

Sammanställning av utfall från rulltester på Lugnet skidstadion 18 september 2024

Dan Kuylenstierna, Tobias Westman, Jonas Braam och Ludvig Remb

Syfte

Syftet med detta arbete är att karaktärisera rullskidhjul samt sätta en standard som kan uttryckas i konkreta nyckeltal så som rullmotståndskoefficient (μ) och ythårdhet (shoretal) för olika hjul typer. Första prioritet är att karaktärisera så kallade standardhjul (2or). Eftersom rullmotstånd alltid beror av såväl hjulets egenskaper som egenskaper hos underlaget utgår jämförelsen av olika hjul från ett standardiserat testfall baserat på ett instrument där testobjektet rullar mot ett svänghjul i stål som drivs av en elmotor. Utöver att karaktärisera olika hjul på mätinstrumentet är ett specifikt mål för arbetet också att validera att utfall från utvecklat mätinstrument överensstämmer med utfall från rulltest nedför backe samt stakning i platt terräng på rundbana.

Bakgrund

Sedan ca tio år tillbaka har det blivit allt vanligare att rullskidtävlingar avgörs på så kallade standardhjul (också kända som 2or eller träningshjul) istället för fria hjul som tidigare var vanligt. Det finns flera argument för detta: det sänker tröskeln för att tävla eftersom åkare kan använda sina vanliga träningsiskidor istället för att köpa särskilda tävlingsskidor, det upplevs säkrare eftersom farten inte är lika hög samt att åkningen blir mer skidlik med ett motstånd som ligger närmre motståndet på snö.

En uppenbar utmaning med att genomföra en tävling på begränsat rull är att hjulens rullmotstånd på något sätt behöver kontrolleras. När tävlingar med standardrull infördes för ca tio år sedan var detta ett mindre problem eftersom de ”standardhjul” som då fanns på marknaden var relativt lika. Under senare år har det dock börjat dyka upp en del hjul som är signifikant mer lättrullade än traditionella träningshjul vilket har fört med sig att den som vill köra om placeringar på en tävling åter har blivit tvingad att köpa särskilda ”tävlingsskidor” med denna typ av snabbare hjul och att de som inte har dessa hjul tenderar att avstå från att tävla eftersom tävlingarna inte upplevs vara på lika villkor.

En lösning på problemet ovan är att arrangören tillhandahåller låneskidor. Det är en bra lösning för att säkerställa ett jämnt rullmotstånd, men även denna lösning har en del utmaningar. Dels höjer det tröskeln för att arrangera en tävling, vilket gör att det blir färre tävlingar att åka. En annan aspekt är att det begränsar en åkares möjlighet att anpassa sitt material (inom givet regelverk) vilket kan vara viktigt till exempel om man har en skada som gör att man behöver kompensera en snedhet i kroppen, jämför en cyklist som justerar vinkeln på spurtklossen för att inte snedbelasta knäet eller en löpare som provar ut särskilda skoinlägg i liknande syfte.

Utifrån bakgrunden ovan är det därför högt prioriterat att kvantifiera vad som är ”standardrull”. Syftet med detta arbete är att karaktärisera de hjul på marknaden som idag är klassade som godkända standardhjul och att utifrån detta ta fram kriterier för vad som i framtiden bör räknas som ett standardhjul. Målet är att ta fram konkreta mätetal som i framtiden objektivt kan avgöra vad som är ett godkänt hjul.

Metod och genomförande

Arbetet påbörjades med att rullskidor från ledande leverantörer samlades in av Svenska skidförbundet. Ett par skidor (SWENOR 2) valdes ut som referensskidor (benämns nedan *referensskidorna*). Övriga insamlade skidor modifierades så att de hade framhjul (utan backspärr) både fram och bak. Motivet till denna modifikation är att det i första hand är gummiblandningens egenskaper som skall karaktäriseras.

Testerna genomfördes under goda yttre förutsättningar på Lugnet i Falun september 18, 2024 med start 10:00 och avslut 15:30. Asfaltstemperaturen var 12°C vid första testets början och 27°C vid sista testets avslut. För att minska inverkan från temperaturdriften varmkördes alla hjul ordentligt innan mätning.

