

Slutrapport: Reduktion af Fald- og Glideulykker: Optimering af Skridsikkerheden i Arbejdsfodtøj

J.nr. 20195100816



Udarbejdet af:

Lasse Jakobsen og Ion Marius Sivebæk

2023-07-10

Lasse Jakobsen

Ion Marius Sivebæk

Contents

Engelsk Resumé	3
Dansk Resumé	4
Formål	5
Opnåelse af formål og hensigter.....	9
Erfaringer og konklusioner	9
Perspektivering – Forbedring af Arbejds miljøet.....	10
Publikationer og produkter	11
Bevilling fra Arbejds miljø forskningsfonden.....	12

Engelsk Resumé

This project discusses the significant issue of slipping, tripping, and falling accidents in Denmark, which account for 18.9% of serious occupational accidents. The associated costs of these accidents, including lost production and treatment, amount to billions of Danish kroner annually. The complexity of slip and fall accidents stems from various factors, primarily insufficient friction between footwear and surfaces, which is affected by different work environments and contaminants such as oil, dirt, and food residues.

To gain insight into slipping mechanisms, realistic slipping accidents must be replicated. Shoe soles, typically made from elastomers, present a challenge due to their viscoelastic nature, combining characteristics of both liquids and solids. Friction properties of elastomers are however influenced by multiple factors, including material properties, contact area, sliding velocity, temperature, normal load, and frequency of normal load. Therefore, the friction properties are extremely difficult to control and optimize.

This project and PhD thesis aims to investigate the slipping phenomena from both a basic research perspective, using elastomer blocks, and an application-oriented perspective, using actual footwear. The research is divided into two parts. The first part focuses on developing a test system to quantify slip resistance in footwear, which can replicate realistic slip accidents while conforming to the "ISO 13287 Personal protective equipment – Footwear – Test method for slip resistance." The second part utilizes this test system to evaluate slip resistance properties of footwear models, including those certified as slip-resistant according to ISO 13287.

The studies conducted demonstrate that material selection significantly impacts friction properties, depending on the context. Different materials, such as PU (Polyurethane), TPU (Thermoplastic Urethane), and RU (Thermoset rubber), exhibit varying levels of dynamic and static friction on different surfaces and contaminants. Furthermore, the slip resistance of footwear is influenced by test conditions and design. Future research should focus on optimizing slip-resistant footwear for specific industries and environments, while bridging the gap between academic research and industrial stakeholders.

This project, funded by Arbejdsmiljøforskningsfonden, has aimed to reduce slip and fall accidents in workplaces by optimizing the slip resistance of work footwear. Through the development of new testing methodologies, evaluation of sole materials and designs, and establishment of guidelines, the project has enhanced understanding of factors influencing slip resistance and provided practical tools for improving worker safety.

Dansk Resumé

Dette projekt omhandler det betydningsfulde problem vedr. arbejdsulykker forårsaget af glid, snublen og fald i Danmark, hvilket udgør 18,9% af alvorlige arbejdsulykker. De forbundne omkostninger ved disse ulykker, herunder tabt produktion og behandling, beløber sig til milliarder af danske kroner årligt. Komplexiteten af glid- og faldulykker skyldes forskellige faktorer, primært utilstrækkelig friktion mellem fodtøj og underlag, som påvirkes af forskellige arbejdsmiljøer og forureninger såsom olie, snavs og madrester.

For at opnå indsigt i glidmekanismer er det nødvendigt at replicere realistiske glidulykker. Skosåler, der typisk er lavet af elastomerer, udgør en udfordring på grund af deres viskoelastiske natur, hvor de kombinerer egenskaber fra både væsker og faste stoffer. Friktionsegenskaberne af elastomerer påvirkes dog af flere faktorer, herunder materialeegenskaber, kontaktareal, glidningshastighed, temperatur, normallast og frekvens af normallast. Derfor er det yderst svært at kontrollere og optimere friktionsegenskaberne.

