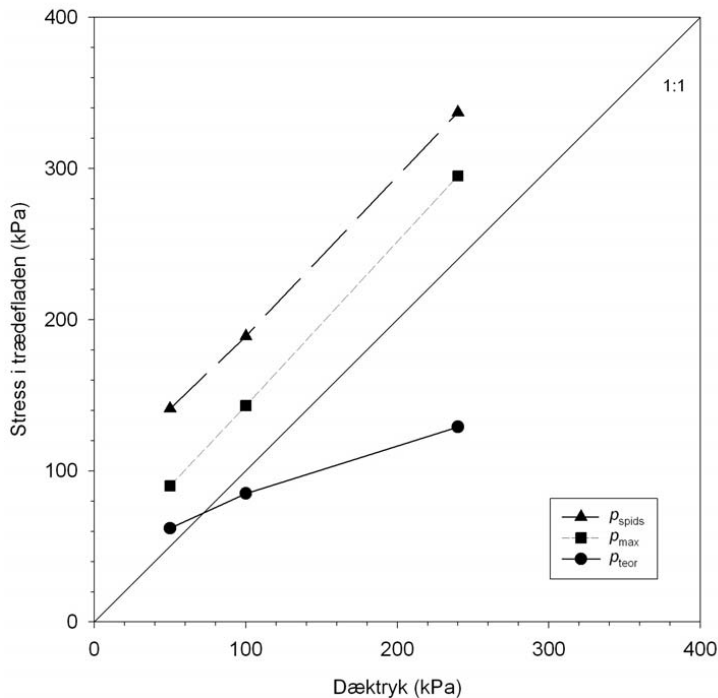
Af Figur 5 fremgår, at p_{teor} var lavere end dæktrykket for det anbefalede og det høje dæktryk. Kun ved det meget lave dæktryk på 50 kPa var det teoretiske gennemsnitlige stress i kontaktfladen højere end dæktrykket. I denne situation bærer dækkets stivhed noget af lasten. Ud fra Figur 5 kan dæktrykket, der netop afbalancerer de 6 tons hjullast, aflæses til ca. 70 kPa. Der var ikke megen forskel på dette estimat for de to dæk.

En ofte hørt 'ballon-teori' siger, at trykket på jorden er lig med dæktrykket. Det holder ikke. På den ene side er dæktrykket for normale værdier højere end det teoretiske gns. stress, der beregnes fra hjullast og trædefladeareal. På den anden side er dæktrykket lavere end den målte stress i trædefladen mellem hjul og jord. Se Figur 5.

Stressfordeling i kørselsretningen - formparameter α

Modellen for stressfordeling over trædefladen er præsenteret i Appendiks B. Stressets fordeling i kørselsretningen beskrives med parameteren α . En høj værdi er udtryk for, at kræfterne under dækket er godt fordelt over kontaktarealet i længderetningen. Resultaterne i Tabel 4 og 5 viser, at α - og dermed dækkenes evne til at fordele stress i kørselsretningen –

steg med faldende dæktryk. Det er vigtigt at huske, at α ikke er identisk med a , der er et udtryk for den halve trædefladelængde som sådan. Men det er tydeligt, at evnen til at fordele stress (udtrykt ved α) i høj grad er bestemt af trædefladelængden (Figur 6). Der var ikke nogen forskel i relationen mellem a og α for de to dæk, hvilket tyder på, at det er trædefladelængden som sådan, der bestemmer α .

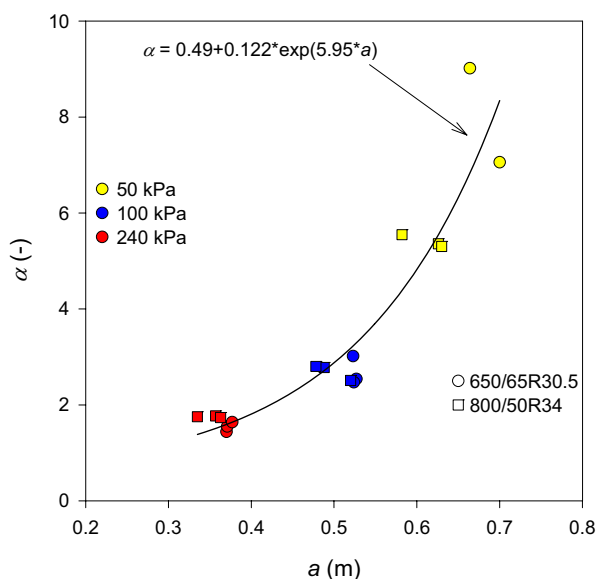


Figur 5. Målt (p_{spids}), model-fittet maximum (p_{max}) og teoretisk gennemsnitlig (p_{teor}) stress i kontaktfladen hjul/jord som gennemsnit af de to dæk Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 ved en hjullast på ca. 60 kN.

Measured peak stress (p_{spids}), model-fitted maximum stress (p_{max}), and average ground pressure (p_{teor}) in the contact area between tyre and soil as averaged for the two trailer tyres 650/65R30.5 and 800/50R34 at three different inflation pressures and loaded with ~60 kN.

Højprofildækket 650/65R30.5 havde signifikant større α værdi end 800/50R34 (Tabel 4). Figur 6 viser i overensstemmelse med den signifikante vekselvirkning i Tabel 4, at det især var ved meget lave dæktryk, at højprofildækket havde højere værdier. Og samtidig kan vi se, at det er evnen til at udstrække trædefladen som sådan, der giver den bedre evne til at fordele stresset.

Stressfordelingen viser, hvordan trykket under dækket fordele sig. Det beskrives ved to parametre (α og β). Parameteren for kørselsretningen (α) skal helst være så stort som muligt. Parameteren for fordelingen på tværs af dækket (β) skal helst være ca. 2; det svarer til to stresstoppe, der ikke er for spidse og ikke langt fra hinanden.



Figur 6. Sammenhæng mellem halv trædefladelængde, a , og formparameter, α , til beskrivelse af stressfordeling i køreretningen. Alene data for 2 dæk ved 60 kN hjullast og ved 3 dæktryk. *Relation between half length of the contact area, a , and the parameter, α , describing the stress distribution in the driving direction. Data from the two trailer tyres 650/65R30.5 and 800/50R34 at three different inflation pressures and loaded with ~60 kN.*

Stressfordeling på tværs af dækket - formparameter β

Parameteren β er et udtryk for stressfordelingen på tværs af dækket (Appendiks B). Her skal man huske, at en værdi under 1 (een) svarer til en såkaldt parabolisk fordeling af stresset i trædefladen. Det vil sige, at den største stressværdi findes midt under dækket. Er værdien meget mindre end 1, er der tale om en meget spids stress-top lige midt under dækket. For værdier over 1 fås en to-top-fordeling, hvilket ofte benævnes en U-fordeling af stress under dækket. Jo større værdier over 1, jo længere er de to toppe fra hinanden og jo 'dybere' bliver 'hullet' midt under dækket (se også Figur B2). Med dette in mente kan vi af Tabel 5 se, at begge dæk ved anbefalet dæktryk havde en to-top-fordeling ($\beta=1.56$ og $\beta=1.79$ for henholdsvis 650/65R30.5 og 800/50R34). Man kan vise, at et dæks trykpåvirkning af jorden alt andet lige er mindst ved en β -værdi i området 1.8-2.1 (Schjønning et al., 2007). Det er bemærkelsesværdigt – og en god nyhed – at de to vogndæk ved anbefalet dæktryk ligger tæt på denne optimale værdi. Bemærkelsesværdigt fordi anbefalingen om dæktryk ved en given belastning os bekendt ikke er baseret på overvejelser endsige undersøgelser af trykpåvirkning under dækkene.

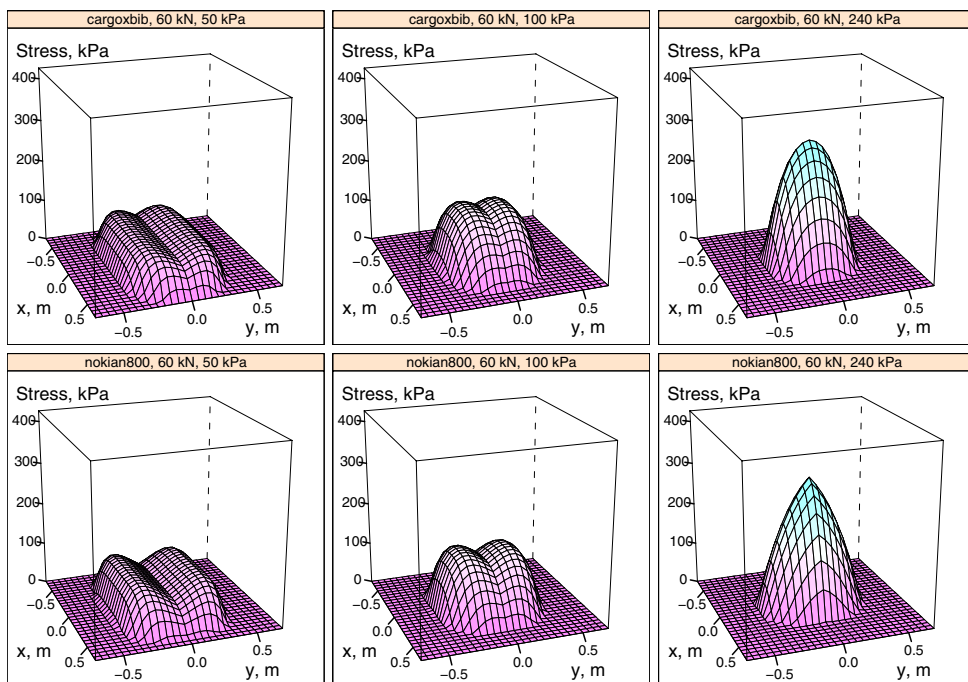
Også for β ser vi en tendens til vekselvirkning mellem dæktype og dæktryk (P~0.10, Tabel 4). Af tabel 5 kan vi se, hvorledes de to dæk reagerede forskelligt på ændringer i dæktryk. Her er det lavprofildækket (800/50R34), der ændrer sig mest med dæktrykket. For dette dæk mindskedes β fra 2.44 ved meget lavt dæktryk til 0.57 ved meget højt dæktryk, - et udsving på

1.87. For højprofildækket fandtes for de samme dæktryk et udsving i β på kun 1.07,- nemlig fra 2.03 til 0.96. Dette sidstnævnte er en fordel, idet store afvigelser fra det optimale område (~1.8-2.1) giver større stress i jorden. 650/65R30.5 dækket giver altså mindre pakning ved ikke-optimale dæktryk end 800/50R34 (Figur 7).

Stressfordelingen på tværs af hjulet har ofte en spids midt på dækket ved højt dæktryk og to toppe - en ud mod hver dækside - ved lavere dæktryk.

Dæktryk - opsummering

I figur 7 er vist de bedst mulige bud på stressfordelingen i trædefladen for de to undersøgte dæk. Som opsummering af detaljerne diskuteret herover kan fremhæves, at selve stress-niveauet stiger markant ved øgning af dæktrykket. Det fremgår tydeligt, at trædefladelængden og dermed stressfordelingen i kørselsretningen er langt større/bedre ved lave end ved høje dæktryk. Og endelig kan fremhæves den moderate to-top fordeling ved anbefalet dæktryk, der har vist sig at være optimal i relation til mindskning af de kræfter, der overføres til jorden.



Figur 7. Estimat for stressfordelingen i trædefladen for Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 med ~60 kN hjullast ved 3 forskellige dæktryk. Beregninger på grundlag af gennemsnit af model-fit for alle 3 målegentagelser for hvert dæktryk. I Appendix D ses den målte og fittede stressfordeling for hvert enkelt test.

Average estimates of the stress distribution in the contact area for the two trailer tyres 650/65R30.5 and 800/50R34 at three different inflation pressures and loaded with ~60 kN. Appendix D shows measured and fitted stress distributions for each individual test.

Resultaterne påpeger således det essentielle i, at dæktrykket skal være så lavt så muligt for at minimere de kræfter, der overføres til jorden. I vores undersøgelser har vi medtaget dæktryk under det anbefalede. Det skyldes, at vi ønskede at finde dynamikken ved regulering af dæktrykket. Men samtidig er det vores fornemmelse at de anbefalede dæktryk måske er fastlagt lidt højere end den nedre grænse for, hvad dækket reelt kan klare. Anbefalet dæktryk fastlægges af en international organisation kaldet ETRTO (The European Tyre and Rim Technical Organization; <http://www.etrto.org>). Mere specifikt foretages disse beregninger ved at fastlægge den hjullast, et givet dæk kan bære ved et givet dæktryk. Der er tale om ret komplicerede beregninger, hvor indgår dæk- og fælgmål samt hastighed. Desuden er beregningerne afhængige af, om der er tale om trækkende eller trukne hjul.

Anbefalet dæktryk afhænger af hastigheden og angives af fabrikanten. Det er yderst vigtigt, at dæktrykket i marken reguleres til anbefalingen for mindste hastighed (10 km pr. time).

Vores undersøgelser for de to specifikke dæk viste, at dækkene fungerede også ved halvdelen af det anbefalede dæktryk. Dog var vi nok meget tæt på grænsen for sikker anvendelse og kan ikke anbefale at bruge kun halvdelen af det anbefalede dæktryk i praksis (se Foto 11, side 66). Men omvendt kan erfaringerne tolkes således, at det anbefalede dæktryk ikke skal betragtes som en 'yderste' grænse,- der ligger en indbygget sikkerhedsmargin. Bl.a. Figur 6 viser, at man først får rigtig udnyttelse af dækkets evne til at udbrede stress i trædefladen, når man regulerer helt ned omkring det anbefalede dæktryk. Det er i den forbindelse uhyre vigtigt at være opmærksom på, at det anbefalede dæktryk afhænger af kørehastigheden. Man bør nøje notere sig, hvad det anbefalede dæktryk er ved kørsel ved 10 km pr. time og anvende dette ved kørsel i marken. Ved kørsel med anbefalet dæktryk ved landevejskørsel (40 km pr. time) ligger man alt for højt med henblik på at udnytte dækkets evne til at mindske jordpakning. Ved skiftevis kørsel på landevej og i mark bør man investere i udstyr, der tillader regulering af dæktrykket.

Effekt af hjullast på kontaktareal og stressfordeling

De to vogndæk Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 blev testet ved 3 forskellige hjullaster (tilstræbt 30, 60 og 90 kN), idet dæktrykket ved disse test blev indstillet efter fabrikantens anbefalinger for disse belastninger (Tabel 2). De reelt anvendte hjullaster er tabelleret i Appendiks A.

Kontaktareal

Trædefladen i alle test er vist i Appendiks C. Igen fandt vi omtrent samme estimat for trædefladearealet med den numeriske summationsmetode (A_{num}) og ud fra arealet for den fittede superellipse (A_{ellip}) (Tabel 6). I modsætning til sammenligningen af de to dæk ved forskelligt dæktryk (Tabel 4 og 5) fandt vi her gennemsnitligt større trædefladeareal for 800/50R34 end for højprofildækket 650/65R30.5 (Tabel 6). Det skyldes et større udsving i trædefladearealet for højprofildækket ved variation mellem de 3 hjullaster (Tabel 7), idet de to dæk havde omtrent samme trædefladeareal ved 60 kN. Resultatet kan tolkes i retning af, at

dæktrykket for 650/65R30.5 var for højt ved den lave og den høje hjullast. Dette udsagn er baseret på en forventning om samme 'udfladning' af dækkene ved hver kombination af hjullast og dæktryk. Tabel 7 viser, at der ved både den lave og den høje hjullast er målt større teoretisk gennemsnitlig stress under 650/65R30.5 end under 800/50R34, mens der er målt de samme værdier ved 60 kN. Rent faktisk er de anbefalede dæktryk, der er taget i anvendelse i undersøgelsen (for begge dæk) usikre. For den høje hjullasts vedkommende tilstræbtes 90 kN og dæktrykket i testet blev fastlagt efter dette niveau. Imidlertid opnåedes kun ca. 83 kN, hvilket for begge dæks vedkommende tilsiger lidt lavere dæktryk, - ca. 185 kPa (NDI, 2006) i forhold til de anvendte 200 kPa. For den lave hjullasts vedkommende fandtes ikke tabellerede værdier for hjullaster under ca. 5 tons fra producentens side (NDI, 2006). I dette tilfælde valgtes dæktryk svarende til 30 kN ud fra et skøn (P.O. Møller Hansen, personlig meddelelse). Noget kunne tyde på, at der for begge dæks vedkommende – og i særlig grad for 650/65R30.5 – er anvendt for høje dæktryk ved 30 og 83 kN.

Tabel 6. Karakteristika ved kontaktarealet hjul-jord og for stressfordeling i kontaktarealet for Michelin Cargoxbib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 dækkene (gennemsnitligt over 3 hjullaster) og for 3 hjullaster (gennemsnitligt over de 2 dæk). Tal mærket med samme bogstav er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$). Kolonnen mærket 'Vekselvirkning' angiver sandsynligheden for vekselvirkning mellem dæktype og hjullast (d.v.s. forskellig trend i hjullastens effekt for de to dæk). Data for hvert af de to dæk findes i Tabel 7.

Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for the 650/65R30.5 and the 800/50R34 tyres (averaged across three wheel loads) and for three wheel loads (averaged across the two tyres). Figures labelled with the same letter are not significantly different ($P=0.05$). The right-hand column gives the probability of interaction between tyre type and wheel load. Data for each individual tyre are found in Table 7.

Parameter	Dæk		Hjullast, kN ¹			Vekselvirkning
	650/65R 30.5	800/50R 34	30	60	83	<i>P</i>
Kontaktareal						
<i>a</i> -parameter, m	0.47 ^a	0.46 ^a	0.44 ^a	0.51 ^b	0.44 ^a	0.129
<i>b</i> -parameter, m	0.35 ^a	0.41 ^b	0.37 ^a	0.39 ^a	0.39 ^a	0.054
<i>n</i> -parameter, -	3.92 ^a	3.13 ^a	3.79 ^a	3.07 ^a	3.71 ^a	0.230
<i>A</i> _{num} , m ²	0.61 ^a	0.67 ^b	0.60 ^a	0.71 ^b	0.61 ^a	0.013
<i>A</i> _{ellip} , m ²	0.60 ^a	0.66 ^b	0.59 ^a	0.69 ^b	0.61 ^a	0.008
Stress						
<i>p</i> _{spids} , kPa	222 ^a	200 ^a	113 ^a	189 ^b	330 ^c	>0.3
<i>p</i> _{maxs} , kPa	167 ^b	148 ^a	84 ^a	143 ^b	244 ^c	0.003
<i>p</i> _{teor} , kPa	94 ^b	87 ^a	52 ^a	85 ^b	136 ^c	0.039
α -parameter, -	2.76 ^a	2.81 ^a	3.39 ^c	2.69 ^b	2.27 ^a	0.023
β -parameter, -	1.94 ^a	1.63 ^a	2.17 ^c	1.67 ^{ab}	1.52 ^a	0.103

¹Nøjagtig hjullast findes i Appendix A

Table 7. Karakteristika for kontaktarealet hjul-jord og stressfordeling i kontaktarealet for hvert af dækkene Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 ved 3 forskellige hjullaster (gennemsnit findes i Tabel 6). Tal mærket med samme bogstav indenfor et givet dæk er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$).

Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for each of the 650/65R30.5 and the 800/50R34 tyres at three wheel loads (averages are found in Table 6). Figures labelled with the same letter within each tyre are not significantly different ($P=0.05$).

Parameter	650/65R30.5			800/50R34		
	Hjullast, kN ¹			Hjullast, kN ¹		
	30	60	83	30	60	83
Kontaktareal						
a -parameter, m	0.44 ^a	0.52 ^b	0.44 ^a	0.45 ^a	0.50 ^b	0.44 ^a
b -parameter, m	0.34 ^a	0.37 ^a	0.34 ^a	0.41 ^a	0.40 ^a	0.43 ^a
n -parameter, -	3.83 ^a	3.19 ^a	4.75 ^a	3.76 ^a	2.95 ^a	2.67 ^a
A_{num} , m ²	0.55 ^a	0.70 ^b	0.59 ^a	0.65 ^a	0.71 ^b	0.64 ^a
A_{ellip} , m ²	0.54 ^a	0.69 ^b	0.57 ^a	0.63 ^a	0.69 ^b	0.65 ^a
Stress						
p_{spids} , kPa	128 ^a	184 ^{ab}	353 ^c	99 ^a	194 ^b	306 ^c
p_{max} , kPa	91 ^a	144 ^b	265 ^c	77 ^a	142 ^b	224 ^c
p_{teor} , kPa	56 ^a	85 ^b	143 ^c	48 ^a	85 ^b	130 ^c
α -parameter, -	3.62 ^c	2.68 ^b	1.97 ^a	3.15 ^a	2.70 ^a	2.58 ^a
β -parameter, -	2.43 ^b	1.56 ^a	1.83 ^{ab}	1.91 ^a	1.79 ^a	1.20 ^a

¹Nøjagtig hjullast findes i Appendix A

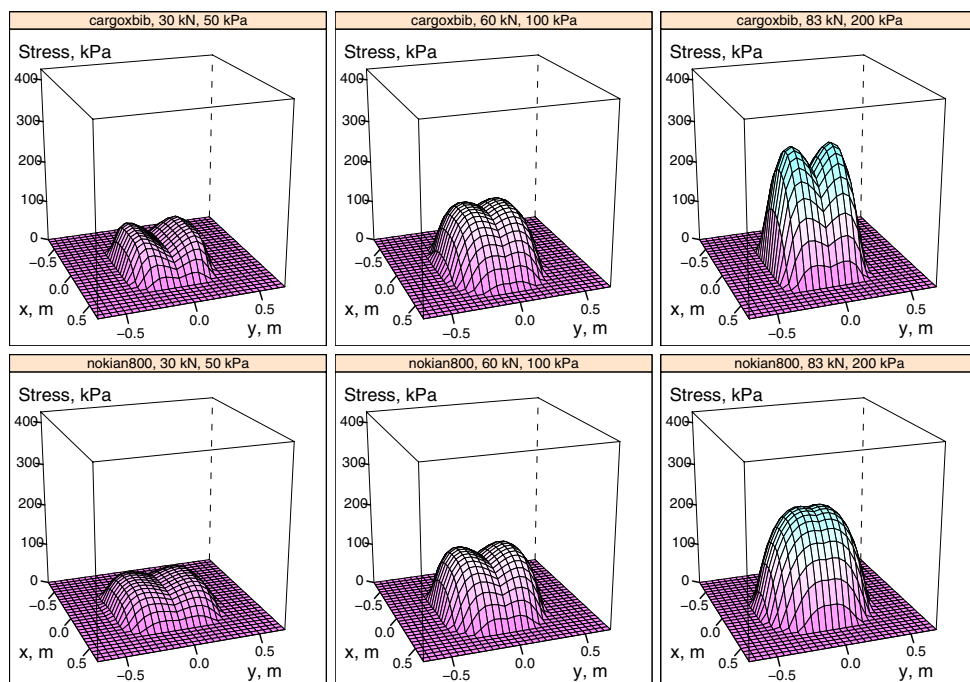
Stressfordeling

Ved konsultation af de relevante figurer i Appendiks D ses igen, at den anvendte model for beskrivelse af stressfordelingen over trædefladen (ligning B2, B2a og B2b i Appendiks B) giver et godt fit til de målte data. For begge dæk fandtes stigende værdier af p_{spids} ved stigende belastning/dæktryk (Tabel 7). For 650/65R30.5 var den gennemsnitlige værdi på tværs af de 3 målegentagelser ved 83 kN så højt som 353 kPa (Tabel 7). Dette er således en bekræftelse af det tidligere fundne (Tabel 4 og 5), at der lokalt opstår stress i trædefladen, der er langt over dæktrykket, - som i dette tilfælde var 200 kPa. Også p_{max} ('plateauet' af stress i Figur 8) var højere end dæktrykket. Og dette max-niveau var signifikant højere for 650/65R30.5 end for 800/50R34 (Tabel 6).

Den bedste stressfordeling i kørselsretningen fandtes for højprofildækket 650/65R30.5 ved 3 tons hjullast. Men lavprofildækket 800/50R34 var bedre til at fordele stress i kørselsretningen ved den høje hjullast (8.5 tons).

Tabel 7 og Figur 8 viser samstemmende, at begge dæk har bibeholdt en to-toppet stressfordeling ved stigende belastning. Som tidligere nævnt er en β -værdi omkring 1.8-2.1 optimal for beskyttelse af jorden. Højprofildækket 650/65R30.5 var nærmest dette optimum ved de to høje hjullaster, mens 800/50R34 med den noget lavere dækprofil havde nær-optimale værdier ved de to laveste belastninger og udviste en β -værdi på kun 1.2 ved den høje

hjulast (Tabel 7). Det sidste er for tæt på en en-top fordeling i relation til optimal fordeling af stresset. Der var stor vekselvirkning mellem dæk og hjullast med hensyn til evnen til at fordele stresset i kørselsretningen. Lavprofildækket havde ret høje α -værdier for alle hjullaster, mens der for højprofildækket 650/65R30.5 var signifikant forskel i α ved variation i hjullast (Tabel 7). Den bedste stressfordeling i køreretningen blev således målt for 650/65R30.5 ved 30 kN belastning og den dårligste for samme dæk ved 83 kN hjullast. De diskuterende forskelle kan anes ved at studere Figur 8, idet stressfordelingen dog er sværere at bedømme visuelt i kørselsretningen end på tværs af dækket.

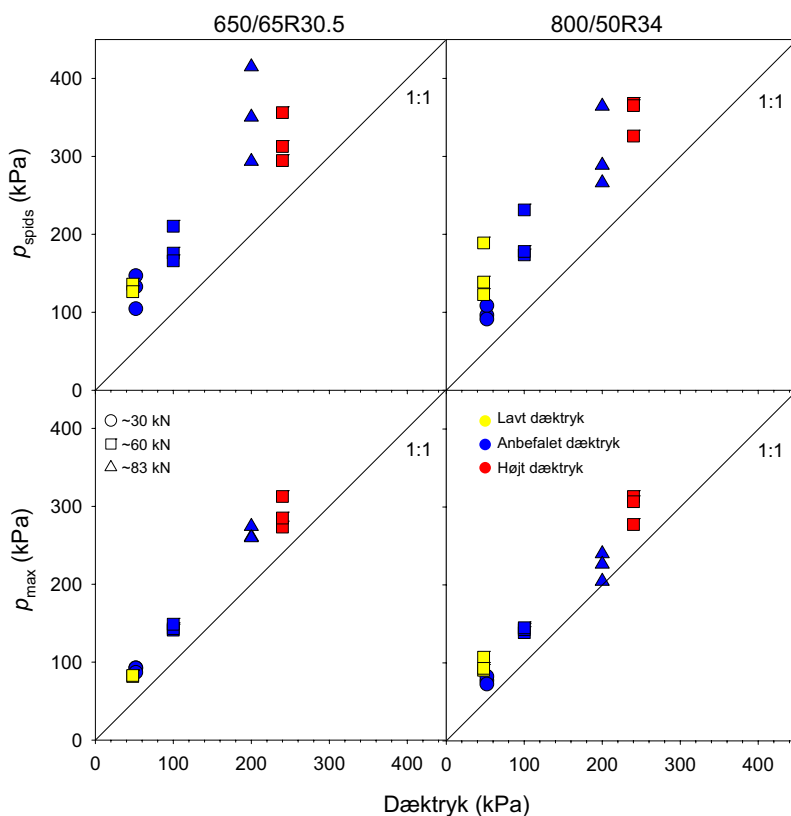


Figur 8. Estimat for stressfordelingen i kontaktfladen for Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 ved 3 forskellige hjullaster. Test blev gennemført ved anbefalede dæktryk, der for 30, 60 og 83 kN for begge dæk var henholdsvis 50, 100 og 200 kPa. Beregninger på grundlag af gennemsnit af model-fit for alle 3 målegentagelser for hver hjullast. I Appendiks D ses den målte og fittede stressfordeling for hvert enkelt test.

Average estimates of the stress distribution in the contact area for the two trailer tyres 650/65R30.5 and 800/50R34 at three different wheel loads but at recommended inflation pressures. Each of the a , b , n , α , and β parameters were averaged across the three replicate tests, and stress distribution created from these values. Appendix D shows measured and fitted stress distributions for each individual test.

Figur 9 viser p_{spids} og p_{max} i relation til dæktryk for alle test med 650/65R30.5 og 800/50R34 dækkene. Figureerne inkluderer både undersøgelserne med 3 forskellige hjullaster ved anbefalet dæktryk (netop diskuteret) og de tidligere omtalte undersøgelser af forskelligt dæktryk ved 60 kN hjullast. Det fremgår, at stress-niveaue generelt højere værdi i forhold til

dæktrykket ikke synes at være påvirket af andet end netop dæktrykket. Dog synes spidsbelastningen under 650/65R30.5 ved 83 kN at være lidt højere end den generelle trend beskrevet med dæktrykket (Figur 9, øverst til venstre), men trenden var ikke statistisk sikker. Omvendt var afvigelsen fra trenden ud fra dæktrykket for p_{max} for 800/50R34 ved 83 kN lidt lavere end for 60 kN hjullast (Figur 9, nederst til højre; $P=0.008$). Alt i alt må konkluderes, at de maksimumkræfter, som jorden oplever ved kørsel med disse dæk stort set bestemmes af dæktrykket alene.



Figur 9. Målt spidsbelastning (p_{spids}) og model-fittet maksimal stress (p_{max}) i trædefladen for alle test med 650/65R30.5 og 800/50R34 dækkene. Figureerne inkluderer således både test af variation i dæktryk omkring det anbefalede og test ved forskellige hjullaster.

Measured peak stress (p_{spids}), and model-fitted maximum stress (p_{max}) in the contact area between tyre and soil for all tests with the two trailer tyres 650/65R30.5 and 800/50R34.

Det er dæktrykket og ikke hjullasten, der bestemmer stress i kontaktfladen hjul / jord.

Effekt af dæktryk og hjullast på stress i jordprofilen

I de to foregående afsnit er diskuteret, hvilke kræfter der virker i trædefladen. Nye svenske undersøgelser har påvist, at der med kendskab til disse kræfter og deres fordeling over fladen

kan laves gode prediktioner af de kræfter (stress), der transmitteres nedad i jordprofilen (Keller & Arvidsson, 2004; Keller, 2005; Keller et al., 2007). Dette gøres med anvendelse af en klassisk model for stress-transmission i jord (Söhne, 1953, 1958). Söhne-modellen er udviklet ud fra en model for stress-transmission i et 'rent' elastisk materiale (Boussinesq, 1885). Kort sagt findes stress i et givet punkt i jorden under hjulet ved at addere kraftkomponenter fra alle delpunkter i trædefladen. Jord er i sagens natur ikke ideelt plastisk. Det har dog vist sig, at modellen med anvendelse af en såkaldt koncentrationsfaktor (Fröhlich, 1934) kan beskrive stressfordelingen under belastet jord med rimelig nøjagtighed (Lamandé et al., 2006b; Lamandé et al., under udarbejdelse). Dog ser det ud til, at man skal være forsigtig med anvendelse af modellen for forholdsvis tør jord, idet stress-transmissionen i sådanne tilfælde (i alt fald for lerholdige jorde) kan foregå mere 'lodret' (Trautner & Arvidsson, 2003; Lamandé et al., under udarbejdelse).