Tre försökspersoner deltog, två tävlingsåkare med vikt 89 kg respektive 81 kg samt en van motionsåkare med vikt 67 kg. Försöksperson 1 (89 kg) körde på olika skidor (nedan benämnda *testskidor*) medan försöksperson 2 (81 kg) hela tiden kör på referensskidorna (SWENOR 2 med backspärr). Försöksperson 3 körde också på testskidor. Testerna utvärderas främst med avseende på åkare 1 och 2. Kompletterande rulltester mellan försöksperson 2 och 3 genomfördes för insikt i huruvida skidor kan bete sig markant annorlunda för åkare med lägre vikt.

Tre olika tester genomfördes, två tester där försökspersonerna åker på skidorna samt ett standardiserat test där rullskidhjulet drivs av ett svänghjul i metall. För detta ändamål användes ett instrument utvecklat av Chalmers tekniska högskola i Göteborg¹.

Test 1: Stakning på rundbana

I detta test stakar försökspersonerna 5 varv på en rundbana som är 310 m lång. Försöksperson 1 (som kör på testskidor) ligger först och håller en uppskattat jämn intensitet (normal distansfart) med en teknik som undviker tryckande riktningssändring i kurvor. Försöksperson 2 kör bakom på referensskidorna. Under åkningen registreras varvtider, stavkraft, och hjärtfrekvens för försöksperson 1. Rullmotståndet beräknas från stavkraften enligt formeln nedan

$$F = mg\mu + \frac{\rho C_d A v^2}{2} \rightarrow$$
$$\mu = \frac{F - \frac{\rho C_d A v^2}{2}}{mg} \quad \text{Formel 1}$$

där F (N) är kraft i färdriktningen, m (kg) åkarens vikt, g (m/s²) tyngdacceleration, μ (dimensionslös) rullmotståndskoefficient, C_d (dimensionslös) luftmotståndskoefficient, A (m²) aerodynamisk frontarea, och ρ (kg/m³) luftens densitet.

Syftet med att försöksperson 2 åker med bakom är främst för att hålla referensskidorna varma inför efterföljande rulltest men också genom att mäta stavkraften kunna säkerställa att referensskidornas motstånd inte förändras under testets gång. Försöksperson 3 kör samtidigt men inte direkt bakom på ett annat par testskidor.

¹ Albert Hansson, Andreas Lofgren, Arvid Sandstrom, Jonatan Larsen, "Att mäta rullmotstånd -Utveckling och konstruktion av instrument for rangordning av rullskidor", Kandidatarbete vid Chalmers tekniska högskola, 2024

Test 2: Rulltest nedför backe

Direkt efter rundbanetestet avslutats, medan skidorna fortfarande är varma åker försökspersonerna till backen för rulltest. Där startar de standardiserat med tre stavtag på toppen av testbacken. De håller varandras händer fram till en punkt där hastigheten är ca 35 km/h och backen planar ut. I detta läge släpper de varandras händer och fortsätter rulla i ytterligare ca 100 meter fram tills de passerar en brytlinje där skillnad i rullsträcka registreras. Testet upprepas 2 gånger för varje skidpar för försöksperson 1 och 2 och därefter ytterligare två gånger för försöksperson 2 och 3.

Test 3: Rullmotståndsmätning på instrument

Direkt efter genomfört rulltest nedför backen mäts rullmotstånd med instrument utvecklat vid Chalmers tekniska högskola. I detta test belastas rullskidhjulet av en ekvivalent åkarvikt av 75 kg samtidigt som det drivs av ett metalliskt svänghjul med slät yta. Svänghjulets diameter är 20 cm och det roterar med en vinkelhastighet av 8.85 varv per sekund vilket motsvarar en ekvivalent hastighet av 20 km/h för rullskidhjulet. Friktionen läses av efter att skidorna uppnått mättnadstemperatur, bedömt utifrån att rullmotståndet över 30 sekunder stabiliserat sig inom instrumentets mätprecision samt att hjulens yttemperatur registrerad med IR termometer inte ändras. Tiden att uppnå mättnadstemperatur varierar mellan olika hjul. Efter mätning med instrumentet mäts hjulens hårdhet (shoretalet) med en durometer.

Resultat

Vid utvärdering av testutfall har fokus i första hand legat på jämförelse av försöksperson 1 och 2 som ligger närmast i vikt. Data från försöksperson 3 har använts för att säkerställa att inga skidor beter sig uppenbart annorlunda för lätta åkare. Tabell 1 sammanfattar utfall från samtliga tester: rulltest, staktest samt test på instrument.