Dette projekt/ph.d.-afhandlingen sigter mod at undersøge fænomenet glidning fra både et grundforskningsperspektiv ved brug af elastomerblokke og et applikationsnært perspektiv ved brug af faktisk fodtøj. Forskningen er opdelt i to dele. Den første del af projektet fokuserer på udviklingen af et testsystem til kvantificering af glidfriktion i fodtøj, der kan replicere realistiske glidulykker og samtidig overholde "ISO 13287 Personlig beskyttelsesudstyr - Fodtøj - Testmetode for glidmodstand". Den anden del anvender dette testsystem til at evaluere glidfriktionsegenskaberne ved fodtøjsmodeller, herunder dem, der er certificeret som skridsikre i henhold til ISO 13287.

Eksperimenterne viser, at valg af materiale har en signifikant indvirkning på friktionsegenskaberne, afhængigt af konteksten. Forskellige materialer som PU (Polyuretan), TPU (Termoplastisk Uretan) og RU (termoset gummi) viser varierende niveauer af dynamisk og statisk friktion på forskellige overflader og med forskellige forureninger. Derudover påvirkes skridsikkerheden af fodtøj af testbetingelser og design. Fremtidig forskning bør fokusere på at optimere skridsikkert fodtøj til specifikke industrier og miljøer, samtidig med at man udfylder kløften mellem akademisk forskning og industrielle interesser.

Dette projekt, der er finansieret af Arbejdsmiljøforskningsfonden, har sigtet mod at reducere glid- og faldulykker på arbejdspladser ved at optimere glidmodstanden i arbejdsfodtøj. Gennem udvikling af nye testmetoder, evaluering af sålematerialer og design samt etablering af retningslinjer, har projektet forbedret forståelsen for faktorer, der påvirker glidmodstand, og tilvejebragt praktiske værktøjer til forbedring af arbejderes sikkerhed.

Formål

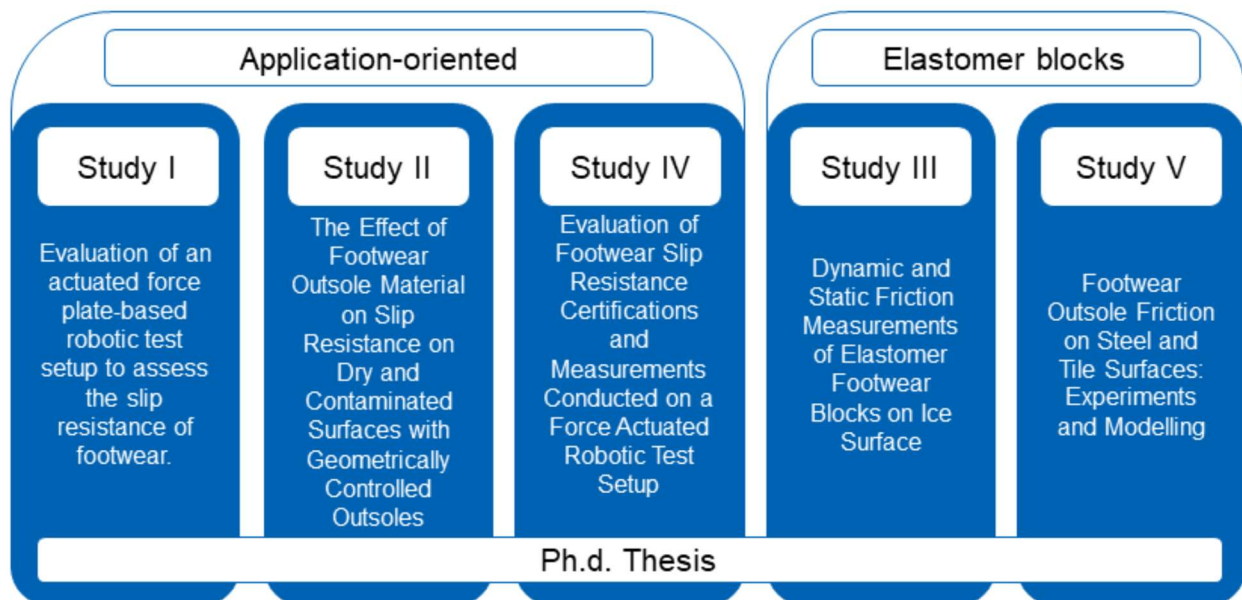
Der var tre formål med dette projekt:

1. At udvikle og implementere nye testmetodikker til at kvalificere og kvantificere friktionsegenskaber mellem fodtøj og underlag under realistiske biomekaniske betingelser.
2. At teste en række forskellige fodtøjssålematerialer og fodtøjssålsudformninger, for at bestemme deres indvirkning på skridsikkerheden.
3. At udarbejde retningslinjer til valg af mere skridsikkert fodtøj egnet til specifikke anvendelsesområder.

Projektet blev udført ved hjælp af en kombination af mekaniske og biomekaniske eksperimenter og forsøg. Testmetodikkerne blev udviklet og tilpasset til at tage højde for underlagets egenskaber og forekomsten af forureninger, der ofte er til stede på arbejdspladser. En række forskellige fodtøjssålematerialer og fodtøjssålsudformninger blev så testet under forskellige betingelser. Resultaterne fra disse tests blev analyseret og brugt til at opstille en række retningslinjer.

Metode og udførelse

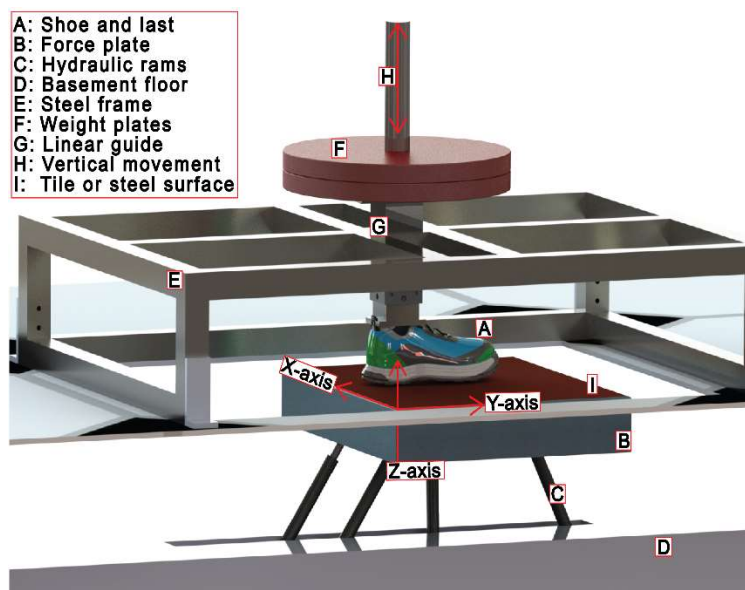
Til at imødekomme projektets tre formål er der lavet en opdeling mellem henholdsvis applikationsnær (application-oriented) og fundamental forskning (elastomer blocks), der tilsammen har udmøntet sig i fem separate studier, som illustreret på Figur 1 nedenfor.



Figur 1 Projektopbygning og dertilhørende studier.

I den applikationsnære del af projektet (studie 1,2 og 4) er der udviklet (studie 1) et testsystem (actuated force plate-based robotic test setup), der kan gengive testbetingelserne fra certificeringsmetoden til skridsikkert fodtøj ”ISO 13287 Personlig beskyttelsesudstyr - Fodtøj - Testmetode for glidmodstand”. Derudover er systemet udviklet med en høj grad af fleksibilitet, således at testbetingelser, der ifølge tidligere forskning, også kan adapteres.