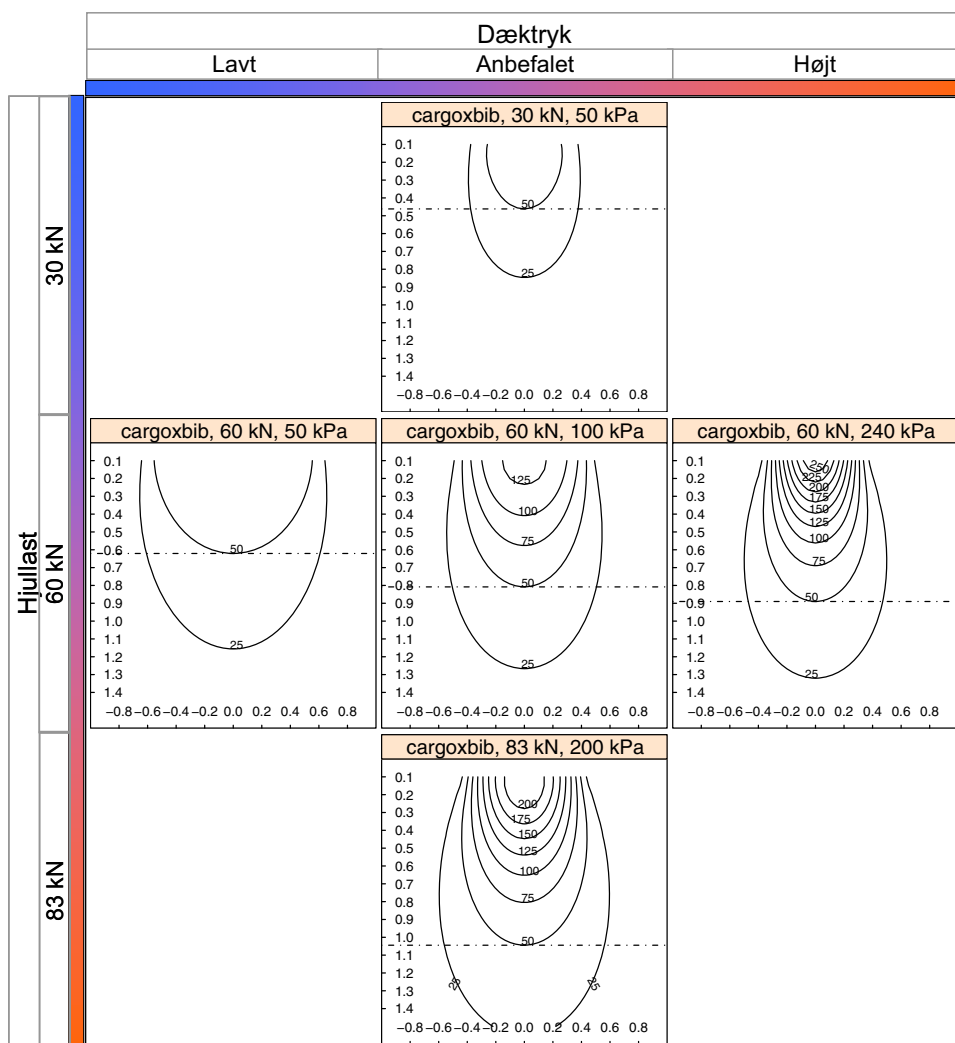
Söhne-modellen er en formel, der kan bruges til at beregne, hvordan stress transmitteres nedad i jorden under hjulet. Man skal kende trædefladearealet og fordeling af stress over trædefladen. Modellen er vist at gælde for fugtig jord, mens man skal være forsigtig med at bruge den på tør jord. Stressfordelingen nedad i jorden vises ofte som såkaldte isobarer (f.eks. Figur 10), der viser områder i jorden med et bestemt stress-niveau.

I denne rapport har vi anvendt en koncentrationsfaktor $\nu=5$ (svarer til våd jord) og brugt stressfordelingen estimeret fra måleprogrammet (Figur 7 og 8) som input til Söhne-modelleringen. Som det fremgår af Figur 1 er det meget vigtigt, at det er denne reelle stressfordeling og ikke den teoretiske gennemsnitlige stress, der bruges ved beregningerne.

Figur 10 og 11 viser stressfordelingen på tværs af dækket lige under akslen for de kombinationer af dæktype, dæktryk og hjullaster, der er diskuteret i det foregående. Testet med 60 kN hjullast ved anbefalet dæktryk fungerer som reference i relation til effekt af både dæktryk og hjullast. Effekten af at regulere dæktrykket kan således studeres ved at kigge på de 3 delfigurer midt i figuren (stigende dæktryk fra venstre mod højre). Og effekten af stigende hjullast ses ved at sammenligne de tre delfigurer over hinanden.

For begge dæk (Figur 10 og 11) fremgår, at stigende dæktryk ved 60 kN markant øger stressniveauet i de øvre jordlag. Dette er helt i tråd med diskussionen i det forrige afsnit. Derimod forudsiger beregningerne, at der ikke er stor effekt af dæktrykket på det stressniveau, der når dybder på ca. 1 meter (se f.eks. 25 kPa isobaren i Figurene). Dette er i overensstemmelse med målinger foretaget af Keller & Arvidsson (2004),- dæktrykket fandtes at påvirke stress i 30 cm dybde men ikke i 50 og 70 cm. Dæktrykket har altså en vis indflydelse på pakningsdybden, men ikke i samme grad som de store forskelle i trædefladen giver udtryk for. Man kan altså ikke dæktrykregulere sig væk fra en stor indflydelse af hjullasten i de dybere jordlag.

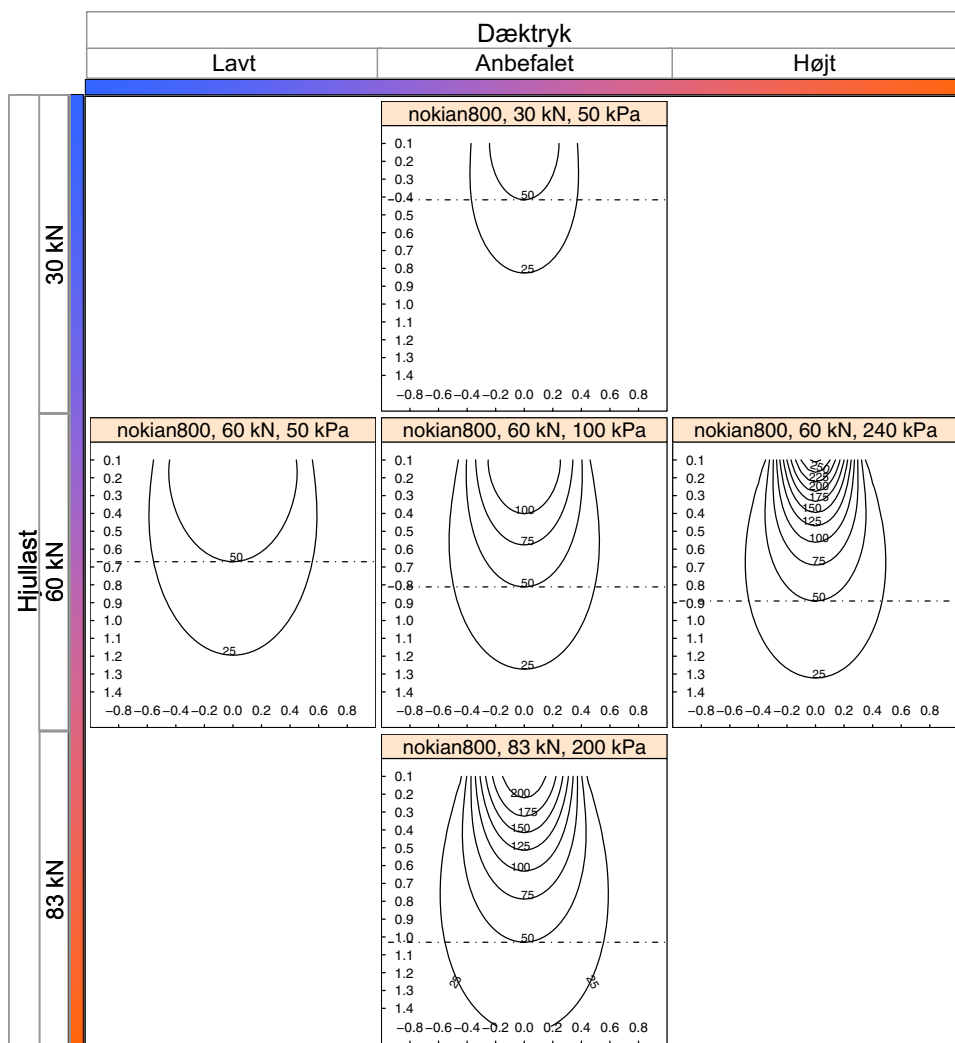
Figur 10 og 11 viser videre, at også hjullasten har markant indflydelse på stressniveauet i de øvre jordlag. Hvis man genkalder sig Figur 9, kan dette reelt udtrykkes som en effekt af dæktrykket, der nødvendigvis var stigende ved stigende hjullast. Ved kørsel med 30 kN med korrekt dæktryk vil end ikke pløjelaget opleve stress over 100 kPa (gælder begge dæk,- se Figur 10 og 11). Ved 60 kN må med anbefalet dæktryk forventes 100 kPa stress til over 30



Figur 10. Stressfordeling i jorden på tværs af dækket under hjulakslen for 650/65R30.5 dækket beregnet med den såkaldte Söhne-formel (koncentrationsfaktor=5). De tre figurer i vandret linie (i midten fra venstre mod højre) viser effekt af dæktryk ved samme hjullast (60 kN). De tre figurer i lodret linie (øverst mod nederst) viser effekt af hjullast ved anbefalet dæktryk. De stiplede linier viser maksimum dybde for 50 kPa isobaren.

Stress distribution in the soil beneath the axle and across the wheel for the 650/65R30.5 tyre as predicted by the Söhne model (concentration factor $v=5$) for three different wheel loads (center three Figures from top to bottom) and for three different inflation pressures at 60 kN wheel load (center three Figures from left to right). The dotted lines indicate maximum depth of the 50 kPa stress isobar.

cm dybde. Og ved 83 kN hjullast oplever jordlagene helt ned til 60-70 cm et stress på over 100 kPa. I en meters dybde kan ifølge modelberegningen forventes et stress på ~20, ~40 og ~55 kPa ved henholdsvis 30, 60 og 83 kN hjullast (Figur 10 og 11).



Figur 11. Stressfordeling i jorden på tværs af dækket under hjulakslen for 800/50R34 dækket beregnet med den såkaldte Söhne-formel (koncentrationsfaktor=5). Se Figur 10 for yderligere forklaring.

Stress distribution in the soil beneath the axle and across the wheel for the 800/50R34 tyre as predicted by the Söhne model (concentration factor $\nu=5$). See Figure 10 for explanation of details.

Söhne-modellen forudsiger, at det er stress i trædefladen (og dermed dæktrykket), der bestemmer stress-niveauet i de øvre jordlag og at det er hjullasten, der bestemmer stress i dybe jordlag. Bemærk dog også effekten af dæktryk på maksimum-dybden af 50 kPa isobaren (Figur 10 og 11). Se endvidere Tabel 11.

Söhne-modellen er over 50 år gammel og der er principielt intet nyt i konklusionen om, at det er dæktrykket, der bestemmer effekten på de øvre jordlag og hjullasten, der bestemmer effekten på underjorden (se f.eks. Olsen, 1994). Tidligere beregninger med modellen har imidlertid måttet basere sig på antagelser om stressfordelingen i trædefladen. De nylige svenske undersøgelser viser klart, at Söhne-modellen først giver realistiske prediktioner i jordprofilen, når der anvendes en målt stressfordeling i trædefladen (Figur 1). Da vores beregninger netop er baseret på målte trædeflader og stressfordelinger over denne, er der grund til at antage, at Figur 10 og 11 giver en god beskrivelse af virkeligheden.

Sammenligning af 5 vogndæk

Undersøgelsen inddrog i alt 5 vogndæk (Tabel 1 og 2). Alle blev testet ved ca. 30 og ca. 60 kN, idet dæktrykket blev justeret til det anbefalede for kørsel i marken (10 km pr. time) ved de respektive belastninger. Dette giver mulighed for en sammenligning af disse ret forskellige dæk (Tabel 8 og 9, Figur 12 og 13).

Tabel 8. Karakteristika for kontaktarealet hjul-jord og stressfordeling i kontaktarealet for 5 vogndæk belastet med ~30 kN (nøjagtige hjullaster findes i Appendix A). Se Tabel 1 for fuld dækbetegnelse. Tal mærket med samme bogstav er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$).

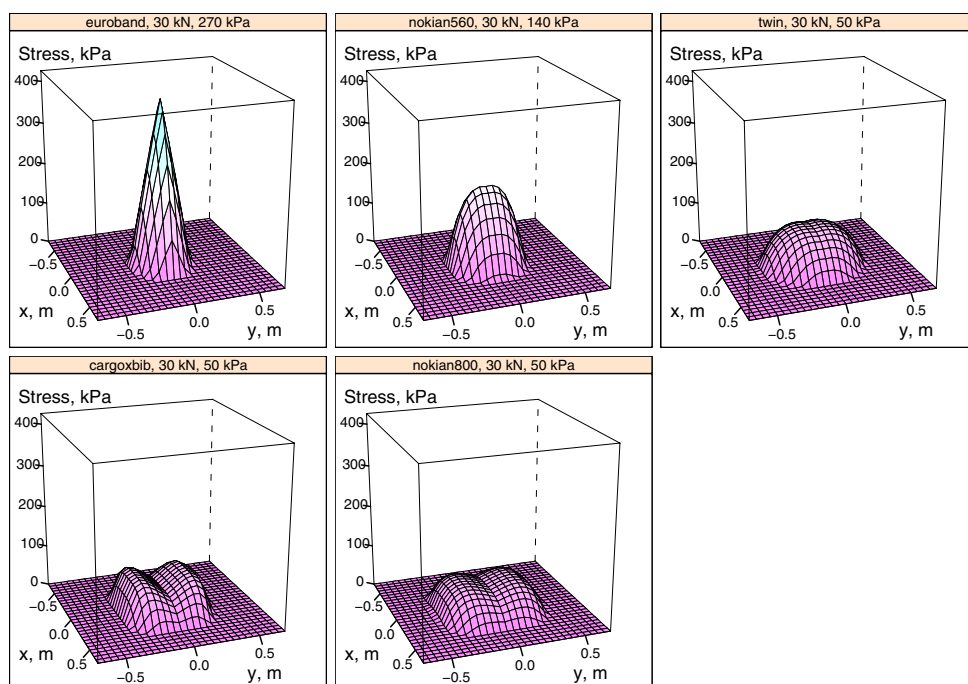
Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for five trailer tyres loaded with ~30 kN wheel load (exact wheel loads are found in Appendix A). Consult Table 1 for dimensions and full names of tyres. Figures labelled with the same letter are not significantly different ($P=0.05$).

Parameter	Dæk				
	385/65R 22.5	560/45R 22.5	700/50- 26.5	650/65R 30.5	800/50R 34
Kontaktareal					
a -parameter, m	0.29 ^a	0.31 ^a	0.40 ^b	0.44 ^c	0.45 ^c
b -parameter, m	0.23 ^a	0.30 ^b	0.40 ^d	0.34 ^c	0.41 ^d
n -parameter, -	2.33 ^a	2.86 ^a	2.15 ^a	3.83 ^a	3.76 ^a
A_{num} , m ²	0.22 ^a	0.33 ^b	0.52 ^c	0.55 ^d	0.65 ^c
A_{ellip} , m ²	0.22 ^a	0.32 ^b	0.52 ^c	0.54 ^c	0.63 ^d
Stress					
p_{spids} , kPa	382 ^c	218 ^b	112 ^a	128 ^a	99 ^a
p_{max} , kPa	330 ^d	181 ^c	95 ^b	91 ^b	77 ^a
p_{teor} , kPa	127 ^d	88 ^c	57 ^b	56 ^b	48 ^a
α -parameter, -	1.58 ^a	1.57 ^a	2.81 ^b	3.62 ^c	3.15 ^{bc}
β -parameter, -	0.13 ^a	1.12 ^b	1.24 ^b	2.43 ^d	1.91 ^c

Kontaktareal

Trædefladen i alle test er vist i Appendix C. I Tabel 8 og 9 er dækkene opstillet i rækkefølge efter stigende overordnet diameter. Det viser sig, at længden af trædefladen i kørselsretningen (kan læses som $2 \times a$ i tabellerne) steg i samme rækkefølge. Dette er udtryk for – som forventet –, at dækdiameteren (og dermed omkredsen) har en helt afgørende betydning for længden af kontaktfladen. Parameteren b , der udtrykker halv bredde af kontaktarealet, er

generelt lidt større end halvdelen af den nominelle dækbredde (Tabel 1). Der er bedst overensstemmelse til dækbredden for Nokian dækkene og Michelin dækket (560/45R22.5, 650/65R30.5 og 800/50R34). Euroband og Trelleborg Twin dækkene er karakteriseret ved en forholdsvis rund 'skulder', hvilket formodentlig er årsagen til, at der her er målt en b værdi noget over det halve af dækbredden. Parameteren n , der udtrykker 'firkantetheden' af trædefladen, var gennemsnitligt for alle dæk omkring 3 ved begge hjullaster, og der var ingen forskel mellem dækkene. Også trædefladearealet steg i samme rækkefølge som dækdiameteren, og der var god overensstemmelse mellem de to estimater (A_{num} og A_{ellip} , Tabel 8 og 9).



Figur 12. Estimat for stressfordelingen i kontaktfladen for de 5 vogndæk ved kørsel med ~30 kN hjullast. Figuren er fremkommet analogt til Figur 7 og 8.

Average estimates of the stress distribution in the contact area for five trailer tyres loaded with ~30 kN. The Figure is constructed as Figures 7 and 8.

Trædefladearealet påvirkes ikke af hjullasten, hvis dæktrykket er reguleret til den anbefalede værdi for den pågældende hjullast.

Euroband, Nokian 560 og Trelleborg Twin dækkene havde hver for sig omtrent samme trædefladeareal ved de to hjullaster. Dette må kunne tages som et udtryk for, at dæktrykket ved de to belastninger har bevirket samme 'udfladning'. I modsætning hertil blev der for Cargoxbib og Nokian 800 dækkene målt større trædefladeareal ved 60 kN end ved 30 kN

(Tabel 8 og 9). Som tidligere diskuteret kan dette tolkes som et for højt dæktryk ved den lave hjullast. Dette kan være tilfældet, idet de anbefalede dæktryk for disse to store dæk netop ikke kunne findes tabelleret for 30 kN hjullast og derfor blev vurderet subjektivt.

Tabel 9. Karakteristika for kontaktarealet hjul-jord og stressfordeling i kontaktarealet for 5 vogndæk belastet med ~60 kN (nøjagtige hjullaster findes i Appendix A). Se Tabel 1 for fuld dækbetegnelse. Tal mærket med samme bogstav er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$).
Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for five trailer tyres loaded with ~60 kN wheel load (exact wheel loads are found in Appendix A). Consult Table 1 for dimensions and full names of tyres. Figures labelled with the same letter are not significantly different ($P=0.05$).

Parameter	Dæk				
	385/65R 22.5	560/45R 22.5	700/50- 26.5	650/65R 30.5	800/50R 34
Kontaktareal					
a -parameter, m	0.32 ^a	0.32 ^a	0.41 ^b	0.52 ^c	0.50 ^c
b -parameter, m	0.22 ^a	0.31 ^b	0.39 ^{cd}	0.37 ^c	0.40 ^d
n -parameter, -	2.86 ^a	2.98 ^a	2.35 ^a	3.19 ^a	2.95 ^a
A_{num} , m ²	0.24 ^a	0.35 ^b	0.51 ^c	0.70 ^d	0.71 ^d
A_{ellip} , m ²	0.24 ^a	0.34 ^b	0.52 ^c	0.69 ^d	0.69 ^d
Stress					
p_{spids} , kPa	735 ^d	398 ^c	268 ^b	184 ^a	194 ^{ab}
p_{max} , kPa	566 ^d	375 ^c	218 ^b	144 ^a	142 ^a
p_{teor} , kPa	235 ^d	163 ^c	115 ^b	85 ^a	85 ^a
α -parameter, -	1.74 ^a	1.59 ^a	1.84 ^a	2.68 ^b	2.70 ^b
β -parameter, -	0.33 ^a	0.89 ^b	1.21 ^{bc}	1.56 ^{cd}	1.79 ^d

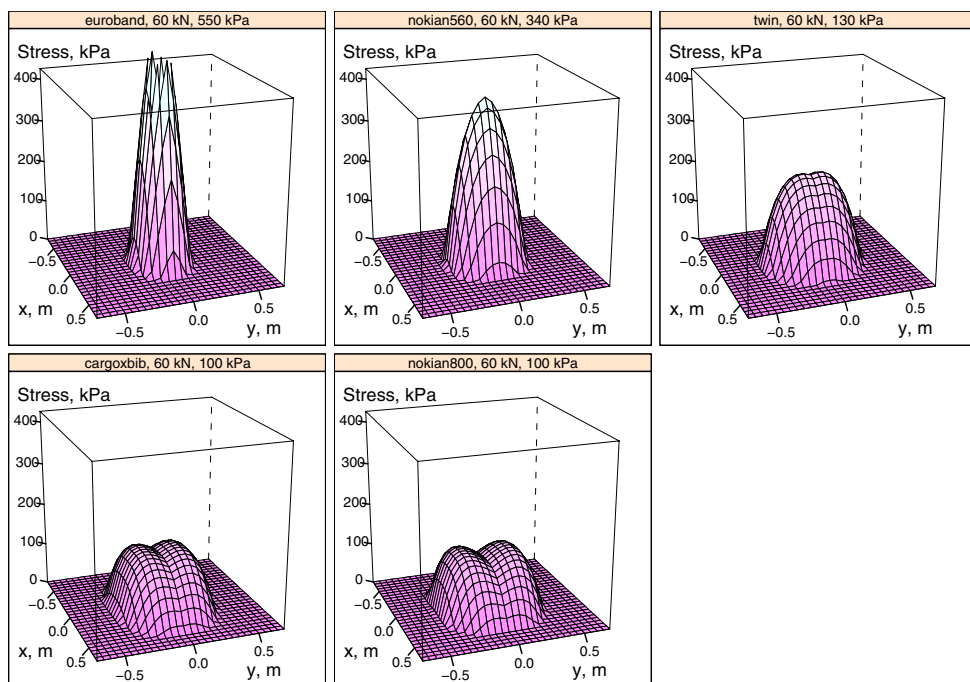
Stressfordeling

Der var markant forskel i stressfordelingen i trædefladen for de 5 dæk (Figur 12 og 13). Det meget høje dæktryk i det smalle lastvogndæk Euroband (385/65R22.5) afspejles i en meget spids stressfordeling ved begge hjullaster. I overensstemmelse hermed estimerede modellen en ekstrem lav β -værdi for dette dæk (Tabel 8 og 9; sammenlign til Figur B2 i Appendix B). Grundet den meget korte trædefladelængde fandtes for dette dæk også en meget dårlig evne til at fordele stress i kørselsretningen (α værdier omkring 1.6-1.7, Tabel 8 og 9). Som gennemsnit af de 3 målegentagelser registrerede vi spidsbelastninger på næsten 400 kPa ved 30 kN hjullast og over 700 kPa ved 60 kN hjullast!

Smalle lastvogndæk giver ekstremt høje spidsbelastninger i trædefladen mellem hjul og jord.

Nokian 560 dækket (560/45R22.5) er et moderne radialdæk men har på grund af sine ret små dimensioner svært ved at give en god stressfordeling (Tabel 8 og 9; Figur 12 og 13). α værdierne var ikke bedre end for Euroband, hvilket er et udtryk for en ret dårlig evne til at fordele stress i kørselsretningen. For begge hjullaster målte vi med dette dæk en β -værdi

omkring 1, hvilket afspejler en parabolisk fordeling, men med en rimelig 'rund' spids af stress i midten af dækket. Spidsbelastningerne var mere moderate end for Euroband dækket men dog stadig meget høje, - ca. 200 henholdsvis 400 kPa ved 30 og 60 kN (Tabel 8 og 9). Mens spidsbelastningen (p_{spids}) er udtryk for enkeltpunkter med 'stokastisk' høje værdier, siger p_{max} (det model-fittede maksimale stress) noget om det generelle niveau af stress i området af trædefladen med størst belastning (se Figur 12 og 13). For Nokian 560 dækket fittede vi p_{max} værdier på 181 og 375 kPa ved den lave henholdsvis den høje hjullast (Tabel 8 og 9).



Figur 13. Estimat for stressfordelingen i kontaktfladen for de 5 vogndæk ved kørsel med ~60 kN hjullast. Figuren er fremkommet analogt til Figur 7 og 8.

Average estimates of the stress distribution in the contact area for five trailer tyres loaded with ~60 kN. The Figure is constructed as Figures 7 and 8.

Trelleborg Twin dækket omtales ofte som et 'hybrid'-dæk mellem et gammeldags diagonal- og et egentligt radialdæk. Vores test tyder på, at det faktisk har en ganske god evne til at fordele stress over trædefladen (Figur 12 og 13, Tabel 8 og 9). Det udviste en ganske svag to-top fordeling ved begge belastninger (β lidt over 1.2; se også Figur 12 og 13). Udfladningen og dermed stressfordelingen i kørselsretningen var god ved 30 kN belastning ($\alpha \sim 2.8$) men ringere ved den høje hjullast. I overensstemmelse hermed var spidsbelastningen på niveau med de to store dæk (650/65R30.5 og 800/50R34) ved 30 kN men noget højere ved 60 kN (Tabel 8 og 9). Det i forhold til de større dæk gode resultat ved den lave belastning skal

dog ses i lyset af, at de store dæk øjensynligt burde have haft et lidt lavere dæktryk ved 30 kN (jf. diskussionen under afsnittet om kontaktareal).

De to store dæk (650/65R30.5 og 800/50R34) er diskuteret grundigt i de foregående afsnit og er alene medtaget i de aktuelle figurer og tabeller for at give et sammenligningsgrundlag til de mindre dæk. Der er ingen tvivl om, at disse dæk er bedre rustet end især de to mindste dæk til at fordele stress i trædefladen. Igen kan fremhæves den meget store fleksibilitet i højprofildækket 650/65R30.5, som afspejles især i en god stressfordeling i kørselsretningen (Tabel 8 og 9). Samtidig kan der dog være grund til at fremhæve, at selv disse dæk giver anledning til spidsbelastninger på 100-130 kPa ved 30 kN og 180-200 kPa ved 60 kN hjullast.

Tabel 10. Karakteristika for kontaktarealet hjul-jord og stressfordeling i kontaktarealet for 2 traktordæk (650/60R38 og 650/75R38) belastet med ~30 eller ~60 kN (nøjagtige hjullaster findes i Appendix A). Se Tabel 1 for fuld dækbetegnelse. Det tidligere beskrevne vogndæk 800/50R34 er medtaget som reference. Tal mærket med samme bogstav indenfor samme hjullast er ikke signifikant forskellige ($P=0.05$).

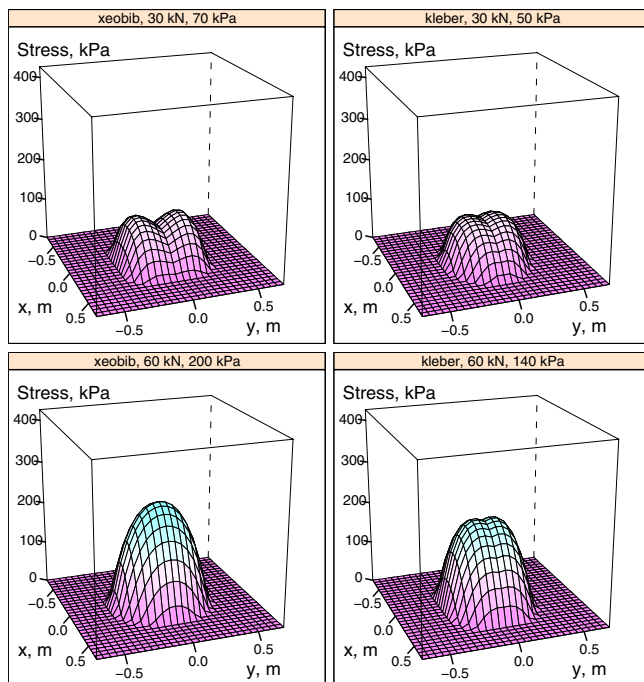
Characteristics of the tyre-soil contact area and the stress distribution for two tractor tyres loaded with either ~30 kN or ~60 kN wheel load (exact wheel loads are found in Appendix A). Consult Table 1 for dimensions and full names of tyres. The trailer tyre 800/50R34 is included as a reference. Figures labelled with the same letter are not significantly different ($P=0.05$).

Parameter	30 kN			60 kN		
	Vogndæk	Traktordæk		Vogndæk	Traktordæk	
	800/50R 34	650/60R 38	650/75R 38	800/50R 34	650/60R 38	650/75R 38
Kontaktareal						
a -parameter, m	0.45 ^b	0.37 ^a	0.43 ^b	0.50 ^c	0.38 ^a	0.45 ^b
b -parameter, m	0.41 ^b	0.33 ^a	0.33 ^a	0.40 ^b	0.38 ^{ab}	0.34 ^a
n -parameter, -	3.76 ^a	4.63 ^a	2.15 ^a	2.95 ^a	2.51 ^a	3.01 ^a
A_{num} , m ²	0.65 ^b	0.47 ^a	0.46 ^a	0.71 ^c	0.48 ^a	0.55 ^b
A_{ellip} , m ²	0.63 ^b	0.47 ^a	0.46 ^a	0.69 ^c	0.48 ^a	0.54 ^b
Stress						
p_{spids} , kPa	99 ^a	171 ^b	191 ^b	194 ^a	374 ^c	312 ^b
p_{max} , kPa	77 ^a	117 ^b	115 ^b	142 ^a	254 ^c	207 ^b
p_{teor} , kPa	48 ^a	65 ^b	69 ^c	85 ^a	126 ^c	111 ^b
α -parameter, -	3.15 ^b	2.23 ^a	2.52 ^a	2.70 ^b	1.89 ^a	2.05 ^a
β -parameter, -	1.91 ^a	2.00 ^a	1.53 ^a	1.79 ^a	1.00 ^a	1.26 ^a

Sammenligning af 2 traktordæk

I undersøgelsen indgik også 2 traktordæk (Tabel 1 og 2). Også disse blev testet ved ca. 30 og ca. 60 kN, idet dæktrykket blev justeret til det anbefalede for kørsel i marken (10 km pr. time) ved de respektive belastninger. På grund af ribberne på disse dæk valgte vi at øge fræsedybden. Vi ønskede dermed at undgå specielt høje stressværdier fra ribberne og også her snarere sikre et billede af det 'gennemsnitlige' stress i trædefladen. Det vil sige, at vi her lavede en findeling af de øverste ca. 12 cm jord (svarende til 14-15 cm løs jord efter fræsning, hvilket var det maksimale, vi kunne opnå med den tilgængelige fræser). Vi kan ikke

udelukke, at dette har påvirket målingerne i forhold til de øvrige dæk. Ofte antages den vertikale stress dog at blive overført stort set uændret i bearbejdet jord (Olsen, 1994) og nye målinger i pløjet jord tyder på, at dette er korrekt (Lamandé et al., under udarbejdelse). Resultaterne af målingerne på de to traktordæk findes i figur 14 og Tabel 10.



Figur 14. Estimat for stressfordelingen i kontaktfladen for de 2 traktordæk ved kørsel med ~30 (øverst) eller ~60 kN hjullast (nederst). Figuren er fremkommet analogt til Figur 7 og 8. *Average estimates of the stress distribution in the contact area for two tractor tyres loaded with either ~30 (top) or ~60 kN (bottom). The Figure is constructed as Figures 7 and 8.*

Kontaktareal

De to traktordæk har samme bredde, mens 650/75R38 dækket har en højere sektionshøjde og dermed en højere profilprocent (Tabel 1). Som forventet registrerede vi da heller ikke nogen forskel på b -værdien (halv trædefladebredde, Tabel 10). Til gengæld var trædefladelængden ved begge hjullaster større for dækket med det højeste profil. Det betød, at trædefladearealet var størst for 650/75R38, dog kun ved den høje hjullast. At vi kunne måle en signifikant større trædefladelængde og samme trædefladebredde uden at få øget trædefladeareal ved 30 kN må hænge sammen med trædefladens form. Selv om der ikke var signifikant forskel på 'firkantetheden' (n -værdien) for den fittede superellipse, har værdien på $n=4.63$ for 650/60R38 tydeligvis givet så meget større areal, at det matcher den mere runde superellipse ($n=2.15$) for 650/75R38 (Tabel 10).