Tabell 1: Översikt av resultat från tre olika tester av rullmotstånd. Tiden är medeltid för två sista varven på rundbanan. Hastigheten är motsvarande medelhastighet, beräknad från sträcka och varvtid. Hjärtfrekvensen (HR) kommer från bröstband av märket Garmin. Kraft och effekt är uppmätta med Skisens stavar. Temperaturen är hjulens yttemperatur efter genomfört test.

Rulldifferens är skillnad relativt referens vid slutet av par-rull testet. Rullmotståndet μ_{inst} är uppmätt med rulltestare från Chalmers medan μ_{road} är beräknad från uppmätt stavkraft och skattat luftmotstånd utifrån åkhastighet.

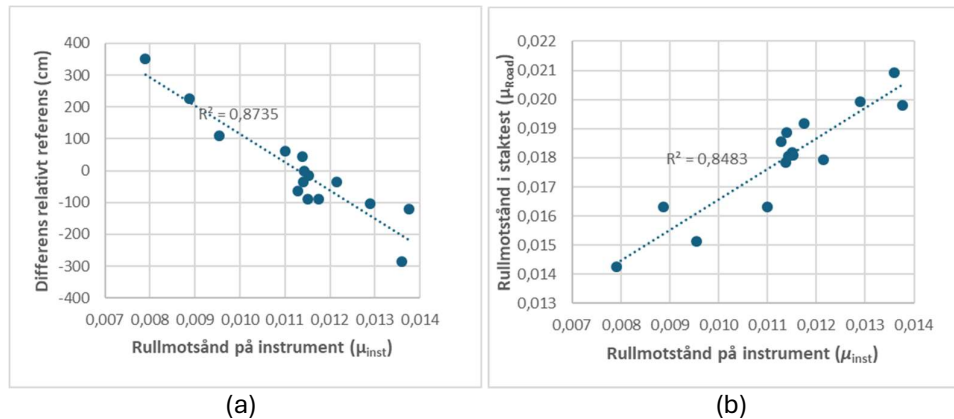
Testskidor	Tid	Hastighet	HR	Kraft	Effekt	Temp	Rulldiff	Rullmotstånd		Testutfall		
	(s)	(km/h)	(#/min)	(N)	(watt)	(C)	rel. ref (cm)	μ_{inst}	μ_{road}	Rulltest	Instrument	Staktest
Ski 1	59	18,8	133	39	204	26	-90	0,0118	0,0192	-	0	-
Ski 2	56	19,8	129	32,5	179	25	110	0,0095	0,0151	+	++	++
Ski 3	57	19,5	128	37,05	200	34	45	0,0114	0,0179	0	0	0
Ski 4	58	19,2	131	40,3	215	28	-120	0,0138	0,0198	-	--	--
Ski 5	58	19,2	128	37,05	198	31	-35	0,0121	0,0179	0	-	0
Ski 6	53	21,2	125	31,85	187	26	350	0,0079	0,0143	++	++	++
Ski 7	56	19,8	133	37,7	207	41	-15	0,0115	0,0181	0	0	0
Ski 1	57	19,6	129	38,35	209	32	-65	0,0113	0,0186	0	0	0
Ski 8	58	19,2	129	34,255	183	29	60	0,0110	0,0163	0	0	+
Ski 9	58	19,2	132	37,515	201	32	-90	0,0115	0,0182	-	0	0
Ski 10	58	19,1	129	42,212	224	45	-285	0,0136	0,0209	--	--	--
Ski 11	60	18,6	129	40,138	207	39	-105	0,0129	0,0199	-	-	--
Ski 12	56	19,8	128	34,587	190	30	225	0,0089	0,0163	++	++	+
Ski 3	58	19,2	129	37,271	199	34	0	0,0114	0,0181	0	0	0
Ski 1	59	19,0	131	38,552	204	35	-35	0,0114	0,0189	0	0	0
Medelvärde	57	19,4	130	37,222	201	32	-3	0,0113	0,0180			
Standardavvikelse	1,7	0,60	2,1	2,882926	12,0	5,8	151	0,0016	0,0018			

För varje skidpar genomfördes två rulltester nedför backe. Värdet som presenteras i tabellen är medelvärdet av dessa två tester. Skillnaden mellan de två testen var i medeltal så liten som 7 cm med en standardavvikelse av 37 cm. Detta kan jämföras mot medelvärdet i rulldifferens mellan de två försökspersonerna som i medeltal för samtliga skidor var 3 cm (till referensskidornas

fördel) med en standardavvikelse på 151 cm. Den stora skillnaden i standardavvikelse indikerar att skillnaden mellan olika skidor är väsentligt större än osäkerheten i ett rulltest.