Studie I præsenterede en robotbaseret testopsætning, der var i stand til at bestemme fodtøjets friktionskoefficient i forhold til ISO 13287 - Personlig beskyttelsesudstyr - Fodtøj - Testmetode for glidmodstand” og kunne tilpasses biofidelske og optimerede testparametre. Repeterbarheden af den robotbaserede testopsætning blev vurderet som god med standardafvigelser sammenlignelige med andre testsystemer præsenteret i den videnskabelige litteratur. Derfor blev den robotbaserede testopsætning vurderet som egnet til at udføre yderligere forskningseksperimenter med hele fodtøjsprøver. En visuel rendering af testsystemet er illustreret på Figur 2.



Figur 2 Illustration af testsystemet udviklet og evalueret i studie 1.

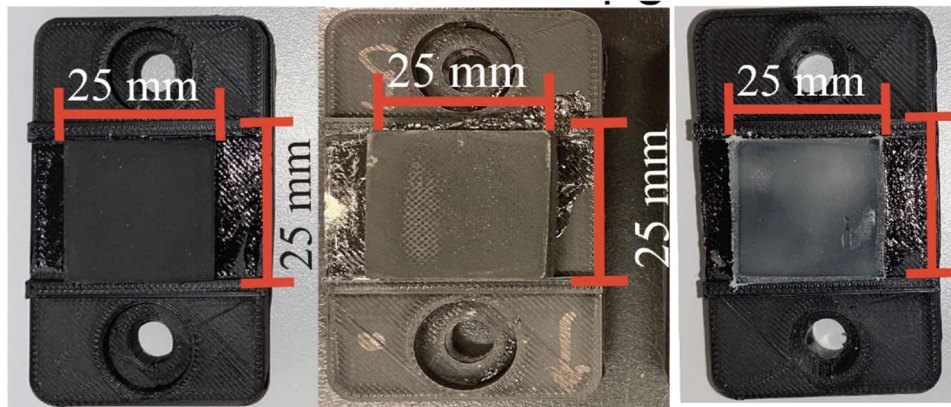
Yderligere eksperimenter med glidmodstand blev udført med hele fodtøjsprøver i Studie 2, hvor præcis samme skomodel blev konstrueret med tre forskellige ydersålmaterialer, nemlig RU, PU og TPU. De tre sko er afbilledet på Figur 3.



Figur 3: Samme skomodel konstrueret i tre forskellige materialer anvendt i studie 2.

De tre sko blev testet for friktionsmodstand på den robotbaserede testopsætning fra Studie 1 i overensstemmelse med ISO 13287-teststandarden. På fliser og ståloverflader forurenede med glycerin og rapsolie viste PU-sålen den højeste friktion (skridsikkerhed) sammenlignet med RU- og TPU-ydersålerne. Dog viste RU-ydersålen den højeste friktion på tørre fliser og ståloverflader.

Som en forlængelse af Studie 2 blev de samme tre materialer undersøgt i Studie 3, når de blev konstrueret som firkantede elastomerblokke (se Figur 4) og udsat for friktionseksperimenter på is overflader under biofidelske belastningsforhold.



Figur 4 elastomerblokke anvendt i studie 3, hvor de er testet på is overflade.

Det vil sige testbetingelser der er realistiske i forhold til virkelige glideulykker. Ved -10 °C havde RU-materialet den højeste friktion. Ved varmere temperaturer (tæt på frysepunktet) var forskellen i friktion mellem de tre materialer ikke særlig udtalt.

I studie 4 blev der også udført eksperimenter med friktion på den robotbaserede testopsætning med arbejdsfodtøj (se Figur 5), der var certificeret som skridsikkert. Certificeringsdata blev modtaget for fem sko, der også blev testet for friktion i henhold til ISO 13287 og eksperimenter med biomekaniske optimerede testparametre på den robotbaserede testopsætning fra studie 1. Meget interessant viste resultaterne at når testparametrene blev ændret til biomekaniske optimerede testparametre, underpræsterede alle skoene i forhold til certificeringerne.