Stressfordeling

Ud fra Figur 14 ser det umiddelbart ud til, at de to traktordæk har fordelt stresset i trædefladen ret ens. Ved 30 kN havde begge dæk en U-fordeling af stress på tværs af dækket. Faktisk havde 650/60R38 en β værdi lige i det optimale område omkring $\beta=2$ (Tabel 10). Ved den store hjullast blev stressfordelingen mere parabolisk og β værdien var for begge dæk 1 eller lidt derover. Der var således ikke signifikant forskel på de to dæk ved nogen af de to hjullaster forsåvidt angår formparametrene α og β (Tabel 10). Spidsbelastningen var størst for 650/60R38 ved begge hjullaster, - dog signifikant kun ved høj belastning. Ved 60 kN var også det model-fittede stress-plateau (p_{max}) signifikant højest for dette dæk.

Sammenligning mellem traktor- og vogndæk

Det kan være relevant at sammenligne de to traktordæk til vogndækkene. Vi har indsat værdierne for det største af disse (800/50R34) i Tabel 10. Dette dæk har en totaldiameter, der er kun ca. 8 cm mindre end 650/60R38 og ca. 33 cm mindre end 650/75R38 (Tabel 1). Til gengæld er det ca. 15 cm bredere end traktordækkene. Sidstnævnte er formodentlig årsagen til, at vogndækket havde signifikant større trædeflade end begge traktordæk (Tabel 10). De målte spidsbelastninger var signifikant lavere for vogndækket end for traktordækkene, hvilket sandsynligvis bl.a. er påvirket af ribberne på traktordækkene. Forskellen var markant, - faktisk næsten dobbelt så store spidsbelastninger for traktordækkene.

Der var ikke stor forskel på de to undersøgte traktordæk, som til gengæld var mere stive end vogndækkene. Det hænger sandsynligvis til dels sammen med, at det anbefalede dæktryk for trækkende dæk er højere end for vogndæk.

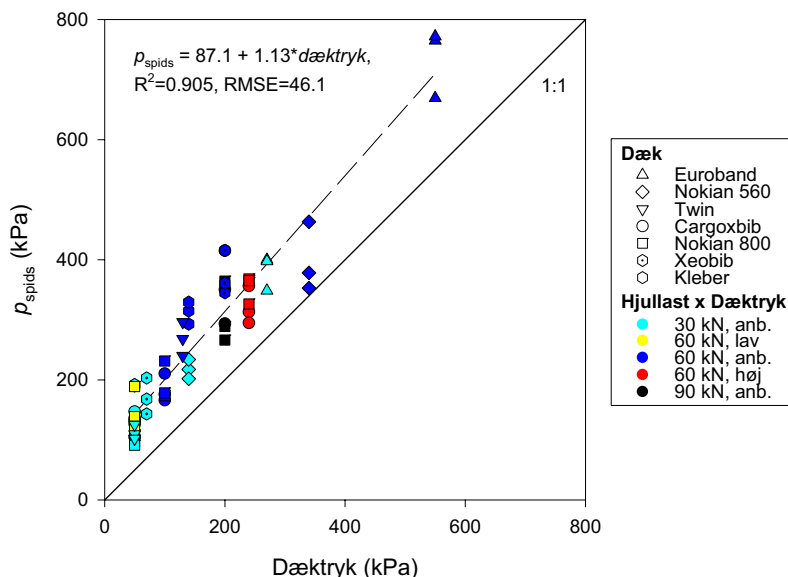
Det er bemærkelsesværdigt med en signifikant lavere α værdi for traktordækkene på trods af den større totaldiameter. Det stemmer overens med signifikant mindre trædefladelængde (a værdien, Tabel 10). Traktordækkene forekommer at være stivere og i mindre grad end vogndækket i stand til at flade ud under belastning. Og dette hænger videre formodentlig sammen med dels de stive ribber og dels andre ETRTO kriterier for anbefalet dæktryk for trækkende dæk i forhold til vogndæk.

Stress i trædefladen i relation til dæktryk

På grundlag af sammenligningerne af forskelligt dæktryk ved 60 kN hjullast for de to dæk Michelin Cargo x bib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 fandt vi, at både p_{spids} og p_{max} var højere end dæktrykket (Figur 5). Figur 15 viser tilsvarende spidsbelastningen i trædefladen for samtlige test i undersøgelsen, ligeledes i relation til dæktrykket. Det fremgår, at trenden fra de to vogndæk holder for samtlige dæk. Ikke i et eneste test blev der målt spidsbelastning lig med eller under dæktrykket. En lineær regression viste, at spidsbelastningen kunne relateres til dæktrykket med ligningen

$$p_{spids} = 87.1 + 1.13 \times \text{dæktryk}, \quad R^2 = 0.905, \quad RMSE = 46.1, \quad (1)$$

hvor både p_{spids} og dæktryk er i kPa. Det betyder, at man generelt må forvente, at spidsbelastningen under et dæk er ca. 100 kPa (1 bar) over dæktrykket. Lidt mere nuanceret kan siges, at der ved lave dæktryk (~50 kPa) findes stressstoppe på ca. 90 kPa over dæktrykket, mens der for dæktryk på 200-300 kPa må forventes stress-toppe i trædefladen på 110-125 kPa over dæktrykket. RMSE=46.1 (ligning 1) betyder – i overensstemmelse med indtrykket fra Figur 15 – at der er ret stor variation i denne spidsbelastning.



Figur 15. Målt spidsbelastning (p_{spids}) i trædefladen i relation til dæktryk for samtlige test i marken.

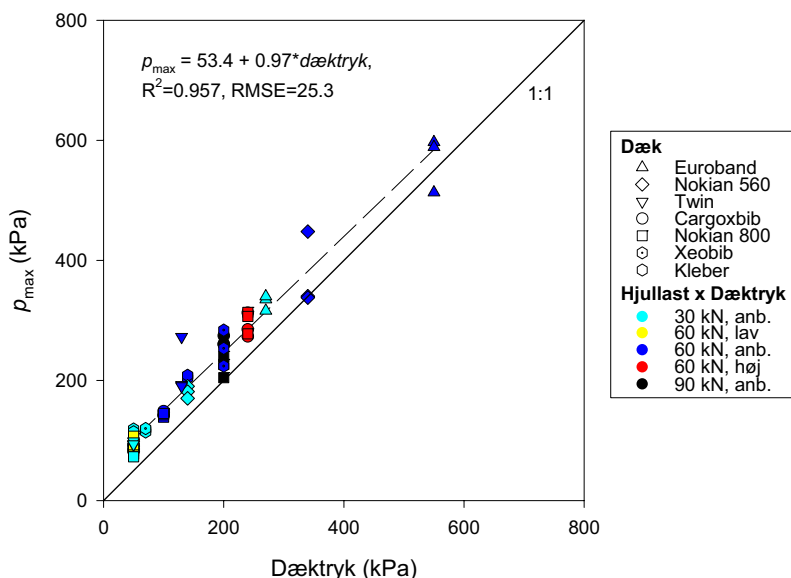
Measured peak stress (p_{spids}) in the contact area related to tyre inflation pressure for all tests performed (all tyres and all replicate tests).

Modellen i Appendiks B finder ud fra de målte stressværdier et niveau af maksimal stress (p_{max}). Som tidligere set (Figur 5 og adskillige tabeller) er p_{max} lidt lavere end de egentlige stress-toppe. En regression af p_{max} mod dæktrykket for samtlige test gav følgende sammenhæng (se også Figur 16)

$$p_{max} = 53.4 + 0.97 \times dæktryk, \quad R^2 = 0.957, \quad RMSE = 25.3, \quad (2)$$

hvor igen både p_{max} og dæktrykket er i kPa. For eet eneste test fandt vi lavere p_{max} end dæktrykket (Figur 16). Resultaterne betyder, at der generelt må forventes et maksimalt stressniveau på ca. 50 kPa (0.5 bar) over dæktrykket. Koefficienten til dæktrykket er meget tæt på een, hvorfor denne tommelfingerregel vil være gældende i hele spektret af dæktryk.

På grund af det generelt dårlige kendskab til stressfordelingen i trædefladen mellem hjul og jord har der været nogen diskussion i litteraturen om, hvordan man bedst forudsiger stress i trædefladen i relation til dæktryk. På grundlag af en forventet – men dårligt kvantificeret –



Figur 16. Predikeret maksimal stress ($p_{\max}$) i trædefladen i relation til dæktryk for samtlige test i marken.

Predicted maximum stress ($p_{\max}$) in the contact area related to tyre inflation pressure for all tests performed (all tyres and all replicate tests).

afvigelse fra en jævn fordeling af stress i trædefladen er p_{teor} (hjullast divideret med trædefladeareal) foreslået multipliceret med en faktor for at få et mere realistisk bud på kræfterne i trædefladen (Koolen & Kuipers (1983): faktor=1.2; Rusanov (1994): faktor=1.5). Figur 17 viser, at der ganske vist er en fin, lineær korrelation mellem både p_{spids} og $p_{\max}$ på den ene side og p_{teor} på den anden. Det fremgår, at faktoren på 1.5 måske er et rimeligt bud, hvis man ønsker at estimere $p_{\max}$ ved lave stressniveauer. For højere stressniveauer vil både $p_{\max}$ og især p_{spids} blive undervurderet.

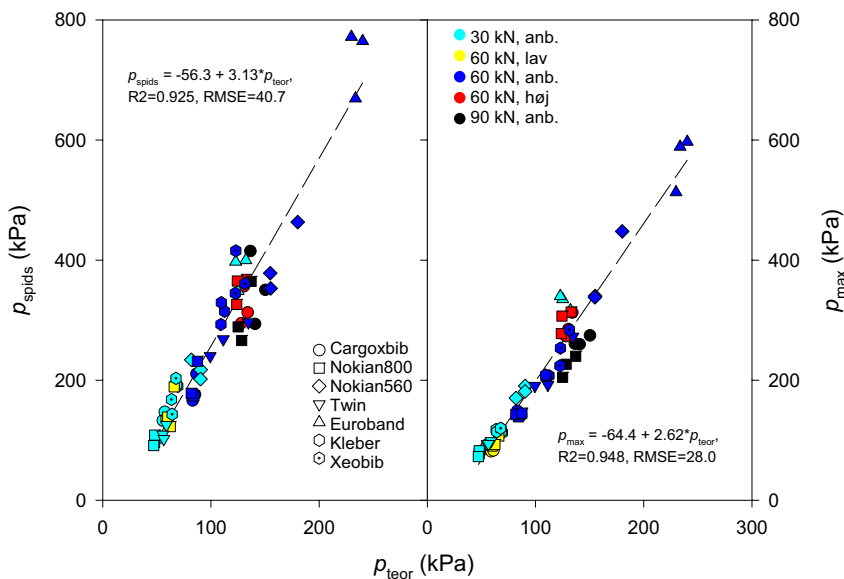
Ud fra datamaterialet i denne undersøgelse forekommer Van den Akker's forslag om at addere 50 kPa til dæktrykket (van den Akker, 1992) som den bedste måde at nå frem til et bud på niveauet af maksimal stress i trædefladen (Figur 16).

Tommelfingerregel: Stress i trædefladen under hjulet er 0.5 bar højere end dæktrykket.

Endelig kan det være relevant at vurdere, om der er nogen korrelation mellem dæktryk og p_{teor} . Af Figur 18 fremgår, at dæktrykket har en markant indflydelse, der kan beskrives som følger

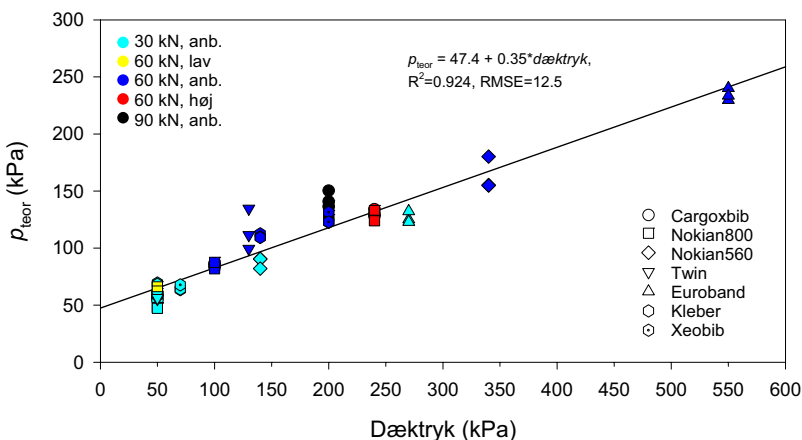
$$p_{\text{teor}} = 47.4 + 0.35 \times \text{dæktryk}, \quad R^2 = 0.924, \quad RMSE = 12.5, \quad (3)$$

hvor p_{teor} og dæktryk er i kPa. Det bør bemærkes, at der er signifikante afvigelser fra den gennemsnitlige regressionsmodel, - forårsaget af både dæktype og hjullast. Relationen i ligning 3 kan derfor kun bruges som en helt overordnet rettesnor.



Figur 17. Målt spidsbelastning (p_{spids} , venstre) samt model-fittet maksimal stress (p_{max} , højre) i trædefladen i relation til det teoretiske gennemsnitlige stress (p_{teor} , hjullast divideret med trædefladeareal).

Measured peak stress (p_{spids} ; left) and predicted maximum stress (p_{max} ; right) in the contact area as related to the average ground pressure for all tests performed.



Figur 18. Relation mellem dæktryk og teoretisk gennemsnitlig stress (p_{teor} , hjullast divideret med trædefladearealet) i trædefladen. Det bør bemærkes, at der er signifikante afvigelser fra den generelle regressionslinie forårsaget af både dæktype og hjullast.

Average ground pressure (p_{teor}) related to tyre inflation pressure for all tests performed. It should be noted that tyre type as well as wheel load had significant influence on the general trend found by the regression.

Perspektivering af resultater

Stress i trædefladen og transmission i jordprofilen

Bedste bud på stress i forskellige dybder

Allerede i resultatafsnittet har vi kigget på den sandsynlige fordeling af stress ned gennem jordprofilen, når jorden overkøres af dæk med forskelligt dæktryk og med forskellig hjullast (Figur 10 og 11). Vi benyttede den såkaldte Söhne model (Söhne, 1953, 1958) med en koncentrationsfaktor på 5 (svarende til fugtig jord) og med de målte trædeflader og stressfordelinger som input til modellen. I Appendiks E er vist tilsvarende beregninger for de øvrige test i denne undersøgelse.

Tabel 11 viser gennemsnitstal for hver af de 20 kombinationer af dæktype, hjullast og dæktryk med hensyn til p_{max} (fittet fra målte data med modellen beskrevet i Appendiks B) samt Söhne-predikeret stress i 20 og 100 cm dybde. Som tidligere nævnt kan der fæstes lid til Söhne-modellens prediktioner, idet nylige undersøgelser har vist dels, at modellen kvalitativt beskriver stresstransmissionen i fugtig jord tilfredsstillende (f.eks. Lamandé et al., 2006b) og dels, at der opnås kvantitativt gode fit til målte værdier af stress i jordprofilen, hvis der anvendes den reelle stressfordeling i trædefladen som input (f.eks. Keller & Arvidsson, 2004).

Tallene i Tabel 11 viser for det første den tidligere fundne korrelation mellem dæktrykket og p_{max} ; i overensstemmelse med ligning (2) er der typisk registreret et maksimalt trædefladestress ca. 50 kPa over dæktrykket (Tabel 11). Videre ses, at der er en god overensstemmelse mellem p_{max} og predikeret stress i 20 cm dybde. Omvendt ses lige så tydeligt, at det predikterede stress i 100 cm dybde nøje afspejler hjullast-niveauet. For 30, 60 og 83 kN hjullast ligger prediktionerne på henholdsvis 19-21, 30-42 og 52-54 kPa. Altså klart 3 forskellige stress-niveauer, der ganske fint afspejler forholdet mellem de 3 hjullaster. Det vil sige, at de tidligere diskutererede resultater fra testene med Michelin Cargobib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 ved 3 hjullaster bekræftes af testene for alle de øvrige dæk.

Samtidig er det bemærkelsesværdigt, at Söhne-predikeret stress i 100 cm dybde for 60 kN hjullast også afspejler p_{max} (eller dæktrykket om man vil) (Tabel 11). Indenfor den registrerede skala fra 31-44 kPa ligger de små dæk Nokian 560 og især Euroband højt, hvilket modsvares af de høje dæktryk for disse dæk. Bemærk også hvorledes prediktionerne for Cargobib og Nokian 800 dækkene stemmer nøje overens; således for begge dæk ca. 31, 37 og 41 kPa for dæktryk henholdsvis 50, 100 og 240 kPa (Tabel 11). Man skal i denne sammenhæng huske, at input til Söhne-modelleringerne var helt uafhængige data. En variansanalyse for hver af disse to dæk ved ~60 kN hjullast viste, at dæktryk-effekten var stærkt signifikant (Tabel 11). Resultaterne er derfor et stærkt udtryk for, at dæktrykket faktisk har indflydelse på stress i jorden helt ned til 1 meters dybde. Olsen (1994) vurderede på grundlag af teoretiske analyser af Söhne-modellen, at stress under 1 meters dybde kun vil være bestemt af hjullasten. Vores resultater indikerer, at grænsen skal sættes dybere.

Opsummerende kan anføres, at det er stresset i trædefladen, der bestemmer stress i de øvre jordlag (her eksemplificeret ved 20 cm). Og da der er en god korrelation mellem p_{max} og dæktrykket (Figur 16 og ligning 2) kan konkluderes, at stresset i de øvre jordlag bestemmes af dæktrykket. Stress i dybe jordlag (eksemplificeret ved 100 cm i Tabel 11) bestemmes

omvendt primært af hjullasten. Det betyder, at det principielt ikke er muligt at dæk-udruste sig ud af problemet med de meget store hjullaster. En stor trædeflade (et stort hjul) er – for samme hjullast – afgørende for stress i de øvre jordlag men påvirker ikke væsentligt stress i en meters dybde. Med identisk trædeflade (samme hjul) vil en dobbelt så stor hjullast give dobbelt så stor stress i store dybder (som også pointeret af Koolen & Kuipers, 1983). Vores resultater viser dog, at begrundelsen for anvendelse af brede lavtryksdæk ligger både (især) i mindske af stress i overjorden men også til en vis grad i underjorden.

Tabel 11. Maksimal stress i trædefladen, p_{max} , samt Söhne-predikeret stress i 20 og 100 cm dybde for alle 20 kombinationer af hjullast, dæktype og dæktryk. Både p_{max} og de to Söhne-prediktioner af stress er gennemsnit af beregninger for de individuelle test i marken. Det vil sige, at der er foretaget Söhne-modellering med input af stressfordeling (beskrevet ved a , b , n , α , β og hjullast) for alle individuelle test. For Michelin CargoXbib 650/65R30.5 og Nokian 800/50R34 dækkene ved ~60 kN hjullast blev der foretaget variansanalyse af dæktrykkets effekt på stress i 100 cm. Tal indenfor hvert af disse dæk markeret med samme bogstav er ikke signifikant forskellige ($P=0.01$).

The model-fitted maximum stress in the tyre-soil contact area, p_{max} , and the Söhne-predicted stress in 20 and 100 cm depth for all 20 combinations of wheel load, tyre type, and tyre inflation pressure. The figures are arithmetic averages of individual predictions from each replicate test in the field. For the 60 kN wheel load, analyses of variance for the two tyres 650/65R30.5 and Nokian 800/50R34 estimated the tyre inflation pressure effect on the stress estimate at 100 cm depth. Figures labeled with the same letter within each of these tyres are not significantly different ($P<0.01$).

Dæk	Hjullast	Dæktryk	p_{max}	Stress, 20 cm dybde (Söhne)	Stress, 100 cm dybde (Söhne)
	kN	kPa		kPa	
Euroband SA 385/65R22.5	30	270	330	208	21
Nokian ELS Radial 560/45R22.5	30	140	181	142	20
Trelleborg TWIN 700/50-26.5	30	50	95	87	19
Mich. CargoXbib 650/65R30.5	30	50	91	66	19
Nokian ELS Radial 800/50R34	30	50	77	64	19
Michelin XEOBIB 650/60R38	30	70	117	92	21
Kleber Topker 650/75R38	30	50	115	101	21
Euroband SA 385/65R22.5	60	550	566	377	42
Nokian ELS Radial 560/45R22.5	60	340	375	282	41
Trelleborg TWIN 700/50-26.5	60	130	218	187	38
Mich. CargoXbib 650/65R30.5	60	50	107	69	30 ^a
Mich. CargoXbib 650/65R30.5	60	100	144	129	36 ^b
Mich. CargoXbib 650/65R30.5	60	240	290	235	41 ^c
Nokian ELS Radial 800/50R34	60	50	97	70	32 ^a
Nokian ELS Radial 800/50R34	60	100	142	123	37 ^b
Nokian ELS Radial 800/50R34	60	240	299	238	41 ^c
Michelin XEOBIB 650/60R38	60	200	254	212	40
Kleber Topker 650/75R38	60	140	207	184	40
Mich. CargoXbib 650/65R30.5	83	200	265	219	54
Nokian ELS Radial 800/50R34	83	200	224	205	52

Hvilke stressniveauer er kritiske?

En jord vil kun deformeres plastisk (dvs ikke-elastisk og dermed blivende), hvis den udsættes for et stress, der er større end dens styrke. Hvor stor er da en jords styrke? Svaret på det spørgsmål er uhyre kompliceret og skal her kun diskuteres overfladisk. Geotekniske undersøgelser i forbindelse med fundering af huse mm opererer med en såkaldt førkomprimeringsstyrke. Filosofien er, at denne styrke afspejler det højeste stress, jorden hidtil har været udsat for. En del undersøgelser har vist, at en jord vil udvise elastisk deformation (dvs den fjedrer tilbage efter aflastning) så længe stresset er mindre end førkomprimeringsstyrken. Og tilsvarende, at deformationen ved belastninger over førkomprimeringsstyrken er plastisk, - det vil sige irreversibel. Teoretisk vil det derfor være uproblematisk at belaste en jord op til dens førkomprimeringsstyrke.

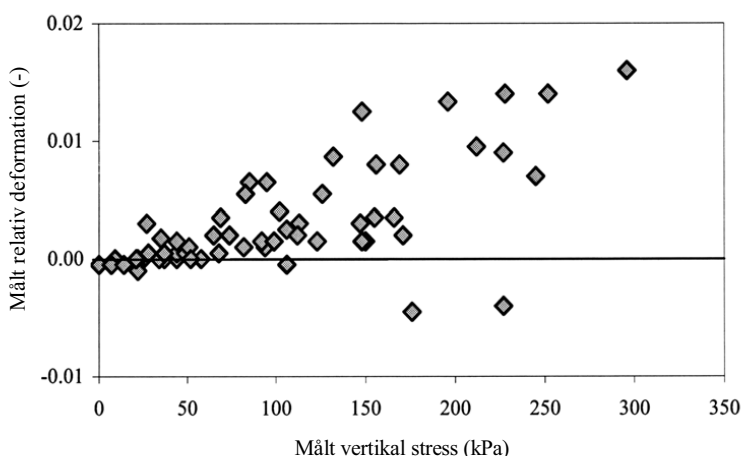
Målinger af førkomprimeringsstyrken er tidskrævende og iøvrigt ikke fuldstændig standardiseret. Nogle forskere har adopteret de klassiske geotekniske metoder, herunder med en ganske lang tids trykpåvirkning forud for aflæsning af deformation. Andre argumenterer for, at der bør testes med tidsintervaller, der i højere grad afspejler de tidsrum, jorden i marken vil være udsat for stress. Der er jo ganske stor forskel på de tidsrum, der er relevante ved fundering af en storebæltsbro og ved vurdering af skader i forbindelse med overkørsel af en traktor i marken! Videre anvendes sjældent samme prøvestørrelse, hvilket også er påvist at påvirke måleresultatet (f.eks. Keller et al., 2004). Selve beregningen af førkomprimeringsstyrken skal foretages på grundlag af en kurve, der relaterer tildelt stress og målt deformation. Det har vist sig, at denne bestemmelse kan være behæftet med stor usikkerhed (Keller, 2004; Keller et al., 2004). Undersøgelser har endvidere vist, at førkomprimeringsstyrken bestemt som her beskrevet er dårlig til at beskrive, hvorvidt der rent faktisk sker pakning af en jord, når den udsættes for en given belastning i felten (Trautner, 2003; Arvidsson & Keller, 2004).

Jorden pakkes kun, hvis dens styrke er svagere end det stress, den udsættes for. En tør jord er stærkere end en våd jord. Desværre har vi kun ringe kendskab til jordens styrke. Der arbejdes på at finde metoder til at beregne styrken ud fra andre jordegenskaber. Beregningsmetoderne er endnu alt for usikre.

En jords styrke (udtrykt f.eks. ved førkomprimeringsstyrke) øges med faldende vandindhold. I almene termer svarer dette til, at en tør jord intuitivt er mekanisk stærkere end en våd jord. Det betyder, at en god vejledning for færdsel på landbrugsjord kræver kendskab til førkomprimeringsstyrken ved flere vandindhold. Da den pågældende jordegenskab – som nævnt – er vanskelig (dyr) at måle, har især tyske forskere forsøgt at udarbejde såkaldte pedo-transfer funktioner (f.eks. Lebert, 1989; Lebert & Horn, 1991; Nissen, 1999; Fleige et al., 2002). En pedo-transfer funktion er simpelthen en ligning, der forudsiger værdien af een jordegenskab ud fra andre jordegenskaber. Fidusen er så, at man prøver at sætte den svært målelige egenskab i relation til egenskaber som f.eks. teksturen, der er målt for næsten alle jorde. Problemet med denne øvelse er, at de udarbejdede ligninger har en meget ringe forklaringsgrad. Schäfer-Landefeld & Brandhuber (2001) analyserede de forskellige funktioner udarbejdet i Tyskland og fandt, at selv den bedste prediktionsligning havde en R^2 -værdi på kun ca. 0.09. Med så lave forklaringsgrader er en prediktionsligning ikke

anvendelig. Tilsvarende konkluderede Nissen (1999), at der med anvendelse af sådanne pedotransfer funktioner må forventes standardafvigelser på de predikterede førkomprimeringsstyrker på 50-60 kPa, hvilket oplagt diskvalificerer fremgangsmåden til praktisk anvendelse. Årsagen er bl.a., at en række andre egenskaber end dem, der indgår i modellerne, har indflydelse på førkomprimeringsstyrken.

På grundlag af den herover opridsede viden må det konkluderes, at det i hvert fald indtil videre er nødvendigt at basere vejledning om færdsel på landbrugsjord på andre parametre end jordens førkomprimeringsstyrke. Det er muligt, at der ad åre vil blive samlet så stor viden om denne styrke, dens variation med vandindholdet og dens korrelation til andre jordegenskaber, at den kan indgå i beslutningsstøttesystemer til minimering af jordpakning. Men for øjeblikket er det nødvendigt at se sig om efter andre kriterier for, hvornår en jord pakkes.



Figur 19. Målt relativ deformation i relation til målt vertikal stress for en række jordpkningsforsøg i Sverige og Danmark (Keller, 2004).

Measured strain (relative deformation of given soil layer) as related to the measured vertical stress for a number of soil compaction tests in Sweden and Denmark (Keller, 2004).

Gennem det seneste årti er der gennemført et stort antal målinger af stress og deformation (pakning) i naturligt lejrede jordprofiler i Sverige (bl.a. Trautner, 2003; Keller, 2004). Keller (2004) sammenfattede disse målinger og påpegede, at der sjældent blev registreret pakning ved belastninger under 50 kPa, mens der oftest blev målt pakning for stress værdier over 50 kPa (Figur 19). Hovedparten af målingerne, der er vist i Figur 19, stammer fra forårsfugtig jord, men der indgår også målinger fra sommeren, hvorfor andre vandindhold også er repræsenteret. Der er tale om målinger i dybderne 30, 50 og 70 cm. På grundlag af data i Figur 19, samt en samtidig konstateret dårlig korrelation mellem førkomprimeringsstyrke og graden af pakning, foreslår Keller (2004), at 50 kPa kan være et bud på den maksimale stress en jord bør udsættes for, hvis man skal undgå jordpakning.

Tabel 12. Internationalt foreslåede kriterier for at undgå jordpakning, udtrykt enten i dæktryk, teoretisk gennemsnitlig trædefladestress (p_{teor}) eller i vertikal stress i 50 cm dybde (p_{50}) (efter Tijjink, 1998).

Suggested guidelines to prevent soil compaction, expressed in limits of inflation pressure, average ground pressure (p_{teor}), and vertical stress at 50 cm depth (p_{50}) in spring or in summer/autumn.

Reference	Dæktryk (kPa)	p_{teor} (kPa)		p_{50} (kPa)		Bemærkninger
		Forår	Sommer/ efterår	Forår	Sommer/ efterår	
Söhne (1953)	80					Normale vandforhold
Perdok & Terpstra (1983)	100					
Petelkau (1984)		50	80 ¹			Sand
		80	150 ¹			Sandblandet ler
		80	200 ¹			Ler
USSR (1986) ²		80	100	25	30	vand (0-30) > 90 % m.k. ³
Rusanov (1994)		100	120	25	30	vand (0-30) > 70-90 % m.k. ³
		120	140	30	35	vand (0-30) > 60-70 % m.k. ³
		150	180	35	45	vand (0-30) > 50-60 % m.k. ³
		180	210	35	50	vand (0-30) < 50 % m.k. ³
Vermeulen et al. (1988)	40	50				tidlig forår, jord i omdrift
	80		100			jord i omdrift

¹ Vandindhold < 70 % af markkapacitet

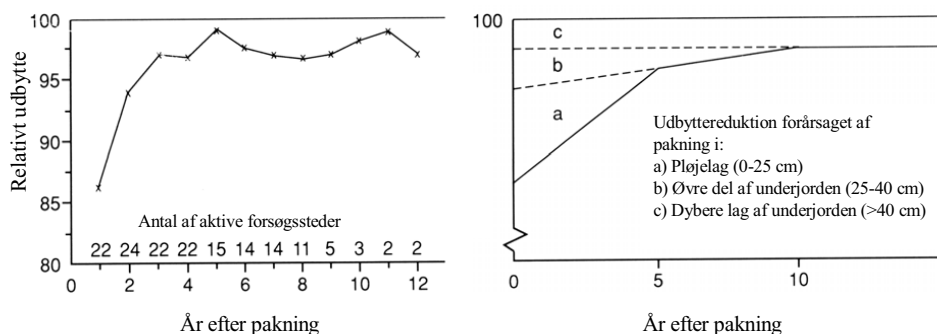
² Officiel standard for fin-teksturelle jorde i det tidligere Sovjetunionen. For ikke-trækkende hjul er værdierne 10 % højere. Ved to passager i det samme spor er værdierne 10 % lavere; for 3 eller flere passager er værdierne 20 % lavere

³ vand (0-30) = vandindhold (0-30 cm dybde); m.k. = markkapacitet (det vil sige forårets vandindhold)

Også andre forskere har forsøgt at opstille generelle stress-grænser i relation til jordpakning. Söhne (1953) foreslog, at markfugtig jord ikke bør trafikeres med dæk, der har over 80 kPa lufttryk (Tabel 12). Vermeulen et al. (1988) tiltrådte denne anbefaling, idet man dog reducerede grænseværdien til kun 40 kPa ved kørsel i det meget tidlige forår. Petelkau (1984) foreslog, at p_{teor} (hjulast divideret med trædefladearealet) ikke bør overstige bestemte værdier, der var afhængige af både sæson (forår-sommer) og jordtype. Der blev således foreslået værdier på 50-80 kPa for forårsvåd jord stigende fra sandjord til lerjord. Denne rekommendation svarer ifølge vores undersøgelser (ligning 3 og Figur 18) til dæktryk på ca. 8 (!) til 90 kPa. Det ligger således klart, at Petelkau's anbefaling om et p_{teor} på maksimalt 50 kPa er helt urealistisk. Rusanov (1994) foreslog, at p_{teor} kunne være op til 80 kPa for en jord med 90% af vandindholdet ved markkapacitet (forårets vandindhold). Denne grænseværdi blev så opskaleret med faldende vandindhold til 180 kPa for en jord med 50% af vandindholdet ved markkapacitet (Tabel 12). Dette er straks mere realistisk, jf. relationen mellem dæktryk og p_{teor} . Endelig inddrog Rusanov (og andre russiske referencer) stress-niveauet i 50 cm dybde som kriterium for bæredygtig fremgangsmåde. Således anbefaledes ikke højere stress end 50 kPa i denne dybde, selv ved den mest tørre tilstand. Desværre er det svært at vurdere, på hvilket grundlag de russiske anbefalinger (USSR, 1986; Rusanov, 1994) om maksimale stress-niveauer for minimering af jordpakning er blevet opstillet. Her skal blot konstateres, at de passer overens med konklusionen fra de mange svenske pakningsmålinger (Figur 19): stress i jordprofilen bør ikke overstige 50 kPa.