För staktestet presenteras medelhastighet, medelkraft, medeleffekt och medelhjärtfrekvens (HR) för de två sista varven. Åkarna instruerades att köra med jämn intensitet, vilket anses uppfyllt med hjärtfrekvens av 129 ± 2 slag/min och staveffekt 204 ± 9 watt. Utifrån uppmätt stavkraft skattades sedan rullmotståndet mot asfalten, vilket gav $\mu_{road} = 0.0183 \pm 0.0014$. Tabellen visar att skidornas klassificering utifrån rulltest och staktest är mycket likvärdig.

Slutligen testades rullmotståndet på instrumentet utvecklat vid Chalmers. Detta gav ett rullmotstånd av $\mu_{inst} = 0.0113 \pm 0.0016$. Testutfallet på mätinstrumentet korrelerade väl med testutfall från såväl rulltest som staktest, se Figur 1.



Figur 1. Korrelation mellan mätning av rullmotstånd på mätinstrument och (a) rulltest nedför backe och (b) rullmotstånd extraherat från staktest.

Tabell 1 innehåller även tre kolumner för värdering av testutfall. Bedömningen utgår från medelvärde (m) och standardavvikelse (σ) för alla testade skidor. De skidor som hamnar utanför $m \pm 1\sigma$ bedöms som mycket lätta respektive mycket tröga. Dessa noteras i tabellen med (++) för de skidor som är lätta och (--) för de som är tröga. Skidor markerade med (+) respektive (-) avviker 0.5σ från medelvärdet och bedöms som något lätta respektive något tröga.

Efter test på mätinstrument togs hjulens yttemperatur med en IR termometer. Noterbart är att trögare skidor når en högre yttemperatur vilket kan förklaras med att friktionen i ett trögare hjul alstrar mer värme. Det skall nämnas att temperaturen på eftermiddagen var högre än på förmiddagen vilket naturligtvis påverkar mättnadstemperaturen (mätt på ytan av hjulet) och i viss mån även uppmätt rullmotstånd. För att säkerställa att denna skillnad inte var alltför stor upprepades tester av två av de skidor som mättes först också i slutet av dagen. Hårdheten för hjulen mättes med en Durometer och varierar mellan 54 shore och 70 shore utan tydlig koppling till rullmotstånd mer än att hjul i PU material generellt har ett högre shoretal. Bland gummi hjulen fanns däremot ingen tydlig koppling mellan hårdhet och rullmotstånd.

Diskussion

Rullmotstånd har mätts med tre olika mätmetoder för 12 par olika skidor. Det kan konstateras att de tre metoderna korrelerar väl och ger väldigt lika resultat med avseende på hur de rangordnar hjul. I synnerhet kan det konstateras att de två testerna på väg (rulltest nedför backe respektive stakning i platt terräng) korrelerar väl mot test på instrumentet. Vidare klassning av hjul anses därmed kunna göras utifrån testresultat på instrumentet vilket var ett av syftena att befästa med detta arbete.

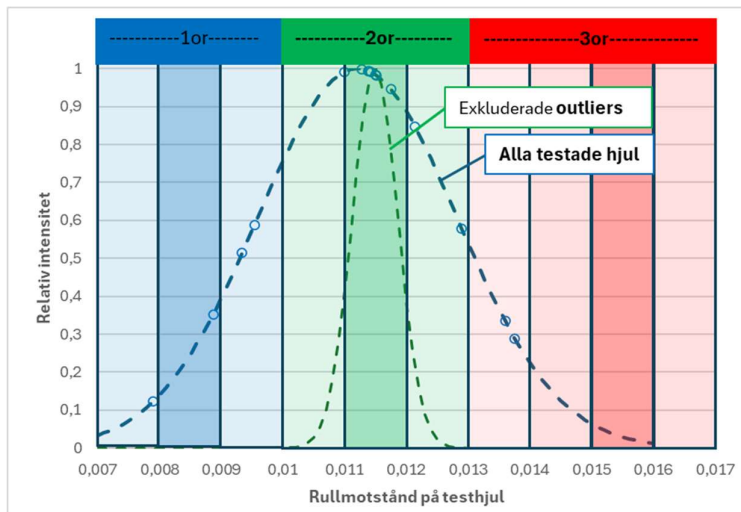
Ur Tabell 1 framgår att 3 par skidor på instrumentet uppvisar rullmotstånd som är mer än en standardavvikelse under medelvärdet för alla testade hjul. Tabellen visar också att dessa tre skidpar är lättare än samtliga övriga skidpar baserat på såväl rulltest som staktest. Det framgår vidare ur Tabell 1 att två skidpar vid test på instrumentet uppvisar rullmotstånd som är mer än en standardavvikelse högre än medelvärdet för samtliga testade skidpar samt att ytterligare ett par skidor är mycket nära en standardavvikelse trögare än medelvärdet för alla skidpar.