Figur 5: arbejdsfodtøj certificeret som skridsikkert.

I Studie 5 blev PU-, TPU- og RU-materialerne (Figur 4) undersøgt som firkantede blokke, når de blev udsat for friktionsmålinger på samme flise- og ståloverflade, som blev brugt i Studie 1, 2 og 4 II. Her blev materialerne desuden karakteriseret ved hjælp af reologiske metoder, hvor de dynamiske egenskaber af materialerne kunne bestemmes. Disse metoder er anvendt indenfor dækindustrien, hvor der i høj grad også efterstræbes høje friktionsegenskaber. Metoderne er dog meget sjældent set i relation til optimering af friktion i fodtøj.

Opnåelse af formål og hensigter

Gennem denne forskning har vi med succes opnået vores projektformål. Vi har udviklet robuste testmetodikker, der tager højde for en række forskellige underlagsforhold og forureninger. Dette har ført til en mere detaljeret forståelse af de friktionsegenskaber, der er i spil under realistiske glideulykker.

Desuden har vores tests af forskellige sålematerialer og -udformninger givet værdifuld indsigt i deres indflydelse på skridsikkerheden. Dette har gjort det muligt for os at formulere en række anbefalinger, der kan hjælpe med at vejlede valget af arbejdsfodtøj, afhængigt af specifikke arbejdsbetingelser og opgaver.

En af de vigtigste resultater af studiet er at sammenligne friktionen af hele sko og en lille klods materiale. Det viser sig at hvis man kigger på de få kvadrat millimeter (klodsen) der er i kontakt med underlaget kan friktionen forklares ved hjælp af reologiske målinger hvor indflydelsen af reelt kontaktareal og hysteresis kan adskilles. Måling på hele sko er selvfølgelig mere relevante i dagligdagen men materialets indflydelse på friktionen druknes i design, mellemsål mm.

Erfaringer og konklusioner

Vores resultater understreger vigtigheden af at overveje både sålemateriale og -udformning, når man vurderer skridsikkerheden i arbejdsfodtøj. Vi har fundet, at disse faktorer kan have en betydelig indflydelse på friktionsegenskaberne og derfor bør tages i betragtning, når man vælger det mest hensigtsmæssige fodtøj til en given arbejdsopgave.

Det er også blevet klart, at de metoder, der i øjeblikket anvendes til at teste og klassificere skridsikkerhed, ikke nødvendigvis tager højde for de varierede og komplekse betingelser, der kan være på en arbejdsplads. Vores arbejde har vist, at det er nødvendigt med mere nuanceret og detaljerede testmetoder, samt i højere grad at analysere de viskoelastiske egenskaber i sålmaterialer. Altså har forskning, der først er set anvendt i dækindustrien, også høj relevans i den videre udvikling af skridsikre sålmaterialer.

Perspektivering – Forbedring af Arbejds miljøet

Resultaterne af dette projekt har stor betydning for forbedring af arbejdsmiljøet. Ved at udvikle en dybere forståelse for de faktorer, der påvirker skridsikkerheden, og ved at opstille praktiske retningslinjer for valg af arbejdsfodtøj, har vi bidraget til at reducere risikoen for fald- og glideulykker på arbejdspladser. Dette vil ikke kun bidrage til at forbedre arbejdsikkerheden, men også til at øge arbejdsproduktiviteten og reducere omkostningerne forbundet med arbejdsrelaterede ulykker.

Det har været en øjenåbner i dette studie hvor langt der er mellem brugernes forventninger til skridsikkerhed af sko og den indsats der ydes på området af producenterne. Sikkerhedssko sælges mest på smidighed og lav vægt hvorimod skridsikkerheden ikke er beskrevet. Ved at mindske denne afstand kunne arbejdsmiljøet nemt forbedres hvis producenterne adopterer de mere biomekaniske korrekte test som er beskrevet i dette studie og beskriver resultaterne i deklARATIONEN af skoene. Dette kunne gøres på kort sigt.