Håkansson & Reeder (1994) sammenfattede resultaterne fra en stor, international forsøgsserie med jordpakning. De konstaterede, at afgørdeudbyttet efter en enkelt episode

med pakning med 10 tons akselbelastning (5 tons hjullast) som gennemsnit af 22-24 forsøgssteder faldt ca. 15% og at der efterfølgende skete en gradvis forbedring i jordenes evne til at producere en afgrøde (Figur 20, venstre). Efter ca. 10 års forløb stabiliserede det relative udbytte sig på ca. 97% af det ikke-pakkede forsøgsled. Håkansson & Reeder (1994) tolker dette forløb ved at henføre udbyttetabet til skader i 3 forskellige jordlag (Figur 20, højre). Jordbearbejdning vil forholdsvis hurtigt genetablere jordens funktionsevne i pløjelaget. Biologisk aktivitet samt frost-tø og opfugtning-udtørring indvirker lidt langsommere men kan forventes at være aktiv ned til ca. 40 cm dybde. Derimod ser en pakningsskade under ca. 40-50 cm ud til at være meget langvarig (se f.eks. Voorhees et al., 1986) og – for sandholdige jorde – måske endog permanent. Håkansson & Reeder (1994) henfører det blivende udbyttetab ud over ca. 10 år til skader på dette dybere jordlag.



Figur 20. Resultaterne fra stor international forsøgsserie med en gang pakning med 10 tons akselbelastning (5 tons hjullast) (Håkansson & Reeder, 1994).

The results from a comprehensive international series of field trials with one initial soil compaction event (10 kN axle load [5 kN wheel load]). The Figures show the development in time of the relative crop yield in exact figures (left) and interpreted in relation to the compaction effect of different soil layers (right) (Håkansson & Reeder, 1994).

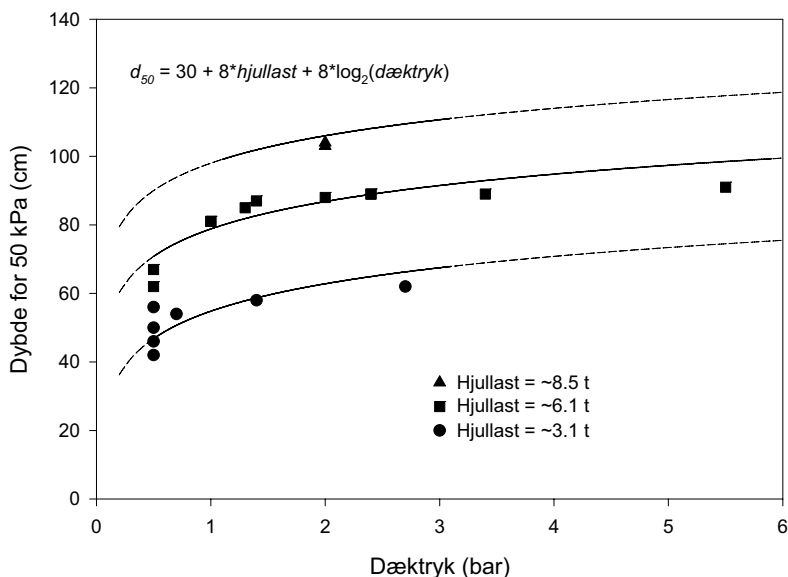
Sammenkobles nu i) de russiske anbefalinger om maksimalt 50 kPa stress i 50 cm dybde (Rusanov, 1994), ii) de svenske observationer af plastisk pakning af jord ved stress over 50 kPa (Keller, 2004), og endelig iii) Håkansson & Reeder's (1994) tolkning af pakningsskadernes permanente karakter i dybder under 40-50 cm fås basis for at foreslå hvad vi her vil kalde **50-50 kravet**: trafik på landbrugsjord bør tilrettelægges således, at den ikke giver anledning til stress over 50 kPa i 50 cm dybde.

På grundlag af en række undersøgelser kan for fugtig jord opstilles **50-50 kravet**: Trafik på landbrugsjord bør tilrettelægges således, at den ikke giver anledning til stress over 50 kPa (0.5 bar) i 50 cm dybde.

Hvor dybt går 50 kPa isobaren?

Fra Tabel 11 kunne vi konkludere, at stress i de øvre jordlag bestemmes af stress i trædefladen, og at stress i dybder omkring en meter overvejende bestemmes af hjullast. Af

figurerne med Söhne-prediktioner (figur 10 og 11 samt Appendiks E) fremgår, at 50 kPa isobaren går til ganske forskellig dybde for de forskellige kombinationer af dæk, hjullast og dæktryk. Vi kan derfor næppe komme med nogen enkel regel for forudsigelse af, til hvilken dybde vi vil presse jorden med over 50 kPa. Men det må formodes, at både dæktrykket og hjullasten vil spille ind.



Figur 21. Söhne-predikeret maksimal dybde for 50 kPa stress i relation til hjullast og dæktryk for 20 kombinationer af dæk, hjullast og dæktryk. Linierne viser den angivne, tilnærmede regressionmodells prediktioner. Bemærk, at hjullast og dæktryk skal indgå i modellen i tons henholdsvis bar. Den nøjagtige model er angivet i teksten (ligning 4).

Söhne-predicted maximum depth of 50 kPa vertical stress in relation to wheel load and tyre inflation pressure. Based on Söhne simulations on stress distributions for each of the 20 tested combinations of tyre type, wheel load and inflation pressure. The lines show the predictions of the suggested, approximate equation (the '8-8 rule'). Notice that the model requires wheel load and inflation pressure in units of tonnes and bars, respectively. The best-fitting model expression is found in the text (Equation 4).

Figur 21 viser Söhne-prediktioner for maksimal dybde for 50 kPa isobaren i relation til dæktryk. Det fremgår, at de estimerede dybder tydeligt ligger i 3 niveauer, - eet for hver hjullast. Samtidig ser vi stigning med dæktrykket indenfor hvert niveau af hjullast. Det viste sig, at en model med kombination af hjullast og dæktryk kunne forklare ikke mindre end 96% af variationen i data

$$d_{50} = 32.29 + 7.54 \times \text{hjullast} + 7.73 \times \log_2(\text{dæktryk}), \quad R^2 = 0.960, \quad RMSE = 4.07, \quad (4)$$

hvor d_{50} er dybde i cm for 50 kPa isobaren, og hjullast og dæktryk er i tons henholdsvis bar. Af Figur 21 fremgår, at modellen ikke helt forklarer relationen mellem d_{50} og dæktryk; for lave dæktryk øges d_{50} mere end modellen forudsiger, mens det omvendte er tilfældet for høje dæktryk. Modeller med eksponentiel relation mellem d_{50} og dæktrykket gav således også

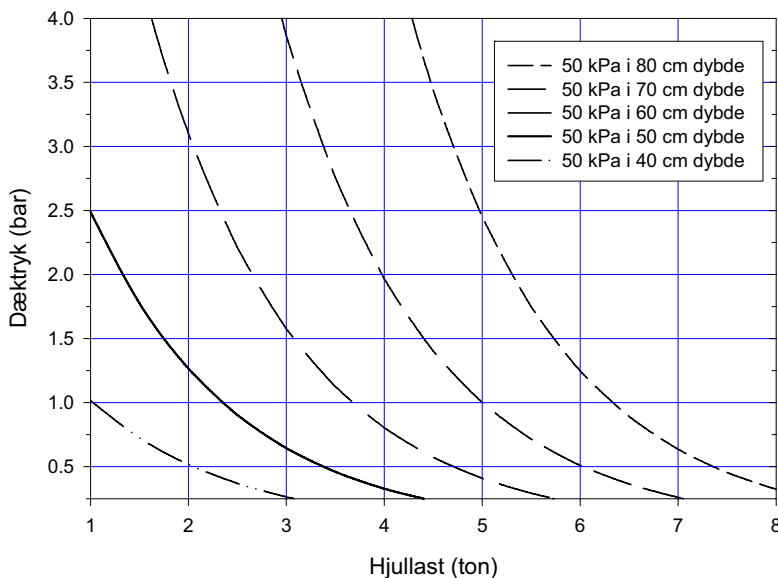
endnu bedre forklaring af data, men er mindre anvendelige i praksis. Modellen passer ret godt for dæktryk mellem 1 og 3 bar og et estimat fra ligning (4) er behæftet med en usikkerhed (RMSE) på kun ca. 4 cm. I afrundet form bliver ligningen

$$d_{50} = 30 + 8 \times \text{hjullast} + 8 \times \log_2(\text{dæktryk}). \quad (5)$$

Denne sammenhæng vil vi kalde **8-8 regelen**: dybden for maksimal tilrådelig stress (50 kPa) stiger med 8 cm for hver ton ekstra hjullast og med 8 cm for hver fordobling af dæktrykket.

8-8 regelen: Dybden for maksimal tilrådelig stress (50 kPa) stiger med 8 cm for hver ton ekstra hjullast og med 8 cm for hver fordobling af dæktrykket.

Ved et dæktryk på 1 bar reduceres ligningen til $d_{50} = 30 + 8 \times \text{hjullast}$. Det vil sige, at der med 1 bar i dækket må forventes et stress på 50 kPa i 46, 54 og 62 cm for henholdsvis 2, 3 og 4 tons hjullast. Og på samme måde kan beregnes, at reduktion af dæktrykket fra 2 til 1 bar ved 3 tons hjullast medfører, at dybden for kritisk stress i jorden reduceres med 8 cm fra 62 cm ($30 + 8 \times 3 + 8 \times 1$) til 54 cm ($30 + 8 \times 3 + 8 \times 0$). Et nomogram til vurdering af hvilke kombinationer af hjullast og dæktryk, der fører 50 kPa isobaren ned til udvalgte jorddybder er vist i Figur 22.



Figur 22. Nomogram til aflæsning af kombinationer af hjullast og dæktryk, der foranlediger 50 kPa stress til givne dybder. Udarbejdet på grundlag af relationen $d_{50} = 32.29 + 7.54 \times \text{hjullast} + 7.73 \times \log_2(\text{dæktryk})$, hvor d_{50} er dybde for 50 kPa stress (cm) og hjullast og dæktryk er givet i ton henholdsvis bar.

Nomogram for detection of combinations of wheel loads and inflation pressures giving rise to 50 kPa vertical stress reaching selected soil depths. Based on Equation 4: $d_{50} = 32.29 + 7.54 \times \text{wheel_load} + 7.73 \times \log_2(\text{inflation_pressure})$, where d_{50} is depth of 50 kPa vertical stress (cm), and wheel load and inflation pressure are given in tonnes and bars, respectively.

Den opstillede model for dybde af 50 kPa stress vil i sagens natur afhænge af den valgte koncentrationsfaktor ved Söhne-beregningen. Vi valgte en koncentrationsfaktor på $\nu=5$, der ofte anføres gældende for fugtig jord. Den fundne relation ('8-8 regelen') ville måske resultere i en '9-9 regel' (eller lignende), hvis der havde været anvendt en højere koncentrationsfaktor. Lamandé et al. (2006b) fandt, at $\nu=6$ var det bedste bud på en koncentrationsfaktor for en forårsvåd lerjord. Den opstillede model skal altså opfattes som en forholdsvis kvalitativ relation og vil kun gælde eksakt for en jord, hvor en koncentrationsfaktor på $\nu=5$ er gældende. Der er behov for studier af den mest korrekte koncentrationsfaktor for givne jorde og for en egentlig validering af relationen.

Hvis vi skal fastholde, at stress > 50 kPa ikke må føres til dybere lag end 50 cm, finder vi ud fra Figur 22, at selv de bedste dæk på markedet (anbefalet dæktryk ned til 50 kPa) kun kan belastes med op til 3.5 tons. Kræver dækket et lufttryk på 100 kPa, skal hjullasten ned under 2.5 tons. Ud fra de i dag kendte konstruktionsmetoder er det næppe realistisk at fremstille dæk, der kan fungere med under 50 kPa i dækket. Men skulle det lykkes, forudsiger 8-8 regelen, at et dæk med et lufttryk på 25 kPa (0.25 bar!) kan laste op til 4.5 tons før det kritiske stressniveau når 50 cm dybde (Figur 22).

Det kan noteres, at 50-50 kravet – det vil sige kravet om maksimalt 50 kPa i 50 cm dybde – giver anledning til en rekommendation, der svarer omtrent til begrænsningen af akselbelastningen til maksimalt 6 tons, som tidligere er foreslået i Sverige (Håkansson & Danfors, 1981). Det seneste årti omtaler man efterhånden ikke længere denne anbefaling, idet akselbelastningen i dagens praksis ofte er langt større. Argumentet for de højere akselbelastninger har været, at billedet bliver et andet med dagens gode lavtryksdæk. Vores undersøgelse peger på, at den tidligere svenske anbefaling også bør være gældende ved brug af gode dæk.

Holder 8-8 regelen?

En forudsætning for den opstillede 8-8 regel til forudsigelse af stresstransmission under dæk er, at Söhne-modellen predikerer korrekt. Således er data bag modellen (Figur 21) beregnet og ikke målt. Det er gentagne gange i denne rapport fremført, at der er god grund til at forvente, at Söhne-modellen vil give gode prediktioner under de konditioner, vi bruger den (med målte data for stress i trædefladen). Men der er trods alt tale om 'ekstrapolation' af vores resultater. Heldigvis giver helt nye data fra Danmarks JordbrugsForskning mulighed for at validere 8-8 regelen. Disse data er fremkommet lige før trykningen af nærværende rapport og kan derfor kun omtales overordnet. I et Forskningsrådsprojekt blev målt vertikal stress i 30, 60 og 90 cm dybde under en række testhjul med forskellig belastning. Bl.a. indgik to af dækkene fra denne undersøgelse, idet Nokian ELS 560/45R22.5 og Nokian ELS 800/50R34 blev belastet med ca. 30 og ca. 60 kN og testet ved anbefalet dæktryk (se Tabel 2). En foreløbig opgørelse af datamaterialet (anvendelse af simpel lineær interpolation mellem stress i de aktuelle måledybder) viste, at 50 kPa stress i disse fire kombinationer af hjullast og dæktryk havde nået dybderne ca. 60, 55, 90 og 85 cm (rækkefølgen 560/45R22.5, ~30 kN; 800/50R34, ~30 kN; 560/45R22.5, ~60 kN; 800/50R34, ~60 kN; gennemsnit af 2-3 målegentagelser). Modellen bag 8-8 regelen (ligning 4) forudsiger, at dybden for 50 kPa stress

skulle være henholdsvis ca. 55, 48, 90 og 79 cm. Den afrundede 8-8 regel (ligning 5) giver: 58, 46, 92 og 78 cm. Det vil sige, at 8-8 regelen forudsiger nøjagtig den registrerede trend mellem de foretagne test. Det kan konstateres, at der er en lille afvigelse mellem målte og predikterede tal i form af en underprediktion (bias) på gennemsnitligt ca. 4 cm. RMSE kan beregnes til ca. 5.2 cm og kan altså i stor udstrækning tilskrives den registrerede bias. Selv om dette selvfølgelig er et spinkelt valideringsgrundlag, indikerer det efter forfatternes opfattelse, at 8-8 regelen er et godt bud på beregning af den maksimale dybde i jorden, der vil blive påført stress over 50 kPa. Ud fra den således foreliggende validering noterer vi os iøvrigt, at bias bestod i en undervurdering af de reelt målte stress. På dette grundlag må det forventes, at 8-8 regelen giver et 'forsigtigt' estimat af dybde for kritisk stress. Den registrerede bias kan iøvrigt tolkes i retning af, at koncentrationsfaktoren for stresstransmission i de undersøgte jorde er højere end $\nu=5$, der jo blev anvendt ved opstilling af 8-8 regelen.

Selv om 8-8 regelen er foreslået her alene som en tommelfingerregel, bør der foretages yderligere validering af beregningsmetoden. Det bør også anføres, at ovennævnte validering var for forårsvåd jord. Det foreløbige datamateriale fra Forskningsrådsprojektet antyder, at stresstransmissionen kan være anderledes dels ved kørsel på tør jord og dels når et hjul giver meget store deformationer i de øvre jordlag (stor hjullast på et smalt dæk). Det sidste blev også fundet af Lamandé et al. (2006b).

Foto 10. Testvognen i marken. Her med Nokian 800/50R34 og belastet svarende til ~60 kN.

The test trailer in the field. Equipped with the Nokian 800/50R34 and loaded to a wheel load of ~60 kN.



Trædefladedimensioner og stressfordeling

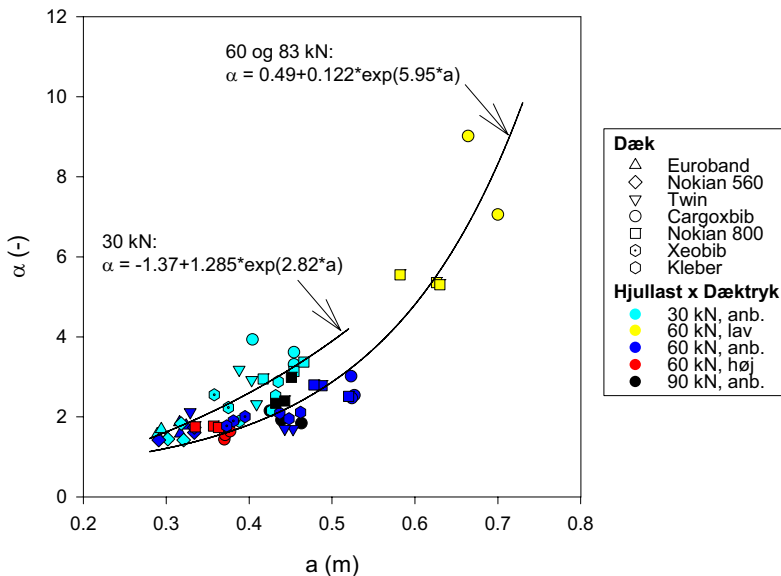
I forbindelse med omtalen af effekten af dæktryk på stressfordelingen opstillede vi en relation for sammenhængen mellem halv trædefladelængde, a , og formparameteren, α , for stressfordelingen i kørselsretningen (Figur 6). Vi fandt, at α relaterede sig til a ved

$$\alpha = 0.49 + 0.122 \times \exp(5.95 \times a). \quad (6)$$

Denne relation blev dog dannet alene på basis af vogndækkene 650/R6530.5 og 800/50R34 og alene ved 60 kN hjullast. En analyse for alle dæk og alle testede hjullaster viste, at denne relation var gældende for alle dæk ved 60 og 83 kN hjullast (Figur 23). Til gengæld viste det sig, at flertallet af de undersøgte dæk ved 30 kN havde signifikant større α end predikeret med ovennævnte ligning ud fra a . I Figur 23 er indtegnet en linie, der beskriver relationen for alle dæk ved 30 kN:

$$\alpha = -1.37 + 1.285 \times \exp(2.82 \times a). \quad (7)$$

De to relationer i Figur 23 (ligning 6 og 7) giver mulighed for at estimere formparameteren α ud fra trædefladelængden ($2 \times a$), der er en forholdsvis let målelig parameter.



Figur 23. Relation mellem halv trædefladelængde, a , og formparameter, α , for stressfordeling i kørselsretningen. Alle undersøgte kombinationer af dæk, hjullast og dæktryk.

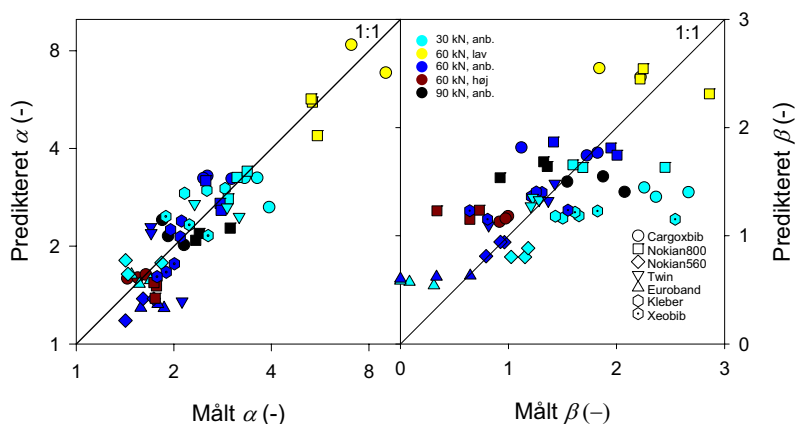
Relation between the half contact area length, a , and the parameter, α , describing the stress distribution in the driving direction. Data from all tests.

Desværre fandtes ikke samme gode korrelation mellem formparameteren β og den modsvarende trædefladedimension (bredden i form af halv trædefladebredde b). Til gengæld var der en vis korrelation til trædefladearealet udtrykt ved A_{num} eller A_{ellip} . β kunne beskrives med A_{num} ved følgende relation (intercept ikke signifikant forskellig fra nul)

$$\beta = 2.533 \times A_{num}, \quad R^2 = 0.486, \quad RMSE = 0.48, \quad (8)$$

hvor A_{num} er i m^2 . Stressfordelingsparameteren β er altså stigende med stigende trædefladeareal.

Figur 24 viser, at der kan fås et ganske fint estimat for stressfordelingsparameteren, α , i kørselsretningen ud fra længden af kontaktflden. Estimerne for β er meget mere usikre, hvilket naturligvis skyldes, at kun ca. 49% af variationen kunne forklares med den simple model (ligning 8). Den største afvigelse ser ud til at forekomme for de to Michelin-dæk ved 30 kN hjullast. Der får vi predikeret β værdier på kun 1-1.5 mens vores stressdata svarer til β i området 2-2.5. Ser man på det i det store perspektiv kan dog konkluderes, at den meget simple prediktionsformel er i stand til at give et bud på niveauet for β . Man vil korrekt finde små værdier for de små dæk Nokian ELS 560/45R22.5 og især Euroband SA 385/65R22.5 og høje værdier for de store dæk, især med lavt dæktryk (Figur 24).



Figur 24. 'Målte' værdier (fittet fra målt stress med modellen i Appendiks B) af stressfordelings-formparametrene α og β og predikterede værdier ud fra formlerne i Figur 23 (α) henholdsvis ligning 8 (β). Bemærk, at α -plottet er i dobbeltlogaritmisk form på grund af den store spændvidde i data.

The α and β stress distribution form parameters predicted by the equations given in Figure 23 (α) or Equation (8) (β) as related to the 'measured' values (model-fitted from measured stress distributions). Notice the logarithmic axes of the α -plot.

Prediktion af trædeflade dimensioner og stressfordeling ud fra dækdimensioner

I rapportens resultat-afsnit foretog vi en række sammenligninger, hvor vi forsøgte at finde effekten af dæktryk, hjullast og dækfabrikat isoleret set. Det kan imidlertid være yderst relevant at undersøge, om dækkenes dimensioner samt dæktryk og hjullast på tværs af dækfabrikat samlet er i stand til kvantitativt at beskrive både trædefladearealet og stressfordelingen over dette.

I sidste afsnit fandt vi, at trædefladearealets dimensioner til en vis grad kunne forklare stressfordelingen. Hverken trædefladelængden, a , eller trædefladearealet, A_{num} , er imidlertid ikke umiddelbart kendt for et givet dæk. Det betyder, at de beskrevne relationer ikke kan anvendes konkret. Det ville være ønskeligt, om man kunne forudsige alle parametrene a , b , n (og dermed A), samt α og β for en given belastningssituation, idet der dermed kunne beregnes stress i trædefladen med modellen i Appendiks B. I dette afsnit skal vi se på, om disse parametre afhænger af dækdimensioner samt dæktryk og hjullast.

Et dæks dimensioner er entydigt fastlagt ud fra de tre første parametre listet i Tabel 1. Det vil sige totaldiameter, sektionshøjde (gummikarkassens højde) og dækbredden. Ud fra disse kan man regne tilbage til fælgdiameter. Profilprocenten (fjerde kolonne i Tabel 1) er sektionshøjde divideret med dækbredde. Dækvolumen er et udtryk for det samlede rumfang indesluttet i dækket. Af Tabel 1 fremgår, at dækvolumen stiger omtrent i samme rækkefølge som totaldiameter. Dækbredden og sektionshøjden vil i sagens natur også øve indflydelse på dækvolumen, der således må siges at integrere flere af de øvrige dimensioner. Beregninger viste da også, at der for de 7 udvalgte dæk var signifikant korrelation mellem dækvolumen på

den ene side og både dækbredde og -diameter på den anden. Desuden fandt vi en stærk korrelation mellem diameter og sektionshøjden.

Ud fra de ovenanførte betragtninger kunne det være nærliggende at undersøge, om dækvolumen som integrerende parameter kan forklare dækkenes opførsel i form af både trædefladeareal og stressfordeling. Dækvolumen findes tabelleret for de fleste dæk i f.eks. Nordisk Dæk Import A-S's katalog (NDI, 2006). Parameteren forventes imidlertid desværre at være behæftet med en ret stor usikkerhed, idet den er opgivet af dækfabrikanten med et andet formål end en nøjagtig oplysning om dækvolumenet som sådan. Der er tale om en cirka-værdi til brug for 75% vædskefyldning af dækkene i specialsituationer. Man er derfor nødt til at vurdere, hvilke parametre, der alternativt kan beskrive dækkenes opførsel bedst muligt. Det må være nærliggende at inddrage totaldiameter, dækbredden og sektionshøjden. Da der imidlertid fandtes en stærk korrelation mellem sektionshøjden og diameteren forekommer det relevant i stedet at inddrage profilprocenten. Denne udtrykker sektionshøjden men som procent af dækbredden. Profilprocenten var ikke signifikant korreleret til nogen af de øvrige dækdimensioner for de 7 udvalgte dæk. Endelig viste en analyse, at produktet af diameter og bredde (i det følgende benævnt $\text{dia} \cdot \text{bre}$) korrelerede meget stærkt til dækvolumen. På dette grundlag er der basis for at benytte denne afledede parameter i analyserne af dækkenes opførsel.

Keller (2005) foreslog en enkel måde at inddrage dæktrykket på ved analyse af dæks opførsel. I stedet for at bruge dæktrykket som sådan beregnes et relativt dæktryk ved at sætte det aktuelle tryk i forhold til det anbefalede dæktryk (i det følgende betegnet rel_dt). Dermed normaliseres dæktrykket for forskellige dæk. Det er i denne sammenhæng meget vigtigt, at der altid anvendes anbefalet dæktryk til brug ved kørsel i marken. Det kan i dækkataloger (f.eks. NDI, 2006) findes som anbefalet dæktryk ved 10 km/t.

Belastningen på et hjul vil givetvis også påvirke dets måde at 'arbejde' på under kørsel. En del af effekten kan forventes at blive udtrykt i det relative dæktryk, idet anbefalet dæktryk er forskelligt ved forskellige belastninger. Der kan dog tænkes at være andre effekter af hjullasten som sådan. Det er derfor relevant at inddrage hjullasten til beskrivelse af trædefladeareal og stressfordeling.

På grundlag af ovenstående overvejelser valgte vi at inddrage følgende parametre til at beskrive dækkenes påvirkning af trædefladedimensioner og stressfordeling i både kørselsretningen og på tværs af hjulet: dækbredde, dækdiameter, produktet $\text{dia} \cdot \text{bre}$, profilprocenten, det relative dæktryk (rel_dt) og hjullasten. Disse parametre betegnes i det følgende beregningsteknisk som de uafhængige parametre. Med det gennemførte måleprogram varierede dækbredden mellem 38 og 80 cm, diameteren mellem 107 og 198 cm, $\text{dia} \cdot \text{bre}$ mellem 0.41 og 1.34 m², profilprocenten mellem 45 og 75, det relative dæktryk mellem 0.5 og 2.4, og hjullasten mellem 28.3 og 83.4 kN.

Ved hjælp af PROC REG i statistikprogrammet SAS (SAS Institute, 1996) fandtes de bedste linearkombinationer af de udvalgte parametre til beskrivelse af parametrene, der indgår i modellen beskrevet i Appendiks B. Disse parametre er i beregningsteknisk terminologi i det følgende afhængige parametre. Det vil sige, at vi lavede separate analyser for hver af de afhængige parametre a , b , n , A , α og β . Ved disse analyser indgik det relative dæktryk (rel_dt)

logaritmeret ($\ln(\text{rel_dt})$), som genialt foreslået af Keller (2005). Derved opnås nemlig, at et dæktryk lig det anbefalede ikke indgår i modellen til beskrivelse af de øvrige uafhængige parametres indflydelse ($\ln(\text{rel_dt})=\ln(1)=0$).

Ved hver af de foretagne analyser indgik 59 observationer fra måleprogrammet i marken, idet data fra et enkelt test gik tabt. Det vil sige, at der var 59 værdier af de afhængige parametre. Disse blev sammenholdt med de 20 forskellige kombinationer af de uafhængige variable. Vi valgte for flere af parametrene at lave regressionsanalysen på logaritmerede data. Dette skyldes primært, at regressionsligningerne efterfølgende skulle anvendes i forbindelse med et beslutningsstøttesystem. Ved at opstille relationer til logaritmerede data opnåede vi, at der ikke kunne forekomme negative estimater for parametrene. Vi forventede, at dette ville kunne ske for dæk, der ikke indgik i undersøgelserne bag prediktionsligningerne.

Tabel 13. Koefficienter til regressionsligninger for beskrivelse af trædefladekarakteristika ud fra dækdimensioner. Parameteren $\text{dia} \cdot \text{bre}$ er produktet af diameter og bredde, og $\ln(\text{rel_dt})$ er den naturlige logaritme til det relative dæktryk (aktuelt dæktryk/anbefalet dæktryk).

Coefficients in regression equations describing the relation between the parameters a , b , A_{ellip} , α and β and the tyre dimensions. The parameter $\text{dia} \cdot \text{bre}$ is the product of tyre diameter and tyre width, and the $\ln(\text{rel_dt})$ is the logarithm to the relative inflation pressure (actual/recommended).