Baserat på resonemanget ovan anses sex skidpar kunna klassas som outliers. Om dessa outliers exkluderas ur statistiken erhålls ett reducerat dataset bestående av sex skidpar med $\mu_{inst}=0.0115\pm 0.0004$ och $\mu_{Road}=0.0179\pm 0.0008$. Notera att medelfriktionen för detta reducerade dataset endast avviker marginellt från medelvärdet för samtliga testskidor men att standardavvikelsen däremot är väsentligt lägre. Figur. 2 illustrerar statistiken ovan med två normaliserade normalfördelningar, en för samtliga testade skidor och en för det mindre datasetet där outliers exkluderats. Utifrån det mindre datasetet anses ett standardhjul (en godkänd klassisk 2a) kunna beskrivas som ett hjul med ett rullmotstånd inom spannet $0.011 < \mu_{inst} < 0.012$.² Vår rekommendation till producenter är att vid tillverkning sikta mot ett rullmotstånd i detta spann. För att ta höjd för felmarginaler och processvariationer har SSF i nuläget dock valt att klassa ett bredare spann ($0.010 < \mu_{inst} < 0.013$) som 2or rekommenderade standardhjul vid tävling. Hjul som uppvisar rullmotstånd $\mu_{inst} < 0.010$ klassas om 1or eller 0or medan hjul som uppvisar $\mu_{inst} > 0.013$ föreslås klassas som 3or, 4or eller 5or. Vid testerna på Lugnet i Falun testades enbart 2or. En preliminär kategorisering för lättare och trögare hjul föreslås här baserat på en uppsättning instrumenttester av vanligt förekommande hjultyper inom respektive tröghetsklass. Föreslagna gränser redovisas i Tabell 2.

Tabell 2: Förslag till klassificering av rullskidhjul utifrån rullmotstånd uppmätt då hjulet drivs i 20 km/h av ett svänghjul i stål med diameter 20 cm i en omgivningstemperatur av 25°C.

Hjultröghet	Spann rullmotstånd
Tävlingshjul	< 0,007
1or	0,007 < 0,010
2or	0,010 < 0,013
3or	0,013 < 0,017
4or	0,017 < 0,022
5or	0,022 <

² uppmätt mot svänghjul i stål med diameter av 20 cm som roterar med en rotationshastighet av 8.85 varv/sek (motsvarande 20km/h) i en rumstemperatur av 25°C. Rullmotståndet extraheras efter att hjulet har uppnått mättnadstemperatur.



Figur 2. Uppmätta rullmotstånd illustrerade över normalfördelningar för uppmätta medelvärden och standardavvikelser.

Enligt resultaten ovan mättes också hjulens hårdhet. Även om det kunde konstateras att detta inte hade stor inverkan på rullmotståndet är det en viktig parameter att ta hänsyn till eftersom denna har en stor inverkan på åkegenskaper, komfort och säkerhet. Ett mjukare hjul är mindre vibrationskänsligt och till en viss gräns också lättare att bromsa medan ett hårdare hjul är mer riktighetsstabil men svårare att bromsa. Det är dock svårt att ange ett exakt gränsvärde för hjulens hårdhet eftersom upplevelse beror på förhållandet mellan hjulens hårdhet och åkarens vikt. Även bredden på hjulet har betydelse eftersom ett bredare hjul kan fördela lasten över en större area. Utifrån detta resonemang bör hjulens hårdhet lämnas som en fri parameter upp till producenten att bestämma.