På længere sigt kunne studiet promovere mere forskning i skridsikre materialer da et salgsvoksbillede altid vil gøre det nemmere at få finansieret et projekt. På denne måde bliver fremtidige sikkerhedssko friktionsoptimerede både på materialer og andre faktorer.

Publikationer og produkter

Udover den endelige Ph.d.-afhandling er der blevet udgivet en række videnskabelige artikler baseret på forskningen. Derudover er der udarbejdet en række retningslinjer for valg af skridsikkert fodtøj, som er blevet distribueret til relevante arbejdsgivere og organisationer.

Ph.d.-afhandling:

ELASTOMER FRICTION – FROM FUNDAMENTAL TO FOOTWEAR APPLICATION RESEARCH

Tidsskriftartikler:

1. [Study I] (Jakobsen et al., 2022e): L. Jakobsen, F.G. Lysdal, T. Bagehorn, U.G. Kersting, I.M. Sivebaek, (2022). Evaluation of an actuated force plate-based robotic test setup to assess the slip resistance of footwear. *International Journal of Industrial Ergonomics*, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103253>. (open access)
2. [Study II] (Jakobsen et al., 2022c): L. Jakobsen, F.G. Lysdal, T. Bagehorn, U.G. Kersting, I.M. Sivebaek, (2022). The Effect of Footwear Outsole Material on Slip Resistance on Dry and Contaminated Surfaces with Geometrically Controlled Outsoles. *Ergonomics*, <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2081364> (open access)
3. [Study III] (Jakobsen et al., 2022a): L. Jakobsen, S.B. Auganæs, A. F. Buene, I.M. Sivebaek, A. KleinPaste, (2022). Dynamic and Static Friction Measurements of Elastomer Footwear Blocks on Ice Surface. *Tribology International*, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108064>. (open access)
4. [Study IV] (Jakobsen et al., 2022b): L. Jakobsen, T. Bagehorn, I.M. Sivebaek, F.G. Lysdal, (2022). Evaluation of Footwear Slip Resistance Certifications and Measurements Conducted on a Force Actuated Robotic Test Setup. *Journal of Engineering Tribology*, (UNDER REVIEW).
5. [Study V]: L. Jakobsen, A. Tiwari, I.M. Sivebaek, and B.N.J. Persson. Footwear Outsole Friction on Steel and Tile Surfaces: Experiments and Modelling. (IN PREPERATION).

Konferencebidrag:

1. Jakobsen, L., Lysdal, F. G., & Sivebæk, I. M. (2022, November). Footwear Traction Device with Biomechanical Loading Conditions. In 14th Annual Meeting of the Danish Society of Biomechanics (pp. P01-6).
2. Jakobsen, L., Lysdal, F. G., & Sivebæk, I. M. (2022, June). Tribosystem for determination of footwear slip resistance under high sliding velocities. In Nordic Symposium on Tribology: NORDTRIB 2022.

3. Jakobsen, L., Lysdal, F. G., & Sivebæk, I. M. (2021). Dynamic mechanical analysis as a predictor for slip resistance and traction in footwear. *Footwear Science*, 13(S1), S57-S58.
4. Jakobsen, L., Lysdal, F. G., Jensen, R. K., Kersting, U. G., & Sivebæk, I. M. (2021). Introducing a test setup to measure the tribological behaviour of shoe-surface interactions under biomechanically relevant conditions. At the 24th Annual Applied Ergonomics Conference 2021

Bevilling fra Arbejdsmiljøforskningsfonden

Projektet blev finansieret af en bevilling fra Arbejdsmiljøforskningsfonden. Bevillingen blev brugt til at dække omkostningerne ved projektets forskningsaktiviteter, herunder lønninger, modificering af eksisterende udstyr og forskningsmaterialer .