Parameter ¹	Intercept	Bredde	Diameter	$\text{dia} \cdot \text{bre}$	Profil%	$\ln(\text{rel_dt})$	Hjullast	R ²	RMSE
$\ln(a)$	-2.96	+2.56	-0.591		+0.0212	-0.344	+0.00141	0.856	0.084
b	+0.049	+0.457						0.848	0.023
$\ln(A_{\text{ellip}})$	-5.76	+7.38	+1.03	-2.57	+0.0196	-0.426	+0.00294	0.921	0.110
$\ln(\alpha)$	-2.22	+4.70	-1.24		+0.0365	-0.792	-0.00395	0.749	0.212
$\ln(\beta)$	-2.72	+3.68			+0.0135	-0.731	-0.00561	0.622	0.373

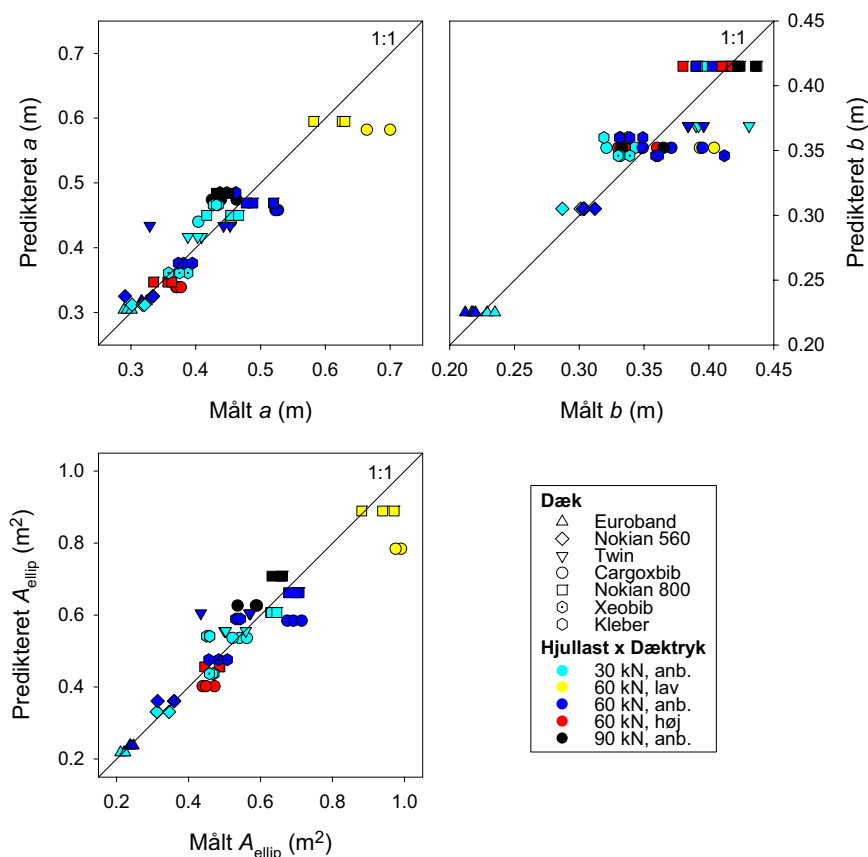
¹Bemærk, at der for de fleste parametre skal transformeres til lineær skala med exponential-funktionen

Trædefladearealet

Resultaterne fra regressionsberegningerne er vist i Tabel 13. Det fremgår, at 85.6% af variationen i de observerede værdier for den halve trædefladelængde, a , kunne forklares med de uafhængige variable dækbredde, -diameter, profilprocent, $\ln(\text{rel_dt})$ og hjullast. Hjullast-effekten var signifikant med en sandsynlighed på $P=0.037$, mens alle de øvrige effekter var signifikant på tre-stjerne niveau eller bedre ($P \leq 0.001$). Usikkerheden på estimatet udtrykt ved RMSE skal omregnes til lineær skala for at kunne vurderes. En a -værdi på 0.4 (trædefladelængde på 0.8 m) vil blive estimeret med en usikkerhed på ca. 3.3 cm ($0.368 < a < 0.435$ m). Af koefficienterne til de uafhængige variable kan aflæses, at trædefladelængden, a , stiger med stigning i dækbredde, profilprocent og hjullast. Som forventet vil stigende dæktryk mindske trædefladelængden (koefficienten til $\ln(\text{rel_dt})$ er negativ). Det er umiddelbart højt besynderligt, at dækdiameteren virker negativt ind på trædefladelængden (Tabel 13). Fænomenet skal snarere tilskrives en vekselvirkning mellem de uafhængige variable end en logisk direkte effekt af dækdiameteren. Af Figur 25 ses i grafisk form, hvor godt modellen passede til de målte værdier. Generelt er der tale om en ganske god sammenhæng mellem målingerne og estimaterne ud fra regressionsmodellen. Dog

er der tendens til undervurdering af de meget store trædeflade længder, der er registreret for Michelin Cargoxib 650/65R30.5 og Nokian ELS 800/50R34 ved lavt dæktryk.

Vi valgte bevidst en meget enkel model til beskrivelse af halv trædefladebredde, b . Dækbredden alene kunne forklare næsten 85% af den observerede variation. Forklaringsprocenten kunne øges ved inddragelse af andre af de uafhængige variable, men for at give en robust prediktion af halv trædefladebredde, b , i beslutningsstøttesystemet, valgtes den meget enkle model. Det fremgår, at de estimerede b -værdier var lidt større end halv dækbredde (intercept på 4.9 cm) og steg knapt i forholdet 0.5:1. Det vil sige, at dækkene i undersøgelsen generelt har givet lidt større trædefladebredde end dækbredden. Estimatet for halv trædefladebredde var behæftet med en usikkerhed på 2.3 cm (Tabel 13). Af Figur 25 fremgår, at fittet mellem målte og modelberegnete værdier er noget ringere end for den halve trædefladelængde.



Figur 25. Predikterede værdier (regressionsligninger i Tabel 13) for halv trædefladelængde, a , halv trædefladebredde, b , og trædefladeareal, A_{ellip} , plottet mod de tilsvarende målte værdier (fittet fra måledata).

The a , b and A_{ellip} contact area characteristics predicted by the equations given in Table 13 as related to the 'measured' values (model-fitted from measured contact area data).

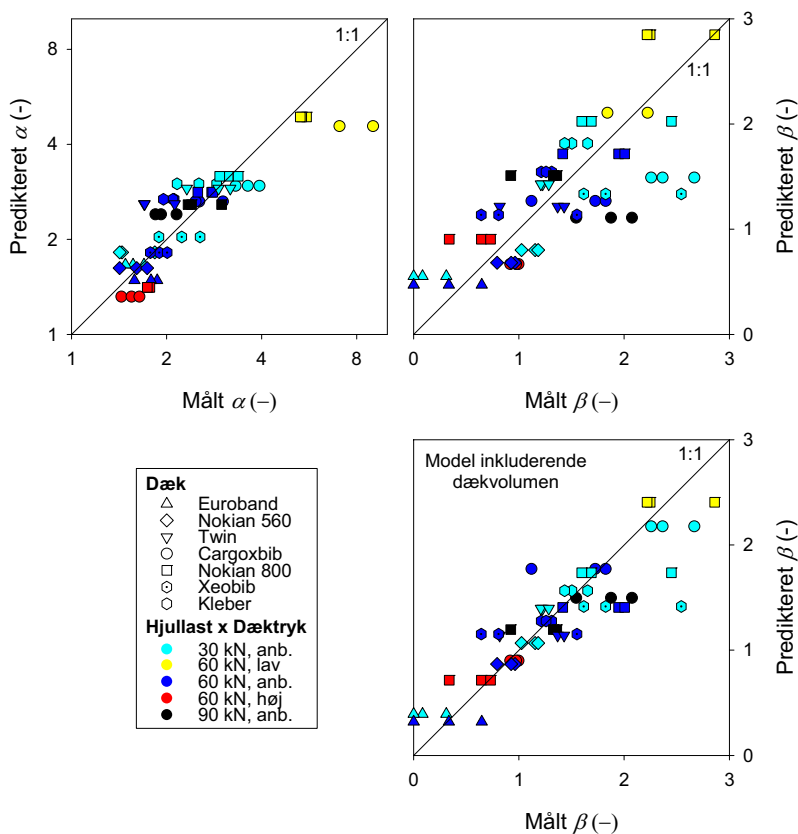
Der fandtes ingen signifikant korrelation mellem parameteren n ('firkantethed' af trædefladearealet) og de uafhængige parametre. Der kunne derfor ikke opstilles nogen modeller til prediktion af denne fra dækdimensionerne. Til gengæld kunne hele 92% af variationen i de observerede værdier for trædefladearealet beskrives med dækdimensioner, dæktryk og hjullast (Tabel 13). Modellen udtrykker bl.a., at trædefladearealet – alt andet lige – er stort ved højprofildæk. Øget hjullast øger også trædefladearealet, mens det mindskes ved stigende dæktryk. Ud fra den registrerede RMSE kan beregnes, at et estimeret trædefladeareal, A , på f.eks. 0.6 m^2 vil være behæftet med en usikkerhed på ca. 10% ($0.538 < A < 0.669$). Selv om dette måske kan lyde af meget, viser Figur 25 dog en rimelig pæn korrelation til målte data. Igen er der en tendens til en svag undervurdering af de meget store trædefladearealer, der er registreret med de to store vogndæk ved lavt dæktryk.

Stressfordeling

En model med dækbredde, -diameter, profilprocent, relativt dæktryk samt hjullast kunne forklare ca. 75% af variationen i formparameteren, α (Tabel 13). I overensstemmelse med diskussionerne i de tidligere afsnit giver stigende dæktryk en reduktion i α . Det samme gør øget hjullast (jf. Figur 23). Også for denne parameter er der undervurdering af de meget store værdier af α for de store vogndæk med lavt dæktryk (Figur 26). En modelberegnet værdi f.eks. $\alpha=3$ er behæftet med en usikkerhed på ca. 0.65 ($2.43 < \alpha < 3.71$). En sammenligning mellem modellfittene i Figur 24 og 26 viser, at α øjensynligt kan predikteres omtrent lige så godt fra en kendt trædefladelængde som fra dækdimensionerne.

De tilgængelige uafhængige variable kunne kun forklare ca. 62% af variationen i β , der udtrykker stressfordelingen på tværs af dækket (Tabel 13). Effekten af dækbredden og det relative dæktryk var stærkt signifikante, mens profilprocentens og hjullastens effekt kun havde en-stjernet signifikans (P ca. 0.02 henholdsvis 0.06). Minustegnet foran koefficienten til $\ln(\text{rel_dt})$ udtrykker den udprægede og meget stærke effekt, som et øget dæktryk har på stressfordelingen (se f.eks. Figur 7). Modellfittet er kun lidt bedre end opnået med prediktion direkte fra trædefladearealet (sammenlign Figur 24 og 26).

Som tidligere omtalt er de tilgængelige oplysninger om dækvolumen usikre for en række fabrikaters vedkommende. Af denne grund har vi ikke inddraget dækvolumen i vores regressionsanalyser; modeller med dækvolumen ville nemlig ikke kunne give tilforladelige estimater for andre dæk end de 7 undersøgte. For 6 af de undersøgte 7 dæk vurderede vi at have gode estimater for dækvolumen. En værdi for det sidste – Euroband SA 385/65R22.5 – blev skønnet ud fra dimensioner på dette og tilsvarende dæk. På dette grundlag kunne også opstilles en model, der inddrager dækvolumen (Figur 26, nederst). I modellen indgik foruden dækvolumen samtlige øvrige uafhængige variable udover profilprocenten. Forklaringsgraden var ca. 81%, hvilket afspejles i et noget bedre fit mellem observerede og predikterede værdier (Figur 26, nederst) end i modellen uden dækvolumen (Figur 26, øverst). På grundlag af denne observation forekommer det oplagt at efterspørge mere nøjagtige værdier for dækvolumen fra dækfabrikanterne. En model, der inddrager dækvolumen, vil kunne give forbedrede estimater for stressfordelingen på tværs af dækket.



Figur 26. Predikterede værdier (regressionsligninger i Tabel 13) for stressfordelingsparametrene α og β plottet mod de tilsvarende målte værdier (fittet fra måledata). Bemærk dobbeltlogaritmisk plot for α . Den nederste delfigur viser fit for β med anvendelse af model, der inkluderer dækkenes volumen (se tekst for detaljer).

The α and β stress distribution form parameters predicted by the equations given in Table 13 as related to the 'measured' values (model-fitted from measured stress distributions). Notice the logarithmic axes of the α -plot. The extra Figure for β (bottom) relates 'measured' β to predictions including the inner tyre volume.

Foto 11. Det kræver gode dæk at bære 6 tons ved 0.5 bar dæktryk! Her Cargoxbib-dækket ved kun halvdelen af anbefalet dæktryk. Man skal regulere ned til det anbefalede dæktryk men ikke meget under.

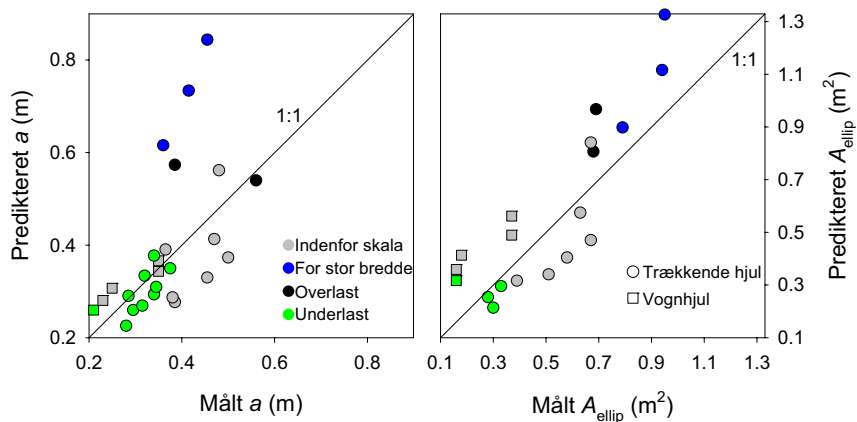
The 650/65R30.5 with 60 kN wheel load and 50 kPa inflation pressure (half of recommended).



Resultaterne fra foregående afsnit (Figur 25 og 26) viste, at det er muligt med rimelig sikkerhed at forudsige både trædefladeareal og stressfordeling over denne, hvis man kender dækdimensioner, hjullast, dæktrykket og endelig det anbefalede dæktryk. Vi ved selvfølgelig ikke på grundlag af vores egne undersøgelser, hvor god forudsigelserne vil være for andre dæk end de testede. Som omtalt i det foregående afsnit havde vi dog en rimelig stor variationsbredde i alle de uafhængige variable, og man må forvente, at beregninger på andre belastningssituationer vil give fornuftige resultater, hvis man holder sig inden for disse skalaer.

Validering af prediktionsligninger

Heldigvis viste der sig mulighed for at foretage en validering på uafhængige data. Keller (2005) gennemførte et måleprogram i stil med det, der er beskrevet i denne rapport. Dataopgørelse og modellering var ikke nøjagtig som i det aktuelle arbejde. Men for den halve trædefladelængde, a , og for trædefladearealet, A , er det muligt at sammenligne Keller's estimer med vores. I Figur 27 er der vist sammenhørende værdier af Keller's estimer for a og A og prediktioner af disse fremkommet ved at bruge ligningerne i Tabel 13 på de dækdimensioner, hjullaster og dæktryk, der blev anvendt af Keller (2005). Der er således tale om en reel validering af prediktionsligningerne.



Figur 27. 'Målte' (model-fittede) data fra Keller (2005) er sammenholdt med predikterede værdier ud fra dækdimensioner, dæktryk og hjullast i Keller's undersøgelse men med prediktionsformlerne fra Tabel 13.

The a and A_{ellip} contact area characteristics predicted by the equations given in Table 13 as related to 'measured' values by Keller (2005) for tyres not included in the present investigation.

I Figuren angiver cirkler trækkende dæk (roeoptyager-dæk eller traktor-dæk) mens firkanter angiver dæk til vognhjul. Keller's data inkluderede dæk fra Michelin, GoodYear og Trelleborg. Hjullasten svingede fra 11 til 125 kN og det relative dæktryk (aktuelt i forhold til anbefalet) svingede fra 0.7 til 3.7. Med farver er angivet, hvorvidt og på hvilken måde

Keller's data er uden for skalaen i det danske datasæt. Således angiver blå punkter, at der er tale om bredere dæk, end vi havde med i testene. Sorte punkter angiver hjullast over skalaen i det danske datasæt og grønne punkter angiver hjullast under skalaen.

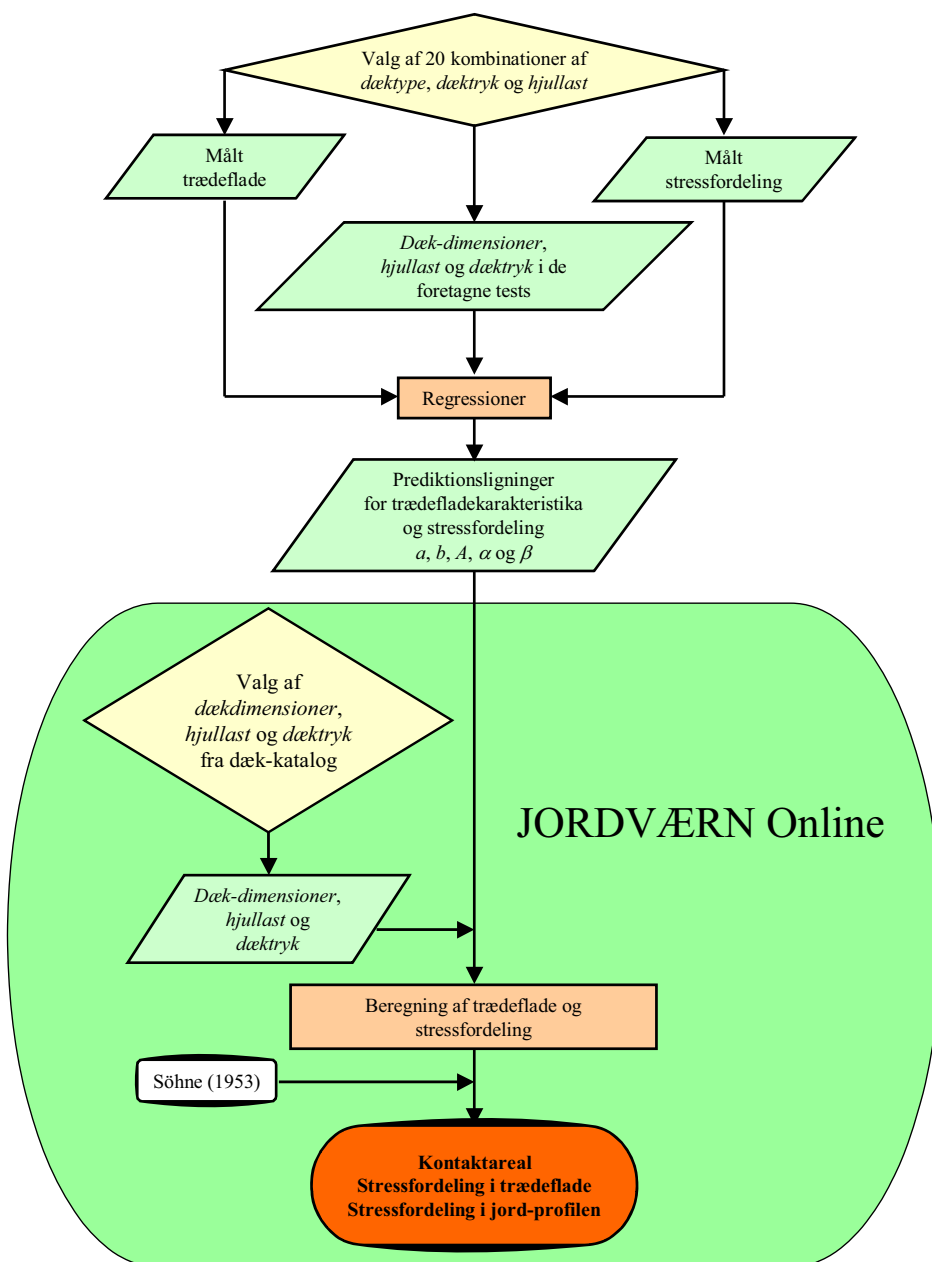
Det kan diskuteres, hvor god fittet mellem målte og predikterede værdier er. For trædefladelængden, a , er fittet ret dårligt for et meget bredt Michelin 1050/50R32 dæk (til roeoptagere, blå punkter). Det ene sorte målepunkt, der falder en del ved siden af, er et GoodYear dæk (800/65R32) med en hjullast på 125 kN. Resultatet af valideringsøvelsen vedrørende a kan tolkes i retning af, at man bør være forsigtig med beregninger med de udviklede prediktionsligninger for belastningssituationer med dæk over 1 meters bredde og for hjullaster over ca. 100 kN.

Højre halvdel af Figur 27 viser prediktionen for trædefladearealet, A . Det er helt afgørende, at prediktionsligningerne er i stand til at komme med et godt bud på netop denne parameter. Det er ikke helt så afgørende, om det estimerede areal beskrives med lidt forkerte værdier for trædefladelængde og -bredde. Som det senere vil blive beskrevet, er beslutningsstøttesystemet udarbejdet således, at arealet 'går op' gennem n -parameteren (en meget firkantet trædeflade eller en næsten cirkulær super-ellipse). Fittet for A ser rimeligt ud. Selv det brede Michelin-dæk predikteres uden helt ekstrem afvigelse.

Opbygning af beslutningsstøttesystemet

På grundlag af de udarbejdede regressionsligninger er det muligt at give et bud på trædefladekarakteristika (bredde, længde, areal) og på stressfordelingen i trædefladen. Det er også muligt at beregne afledede parametre som f.eks. maksimal stress i trædefladen og procentdel af trædefladen, der belastes med mere end et bestemt stress-niveau (f.eks. 100 kPa). Videre kan disse informationer fungere som input til den tidligere omtalte Söhne-model, der giver et bud på stressfordelingen i jorden under hjulet. Alle disse beregninger kan foretages for andre dæk end dem, der var med i forsøgene på Forskningscenter Foulum. Derved opstår muligheden for at give et indtryk af, hvorledes dæktype, dæktryk og hjullast vil øve indflydelse på jorden. Et sådant værktøj kan bl.a. være en hjælp ved beslutning om maksimal hjullast, hvorfor det betegnes et beslutningsstøttesystem.

Proceduren ved opbygningen af systemet er vist i Figur 28. Der startes for oven med undersøgelsen af, hvorledes 7 udvalgte dæk i kombination med en række dæktryk og 3 hjullaster påvirker jorden (resultaterne herfra udgør hovedparten af denne rapport). Dette omfattende datamateriale blev så kombineret med dækdimensioner for de undersøgte dæk til udarbejdelse af regressionsligninger for sammenhæng mellem dækdimensioner, hjullast og dæktryk på den ene side og trædefladeareal og stressfordeling på den anden side (beregninger beskrevet i foregående afsnit). Endelig blev disse prediktionsligninger brugt til beregninger på dækdimensioner for ca. 200 dæk fra et dækkatalog (NDI, 2006). Resultatet er beslutningsstøttesystemet, der viser resultaterne som figurer af trædeflade, stressfordeling over trædefladen, og stressfordeling nedad i jordprofilen (Figur 28). Systemet beregner og viser også udvalgte parametre i tal-form.



Figur 28. Procedure bag opbygning af beslutningsstøttesystem.

Route diagramme illustrating the construction of the decision support system 'JORDVÆRN online'.

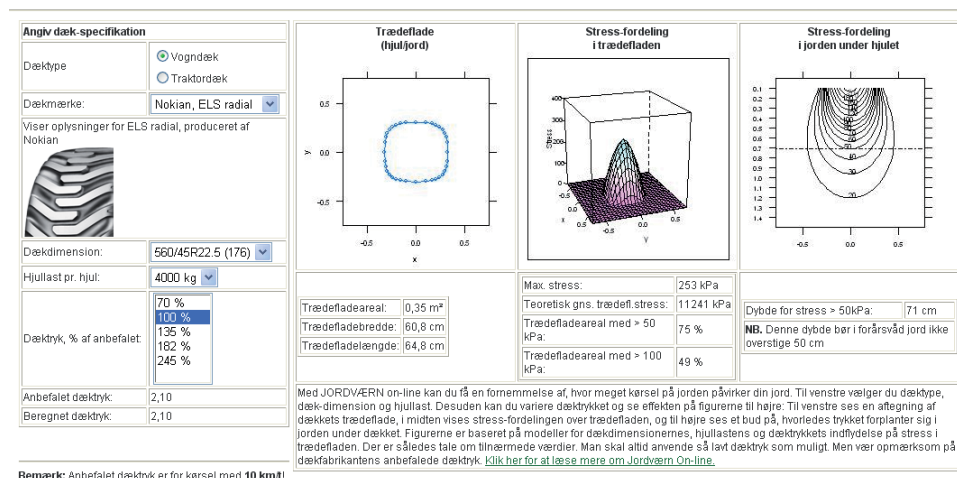
Da det ikke var muligt at estimere n -parameteren ('firkantetheden' af superellipsen, der beskriver trædefladen) ud fra dækdimensioner, anvendes en alternativ procedure. Først bliver superellipse parametrene a og b samt trædefladearealet, A , estimeret særskilt med de beskrevne prediktionsligninger (Tabel 13). Dernæst findes ved en numerisk metode den n -værdi, der får disse 3 parametre til at passe sammen. Da de 3 parametre er beregnet uafhængigt af hinanden opstår muligheden af, at der ikke findes nogen værdi af n , der med de estimerede a og b dimensioner giver et trædefladeareal på A . I sådanne situationer tilrettes den halve trædefladelængde, a , indtil de 3 parametre matcher hinanden. Et kriterium for, om denne procedure udløses, er, at n ikke må være mindre end 2 og ikke højere end 9. Disse grænseværdier er valgt ud fra skalaen af observerede værdier i både den aktuelle undersøgelse og hos Keller (2005).

Der udvælges en række mulige hjullaster og modsvarende anbefalede dæktryk (10 km pr. t) fra dækkataloget, idet der ved simpel interpolation findes korrekt anbefalet dæktryk ved 'runde' værdier af hjullast (f.eks. i trin for hver 500 eller 1000 kg hjullast).

Den første version af beslutningsstøttesystemet er udformet således, at data (herunder figurer) for alle kombinationer af dæk, hjullast og relativt dæktryk er beregnet een gang for alle. Det øger systemets responstid i forhold til online beregning af parametre og konstruktion af figurer ud fra dækdimensionerne.

JORDVÆRN on-line

PROTOTYPE!



Figur 29. En prototype på beslutningsstøttesystemet JORDVÆRN online. Til venstre vises dialogboksen, hvor der vælges dæktype, fabrikat, dækdimension, hjullast og relativt dæktryk. Til højre ses de 3 figurer, der for den valgte belastningssituation giver et bud på trædefladen, stressfordelingen over denne, samt stressfordelingen i jorden under dækket.

Features of the 'JORDVÆRN online' decision support system (prototype) showing diagrams of the contact area, the stress distribution in the contact area, and Söhne predictions of stresses in the soil beneath a selected tyre.

Brug af JORDVÆRN online

Det er hverken muligt eller relevant her at give en fyldig introduktion til selve brugen af beslutningsstøttesystemet. Helt overordnet kan dog siges, at der startes med valg af dæktype (traktor- eller vogndæk), dækmærke (fabrikat) og dækdimension. Dette dæk vil så blive vist med en 'medium' hjullast og det anbefalede dæktryk. Det er dernæst muligt at variere hjullast ud fra en rullemenu. Og tilsvarende kan effekten af dæktrykket studeres ved at variere dette (Figur 29).

Beskrivelsen af prediktionsligningerne og valideringen af a - og A -parametrene i de foregående afsnit har klart vist, at de bud på trædeflade og stressfordeling over denne, der fremkommer for dæk, der ikke har været med i denne undersøgelse, er behæftet med en vis usikkerhed. Værktøjet bør derfor alene anvendes til at finde overordnede tendenser, herunder ikke mindst til en illustration af den ganske markante effekt, dæktrykket har på stress i trædefladen. Forfatterne af denne rapport, der også står bag online beslutningsstøttesystemet, kan ikke tage ansvar for følgevirkninger af fejlagtige konklusioner eller forkert tolkning af resultaterne i JORDVÆRN online.



Foto 12. Øjebliksbilleder fra feltarbejdet (øverst; f.eks. trækvogn med dataopsamlingsudstyr), samt udvalgte spor efter testhjulet (nederst) ved ~60 kN hjullast og anbefalet dæktryk. Fra venstre mod højre ses Euroband, Nokian 800 samt Michelin Xeobib. Billedet af Nokian sporet stammer fra en lerjord, mens de to øvrige er fra testarealet med alle de øvrige test.

Snapshots from the field work including the small trailer with the data acquisition system (top), and selected wheel tracks from the test series, all with a wheel load of ~60 kN and recommended tyre inflation pressure (bottom). From left to right: Euroband, Nokian 800 and Michelin Xeobib. The Nokian track is from a loamy soil, while the two others belong to the measurement series described in this report.

Andre effekter og fremtidige tiltag

Arbejdet præsenteret i nærværende rapport må betragtes som et første step mod en mere kvantitativ viden om de forhold, der bestemmer kræfterne i trædefladen mellem hjul og jord. Der er behov for belysning af en lang række andre faktorer end dem, vi har kunnet inddrage i dette projekt.

Vi valgte i vores undersøgelser at foretage testene ved en forholdsvis lav hastighed (~2 km pr. time). Dette er lavt selv i relation til de fleste trafiksituationer i marken. Årsagen var ønsket om at øge nøjagtigheden ved testene (herunder fremkørsel nøjagtig midt over det nedgravede 'batteri' af krafttransducere). En anden årsag var ønsket om at reducere 'bump' fra vognhullet. Det er velkendt, at ujævnheder i marken kan få køretøjer på især lavtryksdæk til at hoppe op og ned,- herunder at 'gå i selvsving'. Noget sådant ville øge den stokastiske variation og dermed mindske muligheden for at udrede de effekter, som vi gik efter.

I forbindelse med de indledende test blev gennemført målinger ved 3 forskellige hastigheder: ~2, ~3 og ~6 km pr. time. Resultaterne viste, at der i denne spændvidde af hastigheder ikke var signifikant effekt af hastigheden på nogen af de parametre, der er diskuteret i rapporten (resultaterne ikke vist). Dette udelukker ikke, at en hastighedseffekt vil kunne forekomme ved højere hastigheder, muligvis især ved kørsel på bearbejdet jord. Dette aspekt bør undersøges i fremtidige projekter.

Det tidligere omtalte, sideløbende Forskningsrådsprojekt omfattede målinger på en lerjord. På denne jord blev der også foretaget et mindre antal målinger af stress i kontaktfladen hjul-jord. Disse målinger blev foretaget på både tør og våd jord. En foreløbig variansanalyse, der også inddrog data fra den lerblandede sandjord ved Forskningscenter Foulum, viste signifikante forskelle mellem de 3 test-konditioner. Lerjorden under tørre forhold skilte sig noget ud i forhold til de to andre testkonditioner. Bl.a. måltes signifikant lavere trædefladeareal og markant (og ligeledes signifikant) højere spidsbelastninger og 'niveauer' af maksimal stress i trædefladen. Der er således meget stærke indikationer på, at jordens konsistens (forskellige kombinationer af jordtype, vandindhold og bearbejdningsgrad af de øvre jordlag) har stor betydning for stressfordelingen i trædefladen. Der er derfor brug for yderligere undersøgelser.

De netop nævnte resultater diskvalificerer på sin vis prediktionerne, der kan vises i det beskrevne online beslutningsstøttesystem, 'JORDVÆRN online', idet dette alene baserer sig på målinger på en ret sandet jord og kun ved eet vandindhold. En generation II af 'JORDVÆRN online' skulle gerne inddrage jordtype og vandindhold. En forudsætning for denne udvidelse er for det første ovennævnte udvidede målinger af stressfordeling i trædefladen. Desuden er der behov for at få en grundigere validering af Söhne-modellen for både våde og tørre forhold. Som nævnt er dette arbejde allerede i gang i et Forskningsrådsprojekt. Endelig er der et meget akut behov for at få kvantificeret jordens styrke for forskellige jordtyper og ved forskellige vandindhold. Under forudsætning af et således opdateret grundlag vil en ny generation af 'JORDVÆRN online' kunne blive et reelt beslutningsstøttesystem, der kan vejlede landmanden med henblik på trafik i marken i helt specifikke situationer.

Konklusioner og anbefalinger

Det gennemførte arbejde har givet en mængde ny viden vedrørende de kræfter, der virker i kontaktarealet mellem hjul og jord. Vores resultater viser først og fremmest, at stressfordelingen i trædefladen langt fra er jævn. Analysen af denne fordeling kan med fordel opdeles i to: i kørselsretningen og vinkelret på denne. Stressfordelingen i kørselsretningen kan beskrives med en såkaldt potens-funktion, mens fordelingen på tværs af dækket bedst beskrives med en sammensat eksponential-funktion. Selve trædefladearealet beskrives fint med en såkaldt superellipse.

Længden af trædefladen samt stressfordelingen i kørselsretningen påvirkes udover dækkets diameter først og fremmest af det relative dæktryk, der er forholdet mellem aktuelt og anbefalet dæktryk. Resultaterne viste, at dækkenes evne til at fordele stresset i kørselsretningen – uafhængigt af dækfabrikat – hænger direkte sammen med evnen til at øge kontaktlængden med jorden i kørselsretningen. Dækdimensioner og eventuelt ukendte egenskaber ved de forskellige fabrikater bestemte denne evne til udfladning i kørselsretningen.