För de som önskar riktlinjer beträffande hjulens hårdhet är en försiktig rekommendation att ett klassiskt hjul bör ha ett shoretal inom spannet 60-66 shore för att nå en bra kompromiss för såväl tung som lätt åkare. Ett lägre tal kan vara bättre för lätta åkare medan ett högre kan upplevas bättre för tyngre åkare. Genom att lämna det som en fri parameter för producenten är förhoppningen att marknaden driver fram hjul som passar såväl tunga som lätta åkare. Att begränsa det till det rekommenderade spannet är viktigt endast i samband med tävlingar som har lånehjul, om dessa skulle avvika för mycket från det rekommenderade spannet skulle det kunna diskriminera endera lätta eller tunga åkare.

Utifrån Figur 1 framgår att det är mycket god korrelation mellan rullmotstånd på väg och rullmotstånd mot instrumentet. Utifrån sambandet kan gränsvärdena på instrumentet räknas om till förväntat rullmotstånd på väg under antagande om att underlaget liknar det som rådde vid testet på Lugnets skidstadion. Genom att använda Formel 1 kan dessa värden sedan räknas om till hypotetisk åkshastighet och åktid över given sträcka under antagande om känd åkarkapacitet. Tabell 3 visar en sådan uppskattning över 10 km för en stor herråkare (190 cm, 90 kg, 250 watt) respektive en mindre damåkare (160 cm, 50 kg, 120 watt). Den antagna snitteffekten är baserad på erfarenhet av vad åkare av god nationell klass håller över 10 km i platt terräng på dam respektive herrsida. Åktiderna i Tabell 3 är som nämnes högst hypotetiska. I praktiken blir de förmodligen längre på grund av kurvor och variation i terräng. Skillnaden mellan olika hjul ger ändå en fingervisning över hjulens inverkan på åktid och bedöms utifrån tester stämma väl med verklig skillnad i åktid.

Tabell 3: Rullmotstånd och skattad åktid över 10 km för en stor herråkare (190 cm, 90 kg, 250 watt) respektive liten damåkare (160 cm, 50 kg, 120 watt).

Rullmotstånd (μ_{inst})	Stor herråkare	Liten damåkare
0,007	22:33	27:07
0,010	23:20	28:01
0,013	24:10	29:00
0,017	25:03	30:00
0,022	26:57	32:12

Baserat på Tabell 2 och 3 så sprider åktiden för en tvåa godkänd enligt de nya riktlinjerna knappt 1 minut över en sträcka av 10 kilometer. Detta är mycket bättre än vad som var fallet tidigare då hjulen på listan över godkända tvåor enligt teori och tester uppvisade en spridning närmre två minuter över samma sträcka.

För att skapa ännu mer rättvisa tävlingar vore det naturligtvis bättre att smalna in spannet för vad som klassas som en godkänd 2a. Av denna anledning är det därför rekommenderat att producenter vid produktion av en klassisk 2a siktar mot ett rullmotstånd i det smalare spannet $\mu_{inst}=0.011-0.012$. Förhoppningen är att alla producenter ska sikta mot detta smalare även om ett bredare spann tillämpas i riktlinjerna. Syftet med det bredare spannet är att skapa marginal för mätosäkerhet och processtoleranser.

En målbild är att producenter i framtiden efter att ha kvalificerat produktionen enligt föreslagen standardmätning kommer märka sina hjul med rullmotstånd samt tillverkningsdatum. Detta för att skapa en spårbarhet och underlätta för konsumenter att bedöma huruvida ett hjul är godkänt enligt uppdaterade riktlinjer. En sådan märkning skulle möjliggöra för en tävlingsarrangör att bedöma huruvida ett hjul är godkänt enbart utifrån dess gradering.

Slutsatser och fortsatt arbete

Tre olika typer av tester har uppvisat konsekvent resultat med avseende på hur de rangordnar rullskidhjul av gradering 2. Testerna har också uppvisat god korrelation mellan rullmotstånd uppmätt på standardiserat mätinstrument (rullmotståndstestare) och på väg. Utifrån dessa tester har sedan kriterier för kategorisering av hjul tagits fram med utgångspunkt i det standardiserade rullmotstånd som mäts på rullmotståndstestaren. Dessa nya kriterier är underlag för skidförbundets uppdaterade rekommendationer kring hjul på tävling och träning.

Det skall understrykas att det som presenteras i detta dokument är ett första försök att standardisera klassificering av rullskidhjul för att skapa transparens och rättvisa förutsättningar vid tävling. De gränsvärden som är satta i dokumentet skall inte ses som slutgiltiga utan vår förhoppning är att detta kommer leda till ett fortsatt arbete med att utveckla testmetoder och etablera ett internationellt klassificeringssystem.