Resultaterne viste, at stressfordelingen på tværs af dækket ligeledes var stærkt påvirket af dæktrykket. Ved højt dæktryk udviste de fleste dæk en såkaldt parabolisk stressfordeling, d.v.s. med en top af stress midt under dækket. Ved mindre dæktryk fandtes til gengæld hos mange dæk en såkaldt U-fordeling af stresset. Det vil sige, at der var to stresstoppe; en i hver side af dækket. Den mindste indflydelse på jorden findes ved en 'moderat to-top fordeling'. Det var vanskeligere at finde de egenskaber ved dækkene, der bestemte stressfordelingen på tværs af dækket, end det var tilfældet for stressfordelingen i kørselsretningen.

Det teoretiske gennemsnitlige stress i trædefladen, der kan beregnes ved at dividere hjullasten med trædefladearealet, var oftest mindre end dæktrykket. Det betyder, at dækket ikke fungerer som en ideel, fleksibel 'ballon'. Niveauet af maksimalt stress under et dæk fandtes generelt (på tværs af dækfabrikater, hjullast og relative dæktryk) at være ca. 50 kPa (0.5 bar) over dæktrykket. Vi målte altid spidsbelastninger i punkter i trædefladen, der var større end det generelle maksimale stress. Disse spidsbelastninger var generelt ca. 100 kPa (1 bar) over dæktrykket. Både dæktrykket og især det teoretiske gennemsnitlige trædefladestress er således dårlige indikatorer af de kræfter, der virker i kontaktfladen hjul-jord. Selv om det generelle max-niveau af stress er lavere end de målte spidsbelastninger, er det førstnævnte, der er mest relevant i relation til effekten på jorden blot nogle få centimeter under selve kontaktstedet. En vigtig og samtidig enkel tommelfingerregel til vurdering af et dæks indflydelse på de øvre jordlag er derfor: stresset under dækket er $\frac{1}{2}$ bar over dæktrykket.

Ud fra målingerne og beregningerne på stressfordelingen kan der laves estimater for stress-transmissionen ned gennem jordprofilen. Dette projekt har ikke gennemført målinger af stress i jordprofilen og det følgende er derfor rekommendationer, der – ud over de målte data – baserer sig på gyldigheden af en model for stress-transmission gennem jordprofilen. Det store datamateriale gav grundlag for at formulere en såkaldt 8-8 regel. Denne udtrykker, at dybden for 50 kPa stress vil stige med 8 cm for hver ton forøgelse af hjullasten og tilsvarende med 8 cm for hver fordobling af dæktrykket. En foreløbig validering på et mindre

datamateriale bekræftede dens forudsigelser. Hvis man ønsker at friholde jorddybder under 50 cm for stress over 50 kPa (*50-50 kravet*) indebærer 8-8 regelen, at selv gode lavtryksdæk (50 kPa dæktryk) ikke bør belastes med over ca. 3.5 tons. Dæk med 100 kPa dæktryk bør ikke belastes med over 2.5 tons. Disse fremskrivninger af vores resultater fører altså til en bekræftelse af tidligere fremsatte anbefalinger om maksimalt ca. 6 tons akselbelastning.

Der er behov for mere omfattende målinger til bekræftelse af den fremsatte 8-8 regel. Ligeledes er der et endog meget stærkt behov for en fastlæggelse af det kritiske stress-niveau, der forårsager deformation af jorden. Indtil denne øgede viden er indhentet er det vores opfattelse, at 8-8 regelen og 50-50 kravet er et godt udgangspunkt for vurdering af, hvilken trafik på landbrugsjord, der er bæredygtig,- i både overført og direkte betydning.

Erkendtlighed

Dette arbejde blev finansieret dels af Fødevareministeriets såkaldte Innovationsmidler og dels af Danmarks JordbrugsForskning. Et sideløbende projekt under Forskningsrådet for Teknologi og Produktion muliggjorde bedre måle- og dataopsamlingssystemer, end det ellers ville have været muligt at udvikle i Innovationsprojektet. Vi takker Poul Hummelshøj og Mike Courtney, MetSupport ApS, for udvikling af et meget stabilt og superhurtigt dataopsamlingssystem. Per Drøschner og Flemming Steffensen stod for opbygning af transducerbatteriet henholdsvis det elektroniske forstærkersystem, og Finn Christensen koordinerede dette arbejde. Johan Arvidsson fra Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) stillede den specialfremstillede testvogn til rådighed for undersøgelserne. Peter Nyrup fra Forskningscenter Foulum's værksteder foretog en ombygning og forstærkning af vognen, der tillod at teste de højeste hjullaster. Nordisk Dæk Import A-S stillede de 6 af dækkene til rådighed, mens Sørensen og Lynggaard A/S udlånte traktor til at trække testvognen. Stig T. Rasmussen og Michael Koppelgaard ydede et meget stort arbejde i forbindelse med gennemførelse af det store måleprogram på forsøgsmarken ved Foulumgaard. Personalet på Foulumgaard takkes for hjælp ved udpegning af forsøgspareller samt teknisk assistance ved dækskift mm. Vi takker også Michael Koppelgaard for en uvurderlig hjælp med avanceret håndtering af de 'rå' data fra måleserierne. Thomas Keller fra SLU gav stor inspiration til tolkning af data. Vi takker Prof. Emer. Inge Håkansson fra SLU og seniorforsker Hans Jørgen Olsen, DJF-Bygholm, for værdifulde kommentarer til manuskriptet. Per Hejndorf, Dansk Landbrugsrådgivning (Landscentret), opbyggede web-siden, der huser beslutningsstøttesystemet JORDVÆRN online. Endelig en stor tak til Anne Sehested for den tekniske redigering af den endelige rapport.

Færdigt arbejde!
Efter måneders forberedelse
og en lang, intens måle-
kampagne er alle data i hus.



Litteratur

- Alakukku, L., 2000. Response of annual crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. I: Horn, R., van den Akker, J.J.H. & Arvidsson, J. (eds) *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*. Advances in GeoEcology 32, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 205-208.
- Arvidsson, J. & Keller, T., 2004. Soil pre-compression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* 77, 85-95.
- Boussinesq, J., 1885. *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et des mouvements des solides élastiques*. Gauthier-Villars, Paris, 30 pp.
- Burt, E.C., Wood, R.K. & Bailey, A.C., 1992. Some comparison of average to peak soil-tire contact pressures. *Transactions of the ASAE* 35, 401-404.
- Diserens, E., 2006. Calculating the contact area of farming trailer tyres in the field. *Proceedings, 17th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization*, Kiel, Germany, 27. August – 1. September 2006, 270-276.
- Djurhuus, J. & Olesen, J.E., 2000. Characterization of four sites in Denmark for long-term experiments on crop rotations for organic farming. *DIAS Report Plant Production* 33, Danish Institute of Agricultural Sciences, Tjele, Denmark, 74 pp.
- Etana, A., & Håkansson, I., 1994. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle loads. *Soil & Tillage Research* 29, 167-172.
- Febo, P., Lucarrelli, F. & Pessina, D. 2000. Soil-tyre interaction parameters influencing soil compaction: a study of contact area prediction models. I: *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences* (Horn R; van den Akker J; Arvidsson J, eds). *Advances in Geoecology*, Vol. 32, Catena Verlag, Reiskirchen, pp 191-201.
- Fleige, R., Horn, R., & Stange, F., 2002. Soil mechanical parameters derived from the CA-database *Subsoil compaction*. I: Pagliai, M. & Jones, R. (eds) *Sustainable Land Management – Environmental Protection: a Soil Physical Approach*. *Advances in GeoEcology* 35, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 359-366.
- Fröhlich, O.K., 1934. *Druckverteilung im Baugrunde* [Pressure distribution in foundation soils]. Springer Verlag, Wien.
- Gysi, M., Maeder, V. & Weisskopf, P., 2001. Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. *Transactions of the ASAE* 44, 1385-1389.
- Hallonborg, U., 1996. Super ellipse as tyre-ground contact area. *Journal of Terramechanics* 33, 125-132.
- Håkansson, I., 1994. Subsoil compaction caused by heavy vehicles – a long-term threat to soil productivity. *Soil & Tillage Research* 29, 105-110.
- Håkansson, I., 2000. *Packning av åkermark vid maskindrift. Omfattning – effekter – motåtgärder*. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Markvetenskap, Rapporter från Jordbearbetningsavdelningen 99 (ISSN 0348-0976), 123 pp.
- Håkansson, I., 2005. *Machinery-induced compaction of arable soils. Incidence – consequences – counter-measures*. Swedish University of Agricultural Sciences,

- Department of Soil Sciences, Reports from the Division of Soil Management 109 (ISSN 0348-0976), 153 pp.
- Håkansson, I. & Danfors, B., 1981. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. Proceedings 7th International Conference of ISTVS, 16-20 August, Calgary, Ab., Canada, Int. Soc. For Terrain-Vehicle Systems (ISTVS), Hanover, NH, USA.
- Håkansson, I. & Reeder, R.C., 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research* 29, 277-304.
- Jacobsen, O., 1989. Umættet hydraulisk ledningsevne i nogle danske jorde. Metode og jordtypekarakterisering. Tidsskrift for Planteavl's Specialserie, Beretning nr. S-2030, 60 pp.
- Jørgensen, M.H., Nielsen, P.S. & Lund, H., 2003. Sammenlignende test vedrørende energiforbruget ved forskellig dækmontering på gylle- og entreprenør/landbrugsvogn. Testrapport 950, Danmarks JordbrugsForskning, Afd. f. Jordbrugsteknik. ISSN 1398-0416, 8 pp.
- Keller, T., 2004. Soil Compaction and Soil Tillage – Studies in Agricultural Soil Mechanics. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria* 489. Ph.D.-thesis. 75 pp.
- Keller, T., 2005. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering* 92, 85-96.
- Keller, T. & Arvidsson, J., 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79, 191-205.
- Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J.B. & Koolen, A.J., 2004. Soil pre-compression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research* 77, 97-108.
- Keller, T., Défossez, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J. & Richard, G., 2007. *SoilFlex*: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research* (in press).
- Kirby, J.M., 1999. Soil stress measurement: I. Transducer in a uniform stress field. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72, 151-160.
- Koolen, A. & Kuipers, H., 1983. *Agricultural soil mechanics*. Springer, New York (USA).
- Lamandé, M., Schjønning, P., Dröschner, P., Steffensen, F.S.F., Rasmussen, S.T. & Koppelgaard, M., 2006a. Measuring vertical stress and displacement in two dimensions in soil during a wheeling event. Proceedings, 17th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Kiel, Germany, 27. August – 1. September 2006, 293-297.
- Lamandé, M., Schjønning, P. & Tøgersen, F.A., 2006b. Tests of basic aspects of stress transmission in soil. Proceedings, 17th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Kiel, Germany, 27. August – 1. September 2006, pp 252-257.
- Lebert, M., 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit vor Ackerböden. *Bayreuther Bodenkundliche Berichte*, Vol 12, 131pp + appendices.

- Lebert, M., 2006. Soil physical components of a soil protection strategy against compaction. Proceedings, 17th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Kiel, Germany, 27. August – 1. September 2006, pp 1621-1626.
- Lebert, M. & Horn, R., 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research* 19, 275-286.
- Munkholm, L.J., Schjønning, P. & Rügge, K., 2005a. Mitigation of subsoil recompaction by light traffic and on-land ploughing: I. Soil response. *Soil & Tillage Research* 80, 149-158.
- Munkholm, L.J., Schjønning, P., Jørgensen, M.H. & Thorup-Kristensen, K., 2005b. Mitigation of subsoil recompaction by light traffic and on-land ploughing: II. Root and yield respons. *Soil and Tillage Research* 80, 159-170.
- NDI, 2006. Databog dæk. Traktor – landbrug – industri. Nordisk Dæk Import A-S, Brørup.
- Nissen, B., 1999. Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland – bodenphysikalischer Ansatz. Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Vol. 50, 159pp + appendices.
- Olsen, H.J., 1994. Calculation of subsoil stresses. *Soil and Tillage Research* 29, 111-123.
- Perdok, U.D. & Terpstra, J., 1983. Berijdbaarheid van landbouwgrond: Bandspanning en bodemverdichting. *Landbouwmecaniasatie* 34, 363-366.
- Petelkau, H., 1984. Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenenertrag sowie Massnahmen zu ihrer Minderung. Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Replublik 227, 25-34.
- R Development Core Team, 2005. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Raper, R.L., Bailey, A.C., Burt, E.C., Way, T.R. & Liberati, P., 1995. Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses. *Transactions of the ASAE* 38, 685-689.
- Rosin, P.L. & West, G.A.W., 1995. Curve segmentation and representation by superellipses. *IEE-Proc.- Vis. Image Signal Process.* 142, 280-288.
- Rusanov, V.A., 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. *Soil & Tillage Research* 29, 249-252.
- SAS Institute, 1996. SAS Institute SAS/STATTM Software: Changes and Enhancements Through Release 6.11. SAS Institute Cary NC.
- Schjønning, P. & Rasmussen, K.J., 1994. Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil & Tillage Research* 29, 215-227.
- Schjønning, P., Munkholm, L.J., Elmholt, S., Debosz, K., Mikkelsen, G.H. & Trautner, A., 2000. Den danske dyrkningsjords tilstand og kvalitet – konsekvenser af trafik og jordbearbejdning. *Tidsskrift for Landøkonomi* 4/00, 293-300.
- Schjønning, P., Elmholt, S., Munkholm, L.J. & Debosz, K., 2002. Soil quality aspects of humid sandy loams as influenced by organic and conventional long-term management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88, 195-214.

- Schjønning, P., Lamandé, M., Tøgersen, F.A., Arvidsson, J. & Keller, T., 2007. Modelling Effects of Tyre Inflation Pressure on the Stress Distribution in the Soil-Tyre Interface. Biosystems Engineering (submitted).
- Schäfer-Landefeld, L. & Brandhuber, R., 2001. Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden – Ein tragfähiges Konzept? Bodenschutz 6, 48-50, 52, 104.
- Smith, D.L.O., 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. Journal of Soil Science 36, 621-632.
- Söhne, W., 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenformung unter Schleppereiffen. Grundlagen der Landtechnik 5, 49-63.
- Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engineering, May 1958, 276-281 + 290.
- Tijink, F.G.J., 1998. Mechanisation strategies to reduce traffic-induced soil compaction. Advances in Sugar Beet Research IIRB, Vol. 1, 57-66.
- Trautner, A., 2003. On soil behaviour during field traffic. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria 372. Ph.D.-thesis. 55 pp.
- Trautner, A. & Arvidsson, J., 2003. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. Soil & Tillage Research 73, 107-118.
- USSR State Committee for Standards, 1986. Standard 26955: Agricultural Mobil Machinery; Rates of Force by Propelling Agents on Soil. Moscow, USSR, 7 pp.
- Van den Akker, J.J.H., 1992. Stresses and required soil strength under Terra tires and tandem and dual wheel configurations. Proceedings International Conference on Soil Compaction and Soil Management, 8-12 June 1992, Tallinn, Estonia, pp. 23-26.
- Van den Akker, J.J.H., 2003. Prevention of subsoil compaction by using flotation tyres or tracks. CD-ROM Proceedings of the 16th Conference of the International Soil Tillage Research Organization, July 2003, Brisbane, Australia, pp. 1306-1312.
- Van den Akker, J.J.H. & Schjønning, P., 2004. Subsoil Compaction and Ways to Prevent It. I: Schjønning, P., Elmholt, S. & Christensen, B.T. (eds) Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 163-184.
- Vermeulen, G.D. & Perdok, U.D., 1994. Benefits of low ground pressure tyre equipment. I: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (eds) Soil Compaction in Crop Production. Elsevier, Amsterdam, pp. 447-478.
- Vermeulen, G.D., Arts, W.B.M. & Klooster, J.J., 1988. Perspectives of reducing soil compaction by using a low ground pressure farming system: selection of wheel equipment. Proceedings 11th Conference International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO), Edinburgh, UK. Scottish Centre Agricultural Engineering, Penicuik, UK, Vol. 1, pp. 329-334.
- Voorhees, W.B., 2000. Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. I: Horn, R., van den Akker, J.J.H. & Arvidsson, J. (eds) Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences. Advances in GeoEcology 32, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 331-338.

- Voorhees, W.B., Nelson, W.W. & Randall, G.W., 1986. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. *Soil Science Society of America Journal* 50, 428-433.
- Young, I.M. & Crawford, J.W., 2004. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex. *Science* 304, 1634-1637.

Beskrivelse af Appendiks

Appendiks A

Specifikke hjullaster anvendt for hvert enkelt test i marken.

Wheel loads of each specific test in the field.

Appendiks B

Kort beskrivelse af modellerne, der i rapporten anvendes til fitting af målte data for kontaktareal og stressfordelingen over dette. Modellen er udførligt beskrevet af Schjønning et al. (2007).

Short description of models for the contact area and the stress distribution across it. The model is described in detail by Schjønning et al. (2007).

Appendiks C

Figurer med målte og superellipse fittede omrids af trædefladen i alle test i marken. Kørselsretningen er 'nedefra og op' i figureerne. Parametrene a , b og n beskriver superellipsen (se Appendiks B). Dækkene er vist i rækkefølge med først vogndækkene Euroband, Nokian 560, Trelleborg Twin, Michelin Cargobib og Nokian 800, alle ~30 kN hjullast; dernæst de samme dæk ved ~60 kN hjullast; videre traktordækkene Michelin Xeobib og Kleber Topker, ~30 kN og ~60 kN; sluttelig de ekstra test med Cargobib og Nokian 800 ved lavt og højt dæktryk samt ved ~83 kN hjullast. Bemærk, at den høje hjullast i Appendikset er anført som det tilstræbte niveau på 90 kN selv om testene er gennemført med de eksakte hjullaster angivet i Appendiks A.

Figures with measured and super ellipse fitted contact area for all tests in the field. The driving direction is along the x-axis. The parameters a , b and n govern the super ellipse (see Appendix B). The results are reported in the following order of succession: Euroband, Nokian 560, Trelleborg Twin, Michelin Cargobib og Nokian 800, all at ~30 kN wheel load; next the same tyres at ~60 kN wheel load; next the tractor tyres Michelin Xeobib and Kleber Topker, ~30 kN and ~60 kN; and finally the extra tests with Cargobib and Nokian 800 at low and high inflation pressures and at ~83 kN wheel load. Notice that the high wheel load is labelled with 90 kN although we actually used the load given in Appendix A.

Appendiks D

Figurer med målte og model-fittede stressfordelinger over trædefladen. p_{spids} angiver den højst målte stress-top og p_{max} det modellfittede maksimum-stress i hvert enkelt test. Kørselsretningen er 'ind i figuren' (langs x-aksen). Rækkefølgen for præsentationerne er som i Appendiks C.

Figures with measured and model-fitted stress distributions across the contact area. p_{spids} is the maximum peak stress and p_{max} the model-fitted maximum stress level for each individual test. The driving direction is along the x-axis. The order of succession for the presentation of results is as in Appendix C.

Appendiks E

Söhne-predikteret stress under 5 dæk belastet med enten ~30 eller ~60 kN hjullast. Koncentrationsfaktoren i beregningerne var $\nu=5$. De vandrette, stiplede linier markerer 50 kPa isobarens største dybde.

Söhne-predicted stress below five tyres loaded with either ~30 or ~60 kN. The concentration factor in the calculations was $\nu=5$. The dotted lines indicate the maximum depth of the 50 kPa stress isobar.

Appendiks A: Specifikke hjullaster

Tabel A1. Specifik hjullast for hver kombination af dæktype, tilstræbt hjullast og dæktryk. Hjullasten er angivet i kN, der er beregnet ved multiplikation med tyngdeaccelerationen ($\sim 9.81 \text{ ms}^{-2}$) ud fra vægten i tons målt på brovægt.

Navn	Tilstræbt hjullast	Dæktryk	Hjullast
	kN	kPa	kN
Euroband SA 385/65R22.5	30	270	28.29
Euroband SA 385/65R22.5	60	550	57.22
Nokian ELS Radial 560/45R22.5	30	140	28.68
Nokian ELS Radial 560/45R22.5	60	340	57.66
Trelleborg TWIN 4004 700/50-26.5	30	50	29.62
Trelleborg TWIN 4004 700/50-26.5	60	130	58.20
Michelin CargoXbib 650/65R30.5	30	50	30.79
Michelin CargoXbib 650/65R30.5	60	50	59.43
Michelin CargoXbib 650/65R30.5	60	100	59.55
Michelin CargoXbib 650/65R30.5	60	240	59.67
Michelin CargoXbib 650/65R30.5	90	200	83.36
Nokian ELS Radial 800/50R34	30	50	30.84
Nokian ELS Radial 800/50R34	60	50	60.31
Nokian ELS Radial 800/50R34	60	100	60.31
Nokian ELS Radial 800/50R34	60	240	60.41
Nokian ELS Radial 800/50R34	90	200	83.36
Michelin XEOBIB 650/60R38	30	70	30.84
Michelin XEOBIB 650/60R38	60	200	59.82
Kleber Topker 650/75R38	30	50	31.87
Kleber Topker 650/75R38	60	140	60.61

Appendiks B:

Model for areal og stress-fordeling i kontaktfladen mellem hjul og jord

Det har vist sig, at periferien af kontaktfladen mellem jord og hjul kan beskrives ganske godt med en superellipse (Hallonborg, 1996; Febo et al., 2000; Keller, 2005). I et ortogonalt koordinatsystem med center i origo kan superellipsen beskrives

$$\left|\frac{x}{a}\right|^n + \left|\frac{y}{b}\right|^n = 1, \quad (B1)$$

hvor a og b er det halve af henholdsvis den mindste og den største af akserne, og n er et udtryk for superellipsens 'firkantethed'. Lad $\Omega = \{(x, y) | |x/a|^n + |y/b|^n \leq 1\}$ betegne afgrænsningen og det indre af super-ellipsen.

Fordelingen af den vertikale (lodrette) stress i kontaktfladen kan modelleres med følgende ligning B2, som er en kombination af ligningerne foreslået af Keller (2005) bortset fra, at vi har normaliseret ligningen med hensyn til data for både kontaktareal og stress niveau,

$$\sigma(x, y) = F_{hjul} C(\alpha, \beta, a, b, n) f(x, y) g(x, y) \quad \text{for } (x, y) \in \Omega \quad \text{og } 0 \text{ ellers} \quad (B2)$$

$$f(x, y) = \left\{ 1 - \left| \frac{x}{l_x(y)} \right|^\alpha \right\} \quad (B2a)$$

$$g(x, y) = \left\{ \left(1 - \left| \frac{y}{w_y(x)} \right| \right) \exp \left(-\beta \left(1 - \left| \frac{y}{w_y(x)} \right| \right) \right) / gm \right\} \quad (B2b)$$

hvor gm er maksimum værdien for funktionen g i området ($0 < y < w_y(x)$) udtrykt ved β :

$$\beta \leq 1: \quad gm = \exp(-\beta)$$

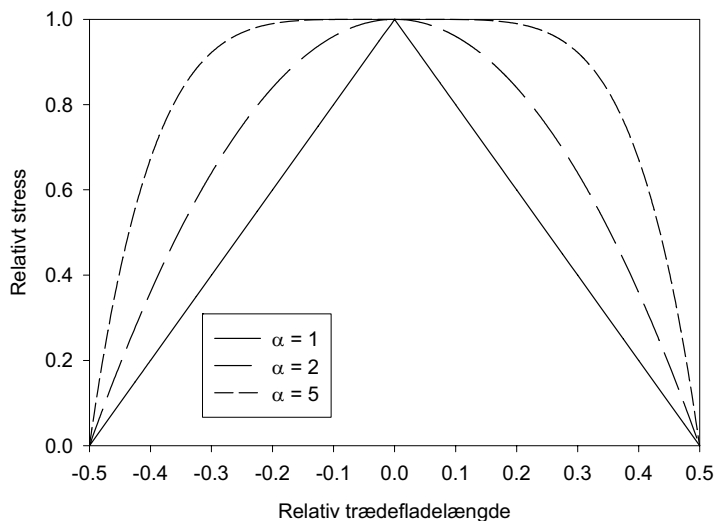
$$\beta > 1: \quad gm = \exp(-1)/\beta$$

F_{hjul} er hjullast, $C(\alpha, \beta, a, b, n)$ er en funktion af parametrene α , β , a , b , and n , som definerer en integrationskonstant, der sikrer, at når $\sigma(x, y)$ integreres over arealet Ω vil den totale hjullast være F_{hjul} . Videre er $l_x(y)$ den halve længde af kontaktfladen ved y i x -retningen, og $w_y(x)$ er den halve bredde ved x i y -retningen.

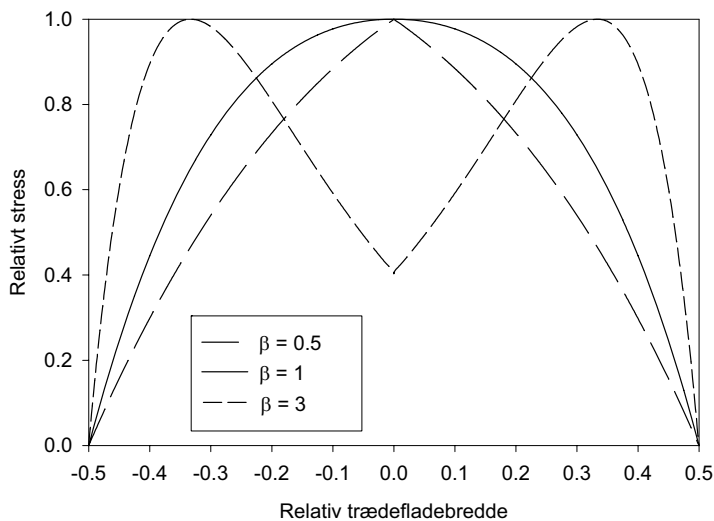
f -funktionen beskriver formen af stress-fordelingen i kørselsretningen, d.v.s. den relative stress som funktion af den relative halv-længde af kontaktfladen. g -funktionen giver samme virkning for retningen vinkelret på kørselsretningen (på tværs af hjulet). β svarer til den δ parameter, som Keller (2005) brugte i sin model bortset fra, at β – som α – er en 'ren' form parameter, der er uafhængig af dækdimensioner og stress niveauer.

Modellen er beskrevet mere detaljeret af Schjønning et al. (2007). Figur B1 og B2 viser modellens evne til at beskrive stress-fordelingen i kørselsretningen og på tværs af denne. Høje værdier af α indikerer en god evne til at fordele trykket i kørselsretningen, mens lave værdier betyder, at trykket primært ligger midt under akslen (Fig. B1). Situationen er lidt mere kompliceret på tværs af hjulet. Trykket vil være højest i midten af dækket for $\beta \leq 1$ og i dette område er toppen jo stejlere jo lavere β (Fig. B2). For $\beta > 1$ findes der to stress-toppe, som rykker længere mod kanten af hjulet jo højere værdier af β . Modellen er derfor i stand til at beskrive både såkaldte paraboliske stress-fordelinger og såkaldte U-fordelinger (se Gysi et al., 2001). Sidstnævnte er registreret i flere tilfælde, især for brede lavtryksdæk (Keller, 2005). Den ideelle stress-fordeling på tværs af dækket kan vises at forekomme ved en β i området

1.8-2.1 (Schjønning et al., 2007). Dette gælder dog kun for effekten i de øvre jordlag ($< \sim 0.5$ m). I dybere lag påvirkes stress-fordelingen ikke meget af β .



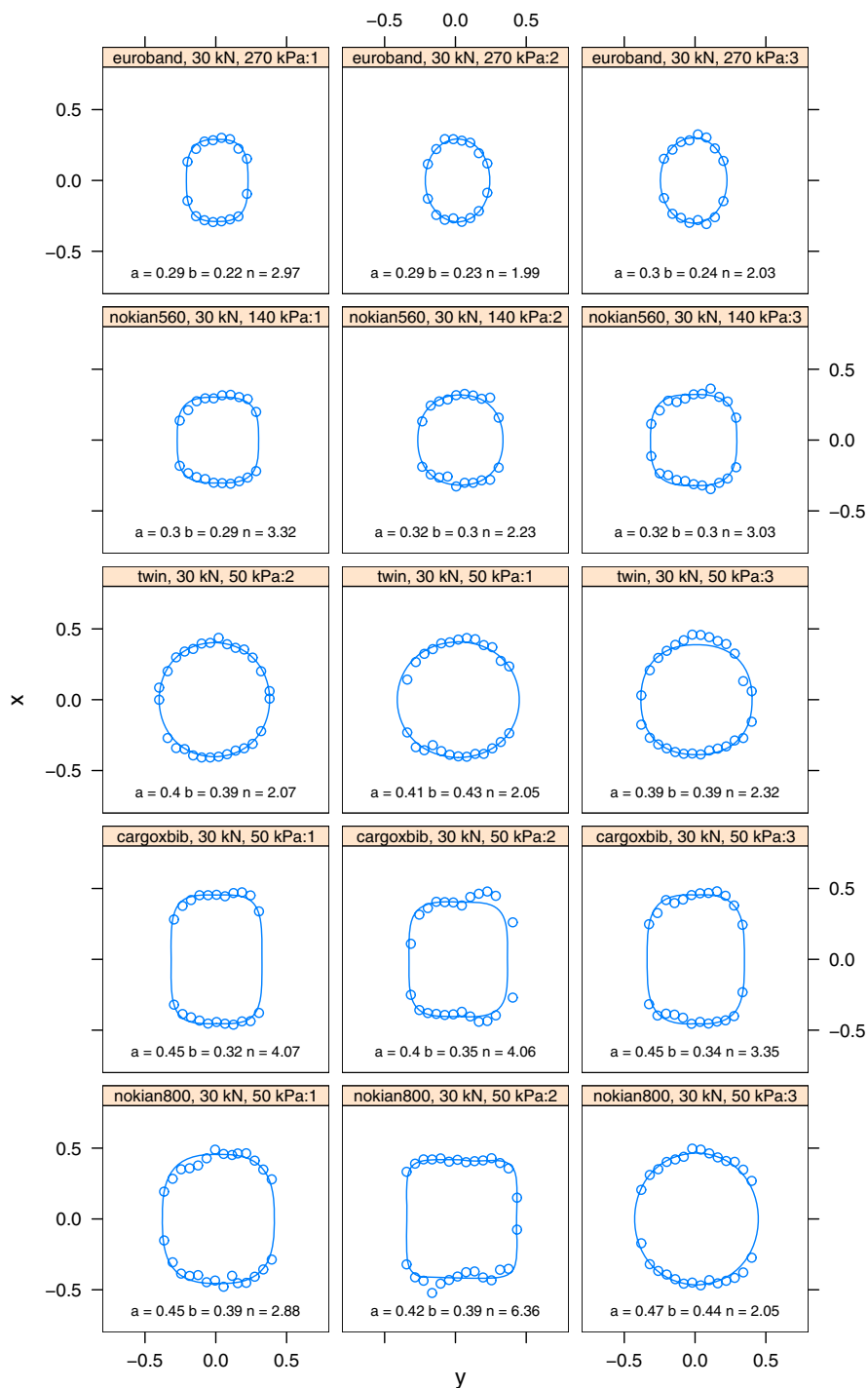
Figur B1. Principfigur, der viser den relative stressfordeling i køreretningen i relation til relativ trædefladelængde for forskellige værdier af formparameteren α . Beregnet fra ligning B2a.

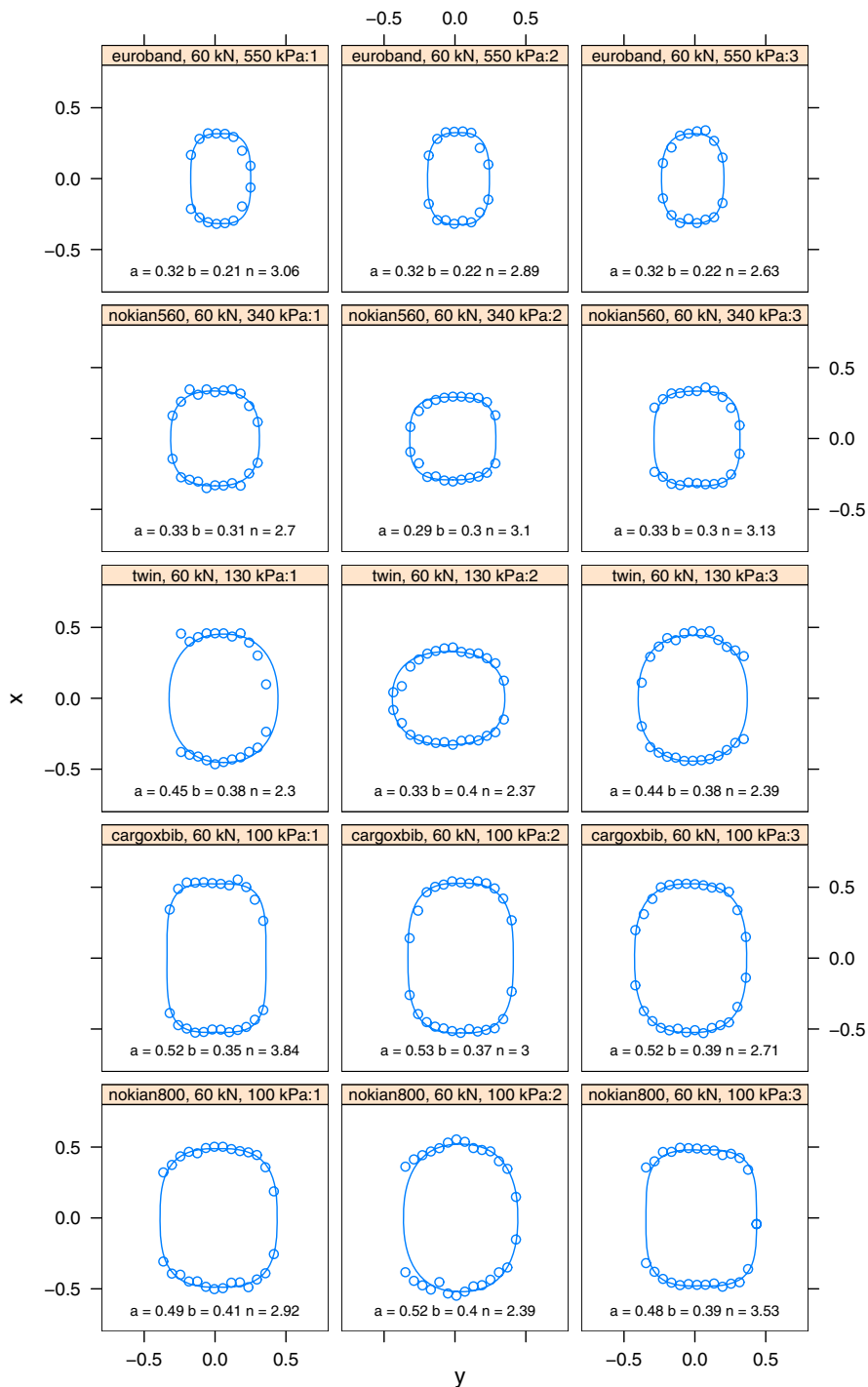


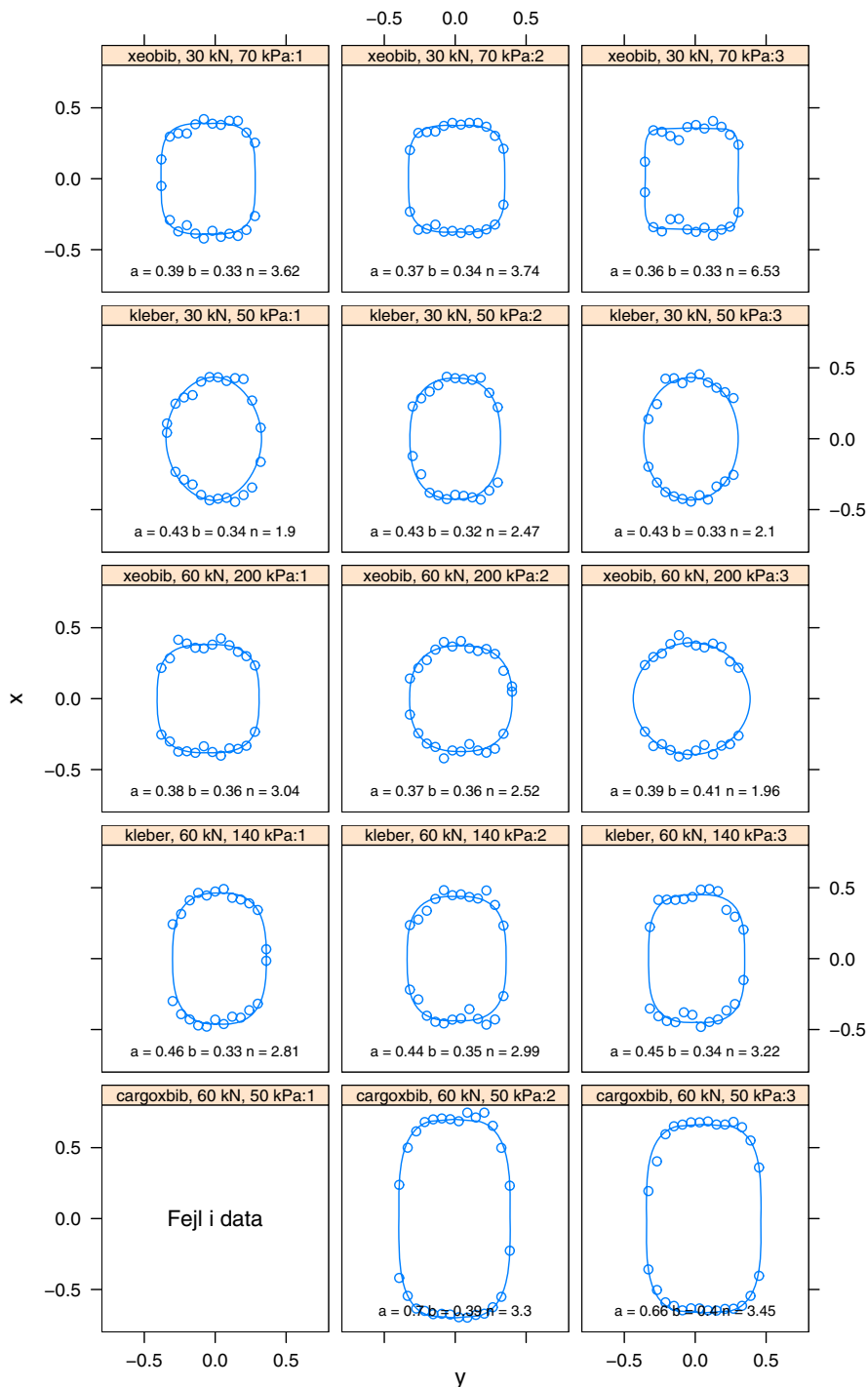
Figur B2. Principfigur, der viser den relative stressfordeling på tværs af dækket i relation til relativ trædefladebredde for forskellige værdier af formparameteren β . Beregnet fra ligning B2b.

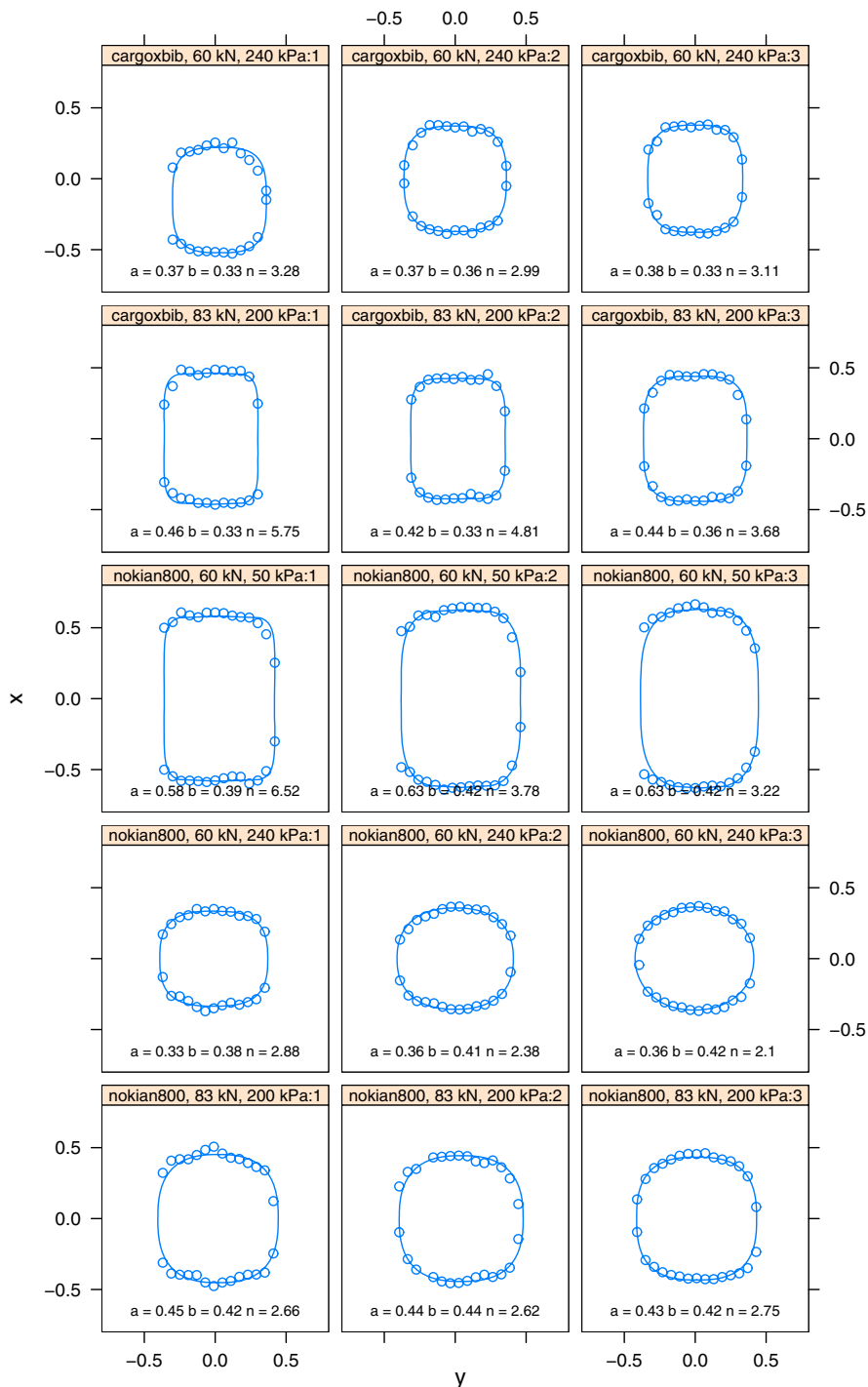
Appendiks C:

Målte og superellipse-estimerede konturer af trædeflader i alle tests





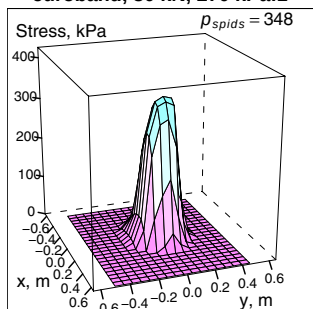




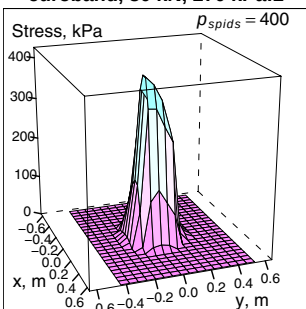
Appendiks D:

Målte og model-fittede stressfordelinger i trædefladen for alle tests

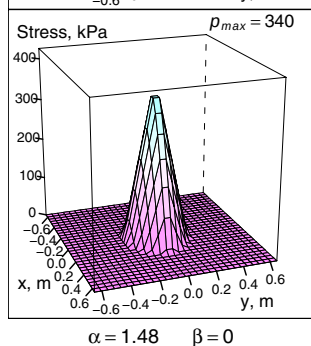
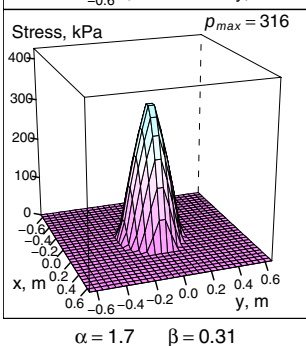
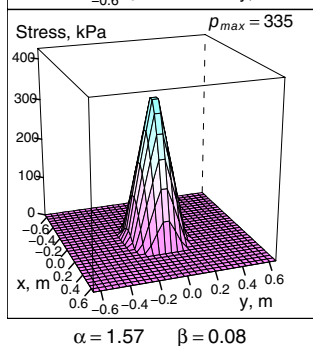
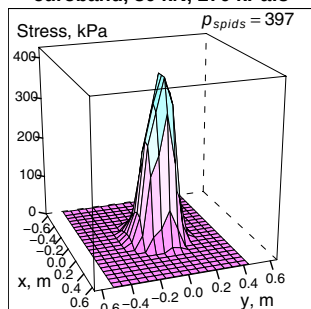
euroband, 30 kN, 270 kPa:1



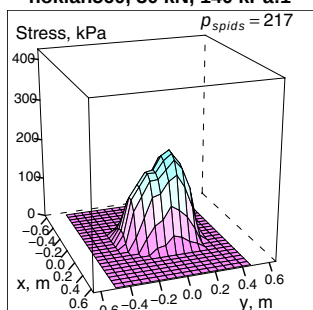
euroband, 30 kN, 270 kPa:2



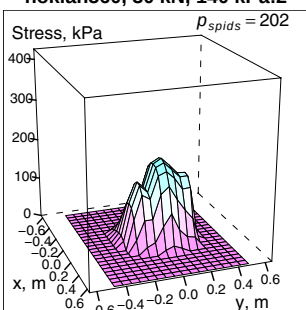
euroband, 30 kN, 270 kPa:3



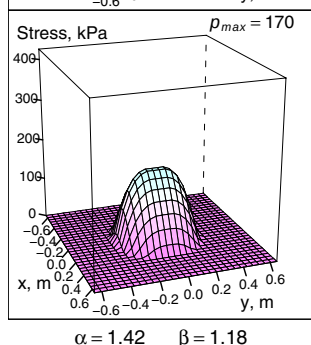
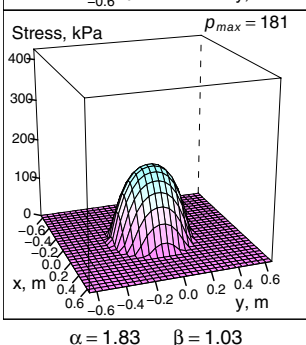
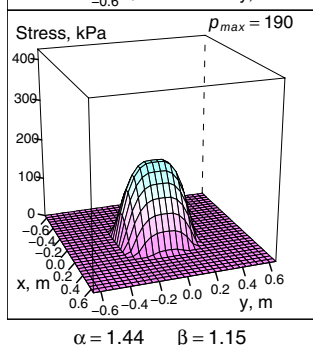
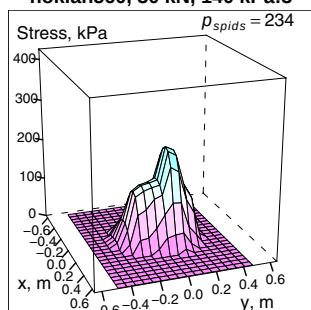
nokian560, 30 kN, 140 kPa:1

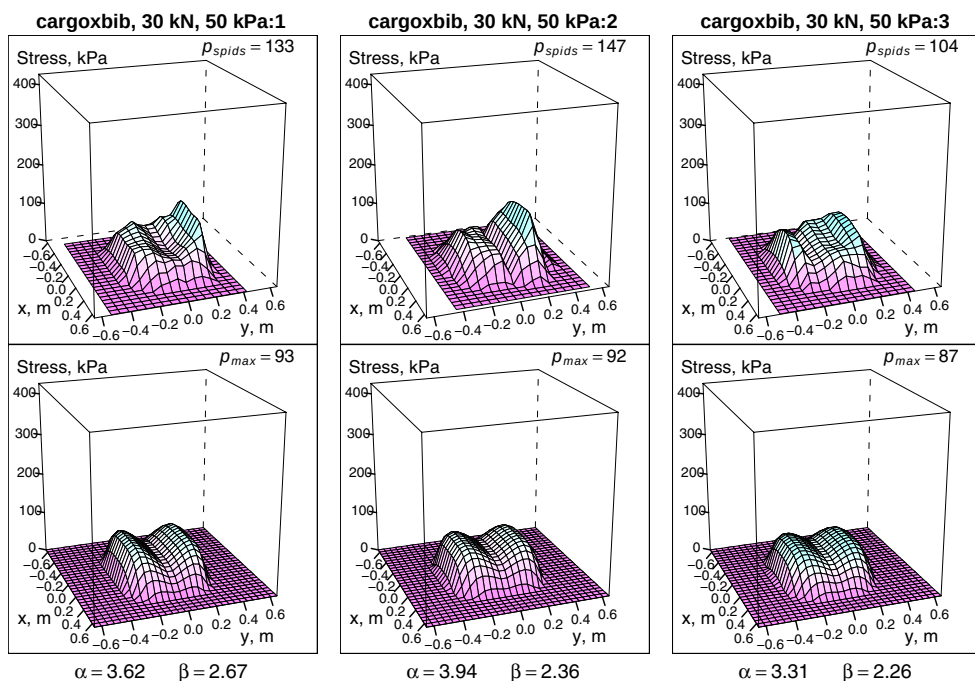
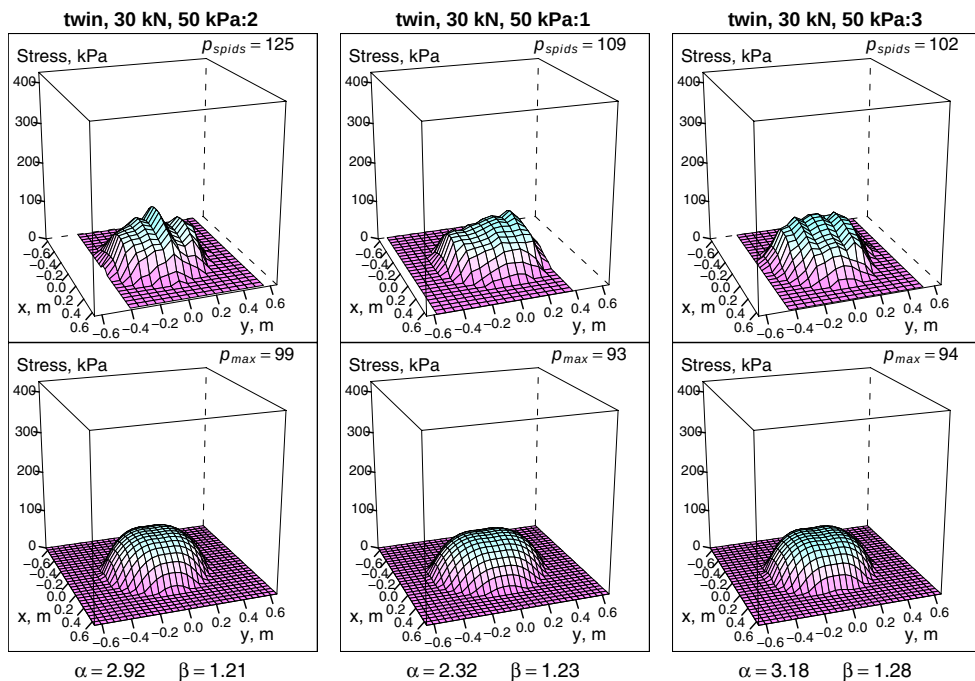


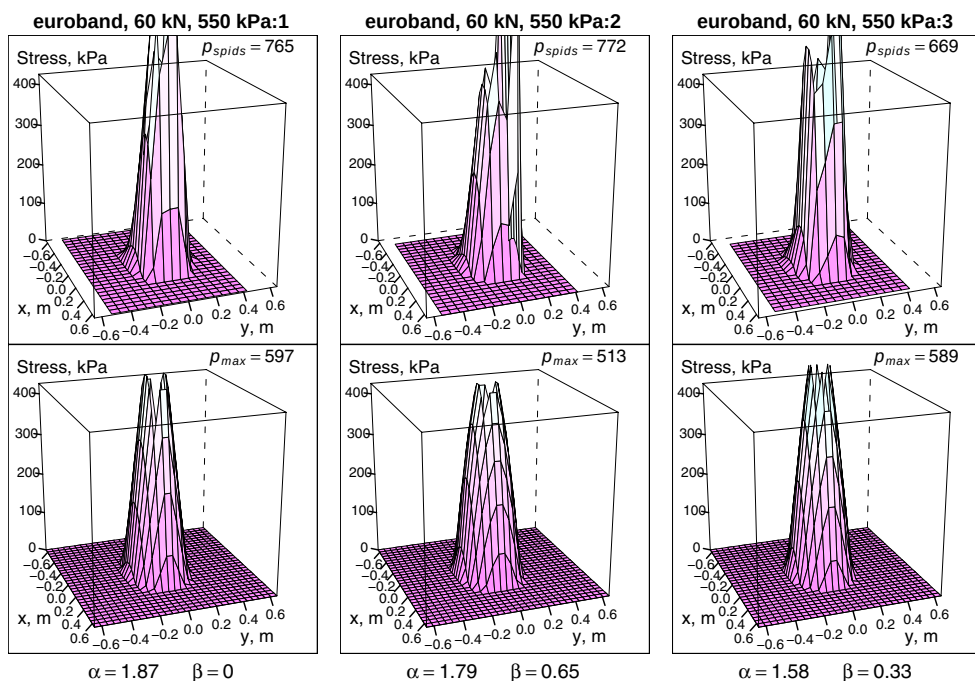
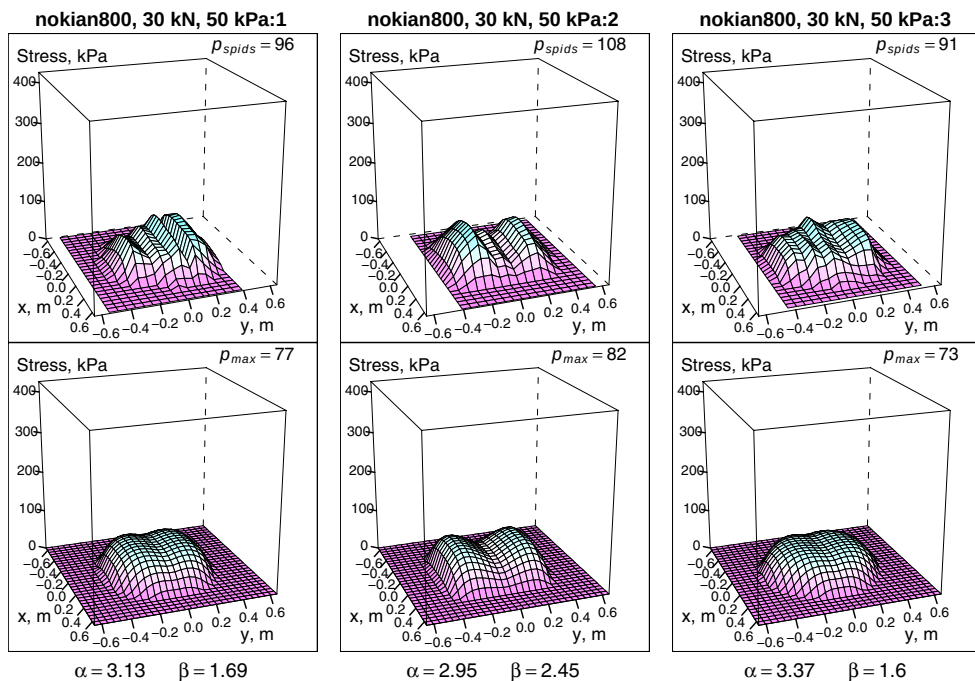
nokian560, 30 kN, 140 kPa:2



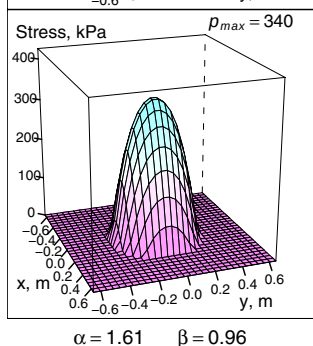
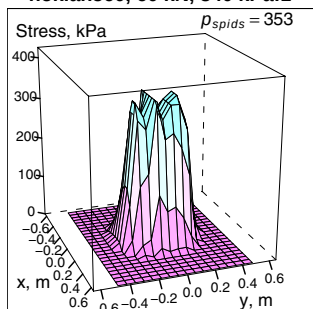
nokian560, 30 kN, 140 kPa:3



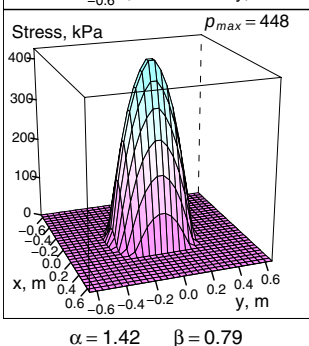
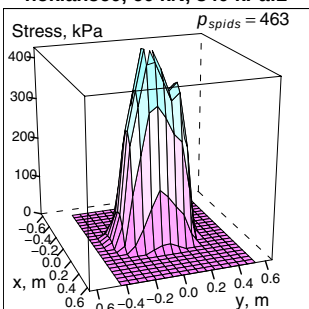




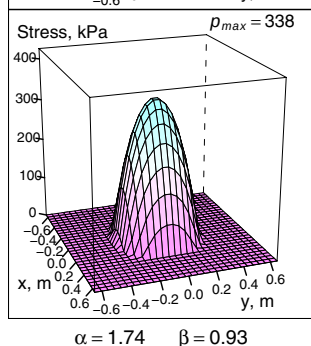
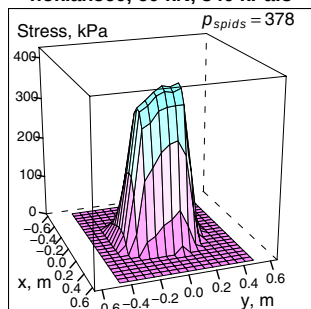
nokian560, 60 kN, 340 kPa:1



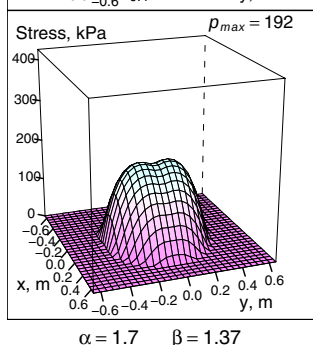
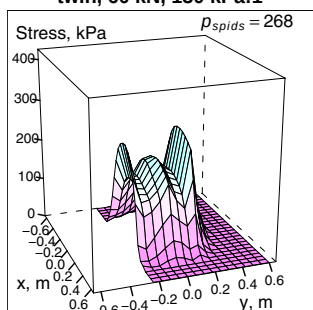
nokian560, 60 kN, 340 kPa:2



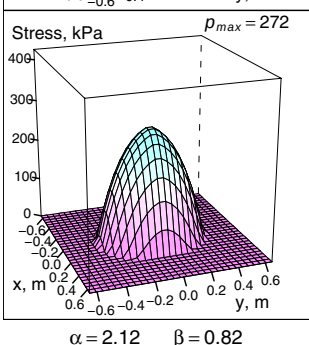
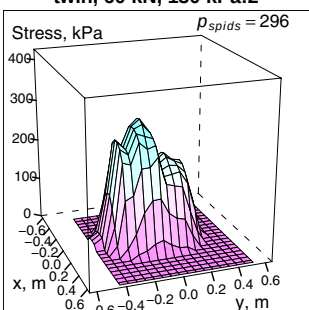
nokian560, 60 kN, 340 kPa:3



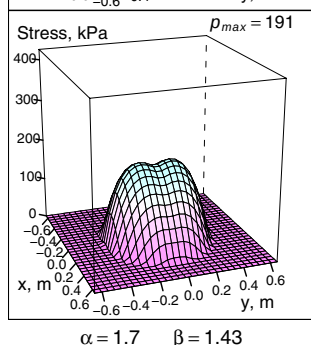
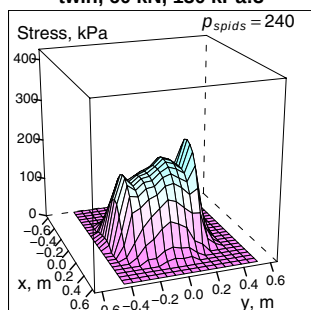
twin, 60 kN, 130 kPa:1



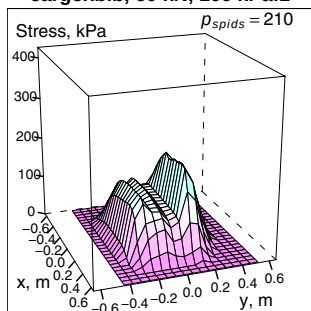
twin, 60 kN, 130 kPa:2



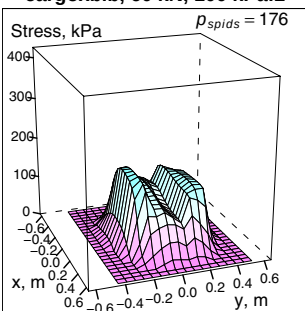
twin, 60 kN, 130 kPa:3



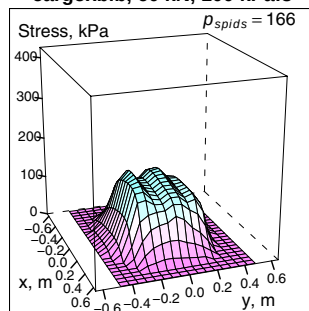
cargoxbib, 60 kN, 100 kPa:1



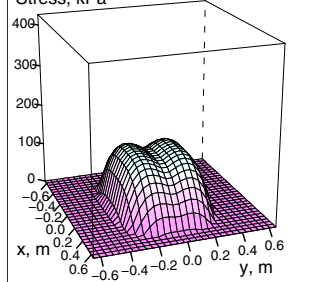
cargoxbib, 60 kN, 100 kPa:2



cargoxbib, 60 kN, 100 kPa:3

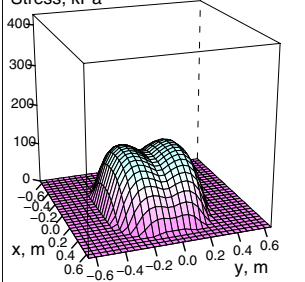


cargoxbib, 60 kN, 100 kPa:4



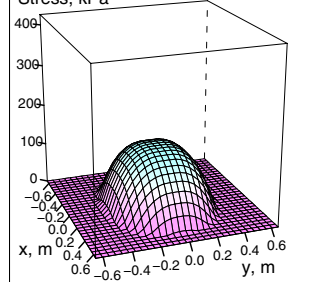
$\alpha = 3.02$ $\beta = 1.72$

cargoxbib, 60 kN, 100 kPa:5



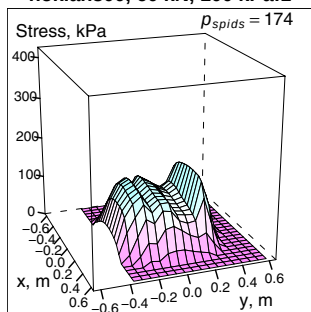
$\alpha = 2.54$ $\beta = 1.82$

cargoxbib, 60 kN, 100 kPa:6

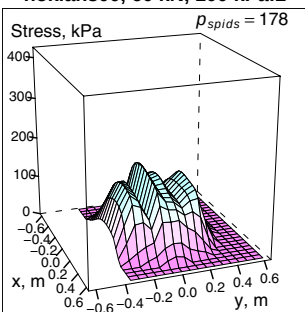


$\alpha = 2.47$ $\beta = 1.12$

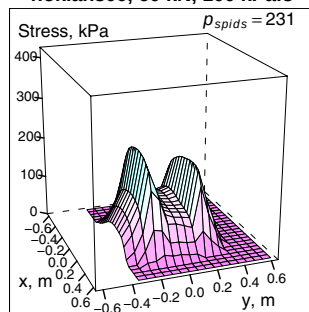
nokian800, 60 kN, 100 kPa:1



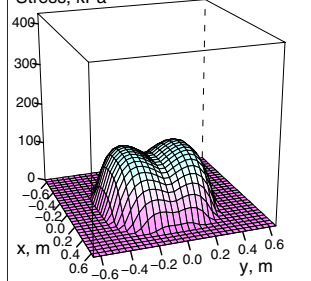
nokian800, 60 kN, 100 kPa:2



nokian800, 60 kN, 100 kPa:3

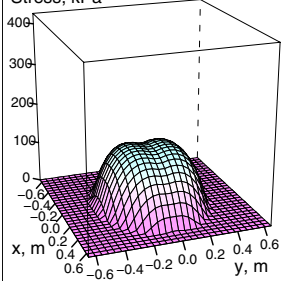


nokian800, 60 kN, 100 kPa:4



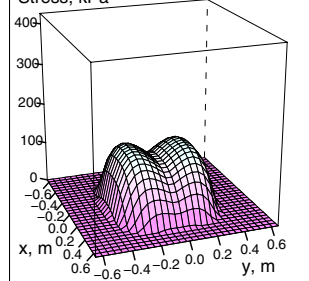
$\alpha = 2.78$ $\beta = 1.95$

nokian800, 60 kN, 100 kPa:5



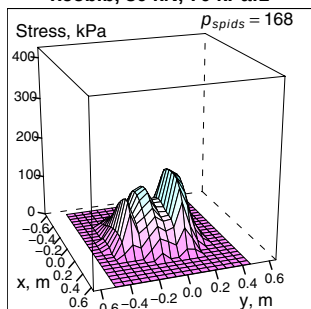
$\alpha = 2.51$ $\beta = 1.42$

nokian800, 60 kN, 100 kPa:6

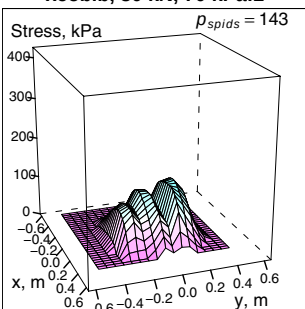


$\alpha = 2.8$ $\beta = 2.01$

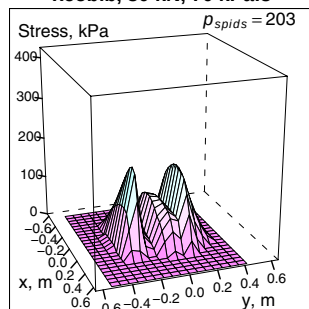
xeobib, 30 kN, 70 kPa:1



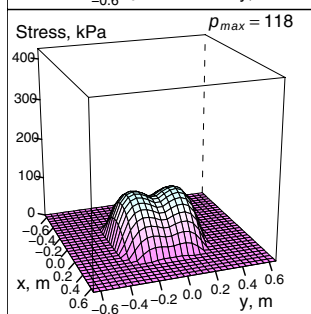
xeobib, 30 kN, 70 kPa:2



xeobib, 30 kN, 70 kPa:3

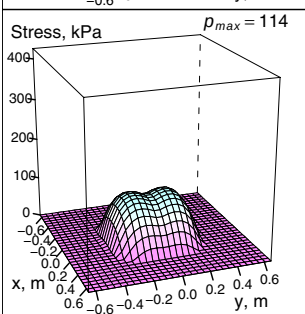


xeobib, 30 kN, 70 kPa:4



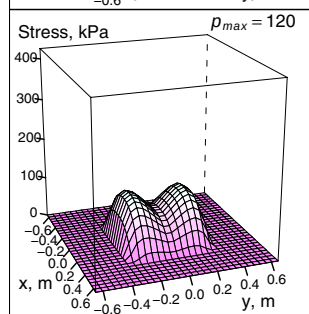
$\alpha = 1.89$ $\beta = 1.82$

xeobib, 30 kN, 70 kPa:5



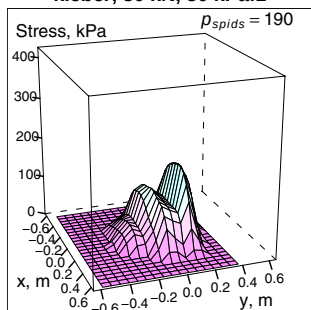
$\alpha = 2.24$ $\beta = 1.62$

xeobib, 30 kN, 70 kPa:6

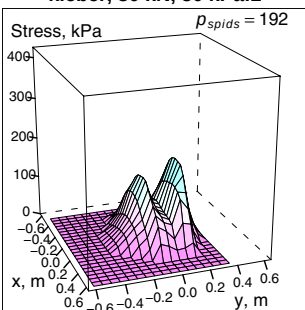


$\alpha = 2.55$ $\beta = 2.54$

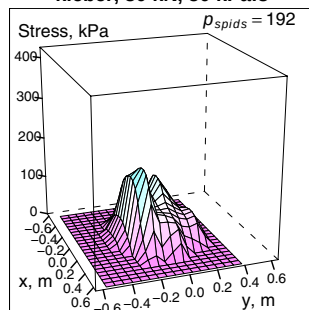
kleber, 30 kN, 50 kPa:1



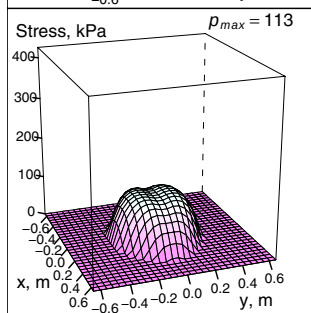
kleber, 30 kN, 50 kPa:2



kleber, 30 kN, 50 kPa:3

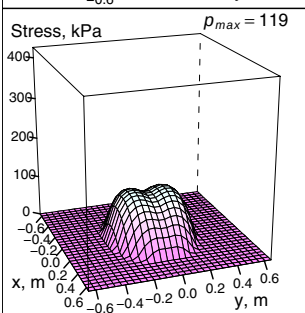


kleber, 30 kN, 50 kPa:4



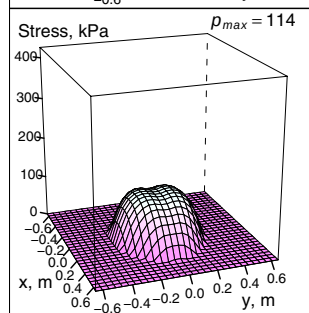
$\alpha = 2.88$ $\beta = 1.5$

kleber, 30 kN, 50 kPa:5



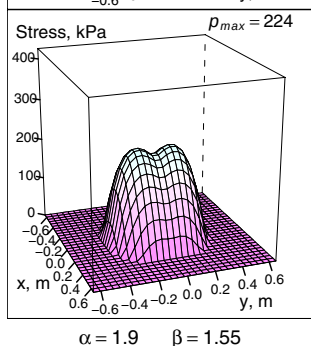
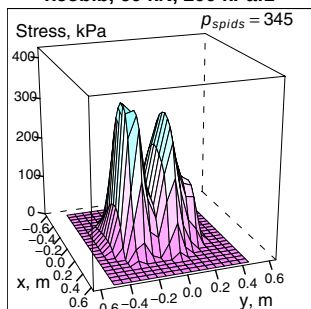
$\alpha = 2.16$ $\beta = 1.65$

kleber, 30 kN, 50 kPa:6

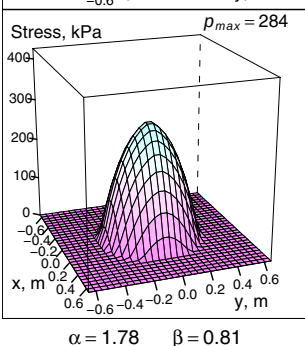
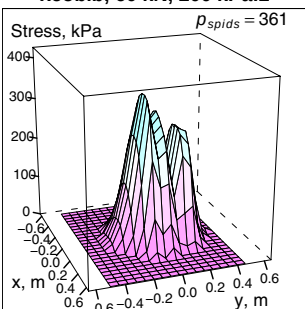


$\alpha = 2.53$ $\beta = 1.43$

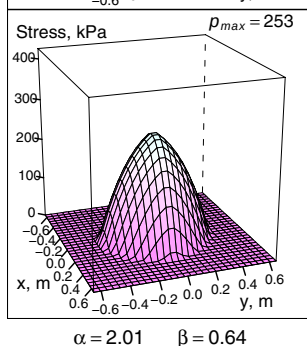
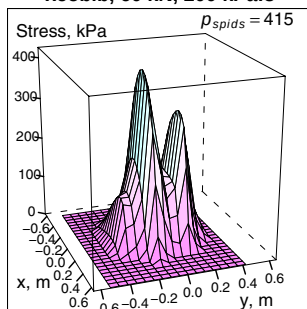
xeobib, 60 kN, 200 kPa:1



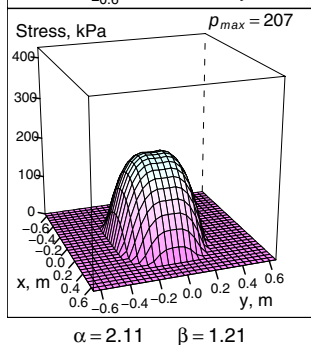
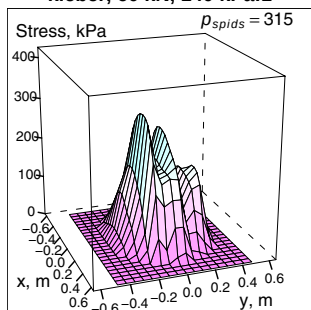
xeobib, 60 kN, 200 kPa:2



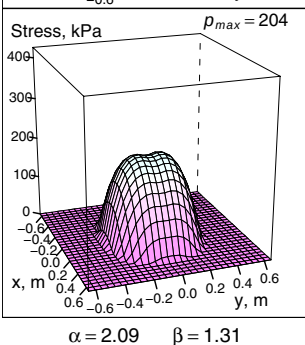
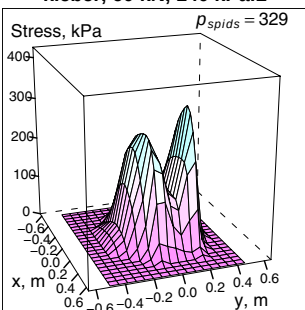
xeobib, 60 kN, 200 kPa:3



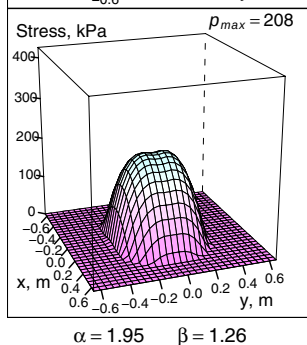
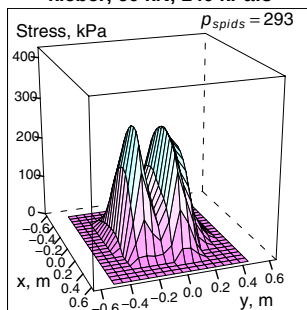
kleber, 60 kN, 140 kPa:1



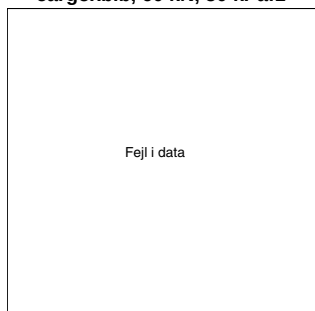
kleber, 60 kN, 140 kPa:2



kleber, 60 kN, 140 kPa:3

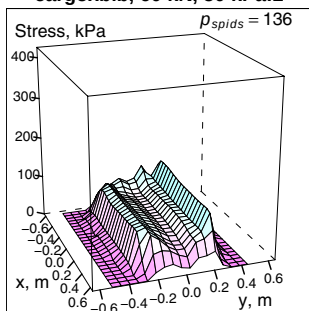


cargoxbib, 60 kN, 50 kPa:1



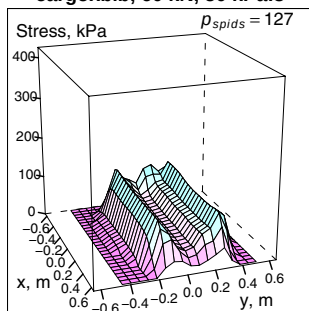
$$\alpha = 23.72 \quad \beta = 4.82$$

cargoxbib, 60 kN, 50 kPa:2

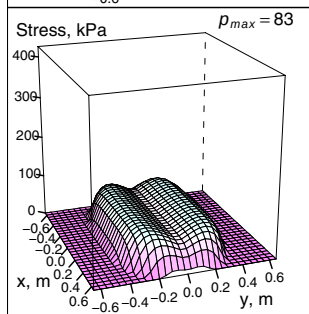
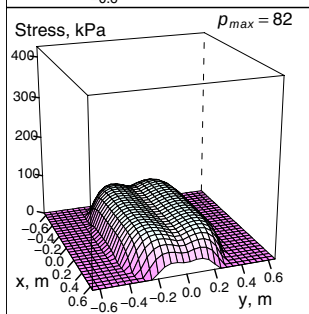


$$\alpha = 7.06 \quad \beta = 1.84$$

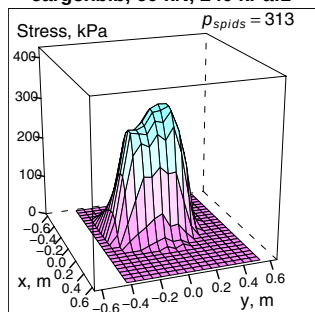
cargoxbib, 60 kN, 50 kPa:3



$$\alpha = 9.02 \quad \beta = 2.22$$

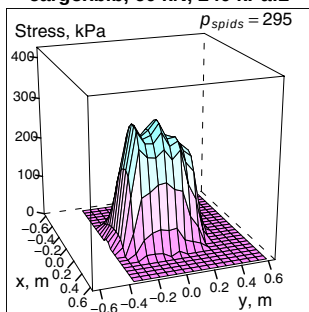


cargoxbib, 60 kN, 240 kPa:1



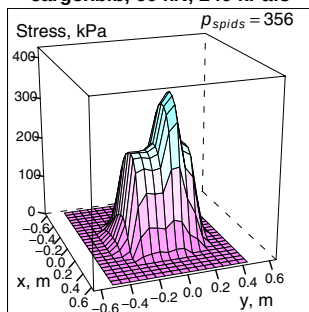
$$\alpha = 1.44 \quad \beta = 0.92$$

cargoxbib, 60 kN, 240 kPa:2

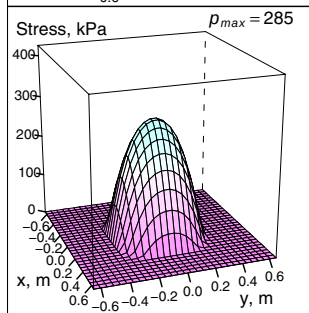
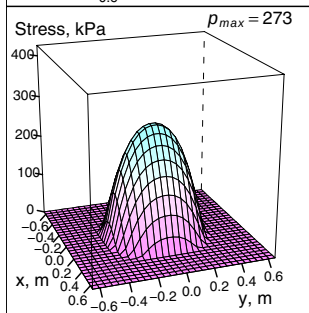


$$\alpha = 1.55 \quad \beta = 1$$

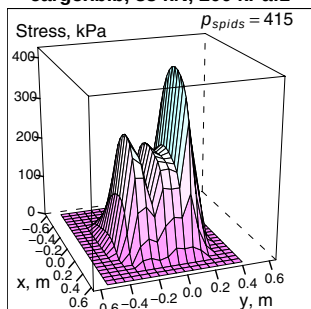
cargoxbib, 60 kN, 240 kPa:3



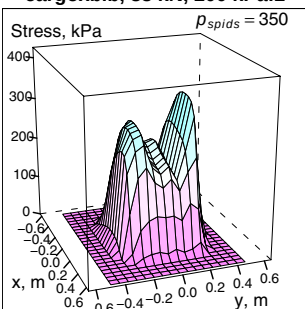
$$\alpha = 1.64 \quad \beta = 0.97$$



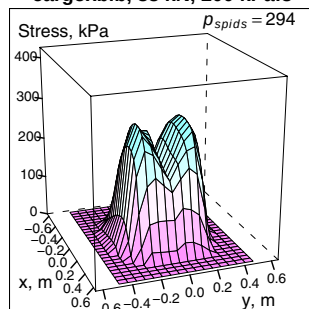
cargoxbib, 83 kN, 200 kPa:1



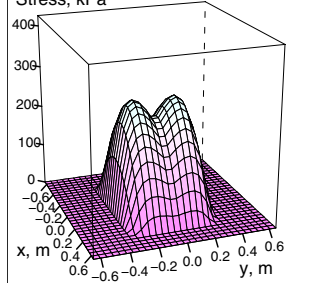
cargoxbib, 83 kN, 200 kPa:2



cargoxbib, 83 kN, 200 kPa:3

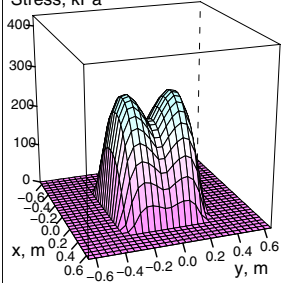


cargoxbib, 83 kN, 200 kPa:4



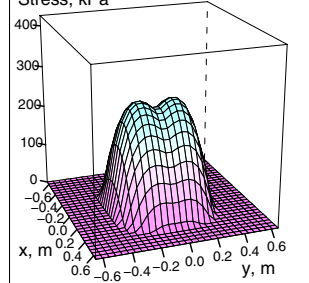
$\alpha = 1.84 \quad \beta = 1.88$

cargoxbib, 83 kN, 200 kPa:5



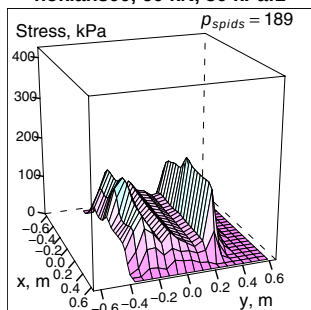
$\alpha = 2.15 \quad \beta = 2.07$

cargoxbib, 83 kN, 200 kPa:6

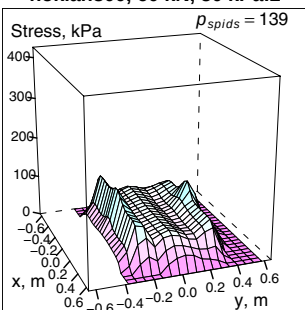


$\alpha = 1.92 \quad \beta = 1.54$

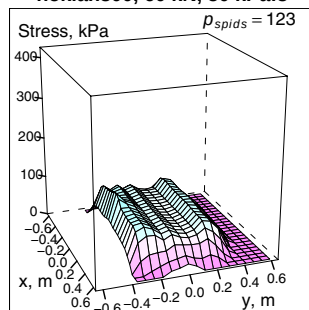
nokian800, 60 kN, 50 kPa:1



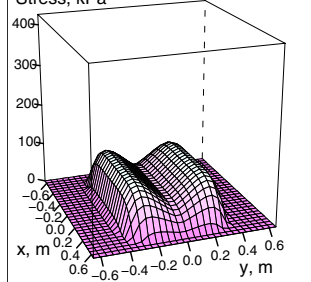
nokian800, 60 kN, 50 kPa:2



nokian800, 60 kN, 50 kPa:3

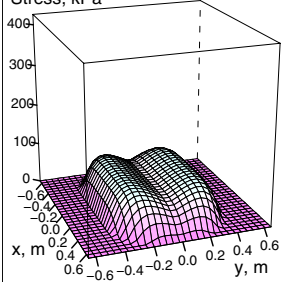


nokian800, 60 kN, 50 kPa:4



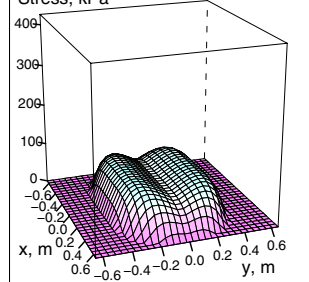
$\alpha = 5.55 \quad \beta = 2.86$

nokian800, 60 kN, 50 kPa:5



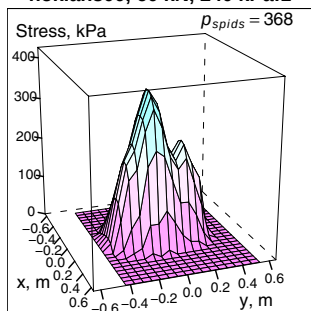
$\alpha = 5.36 \quad \beta = 2.25$

nokian800, 60 kN, 50 kPa:6

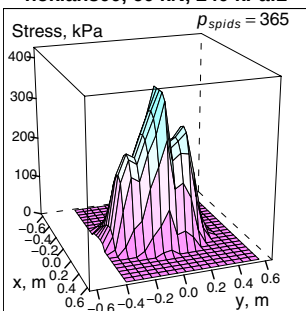


$\alpha = 5.3 \quad \beta = 2.22$

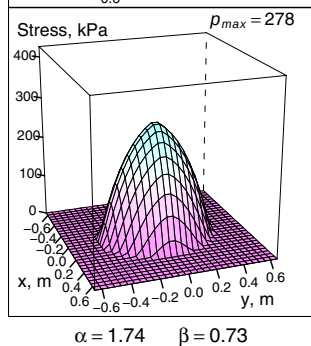
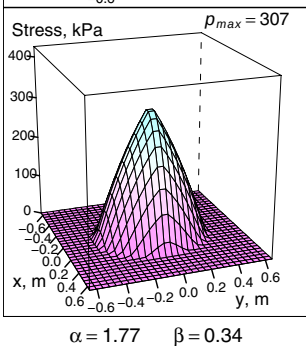
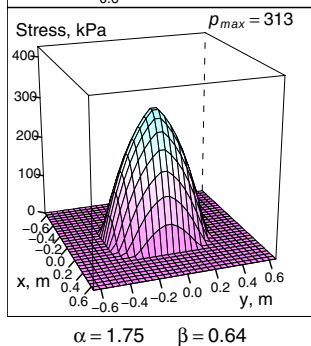
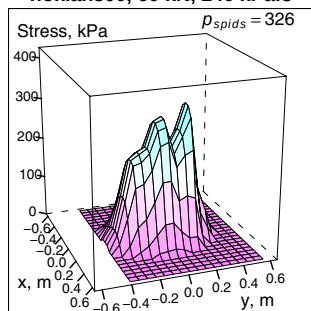
nokian800, 60 kN, 240 kPa:1



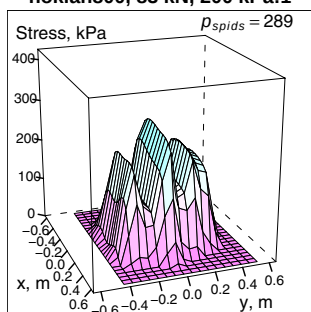
nokian800, 60 kN, 240 kPa:2



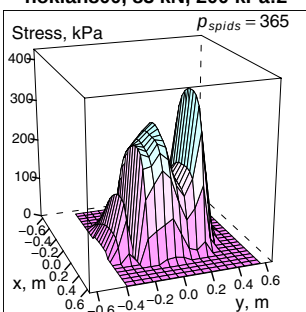
nokian800, 60 kN, 240 kPa:3



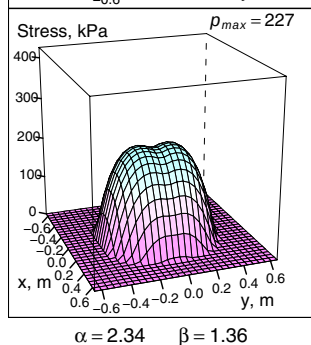
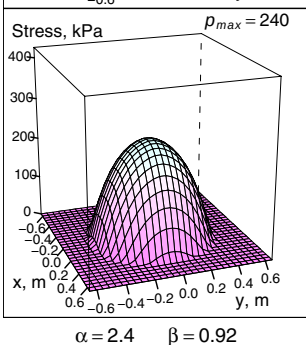
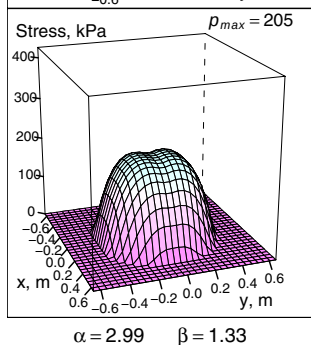
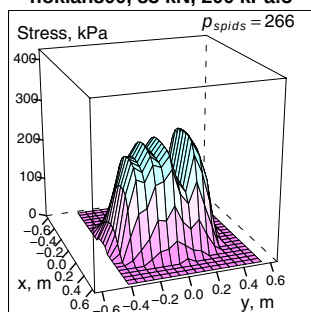
nokian800, 83 kN, 200 kPa:1



nokian800, 83 kN, 200 kPa:2

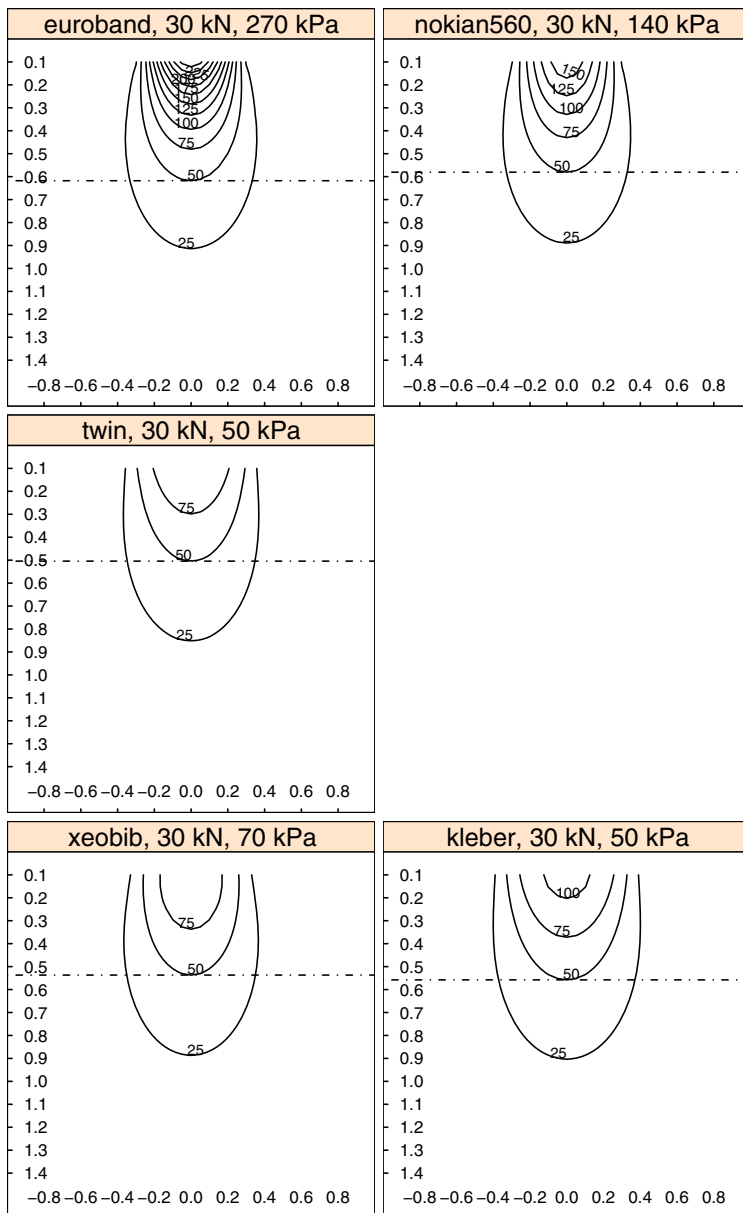


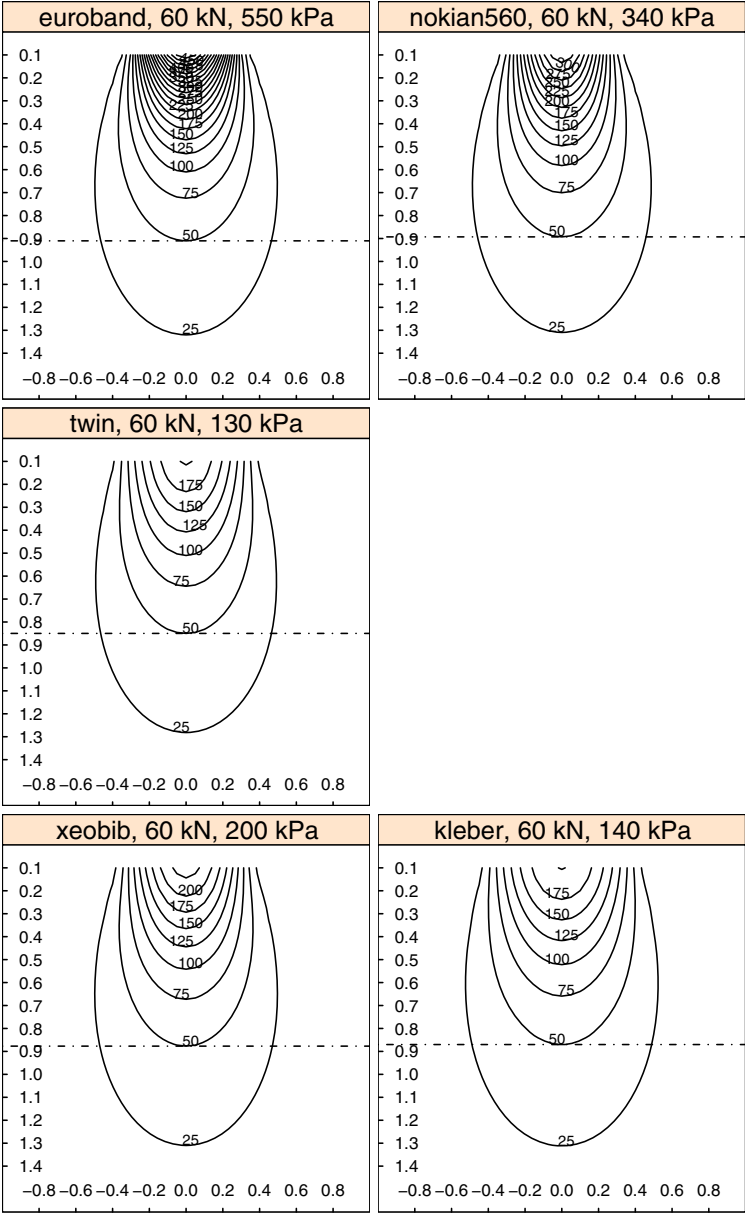
nokian800, 83 kN, 200 kPa:3



Appendiks E:

Söhne-beregnet stress i jordprofilen under 5 dæk ved 30 og 60 kN hjullast





Resumé

Landbrugsjorden er under pres i bogstaveligste forstand. Denne rapport beskriver resultaterne af en stor undersøgelse af fordelingen og størrelsen af kræfterne i kontaktfladen mellem hjul og jord (trædefladen). Fordelingen af stress i trædefladen er langt fra jævn. Derfor er trykket på jorden som tommelfingerregel ca. $\frac{1}{2}$ bar over dæktrykket. Det betyder, at det er dæktrykket, der bestemmer pakningsrisikoen i de øvre jordlag. Dybere i jorden har både hjullast og dæktryk betydning. I rapporten opstilles tommelfingerregler for højest tilrådelige hjullaster og dæktryk. Disse antyder, at de i dag anvendte maskinstørrelser – på trods af gode dæk – giver risiko for permanente pakningskader i jorden. Der er derfor et akut behov for øget viden om jordens bæreevne. På grundlag af resultaterne er der udarbejdet et online beslutningsstøttesystem til illustration af effekten af hjullast, dæktryk og dækdimensioner.

Markbrug



Havebrug



Husdyrbrug



Grøn Viden udkommer i en have-, mark- og husdyrbrugsserie.
Læs mere om publikationerne på vores hjemmeside www.agrsci.dk