

What goes up must come down. De fysica van klimvallen onderzocht.

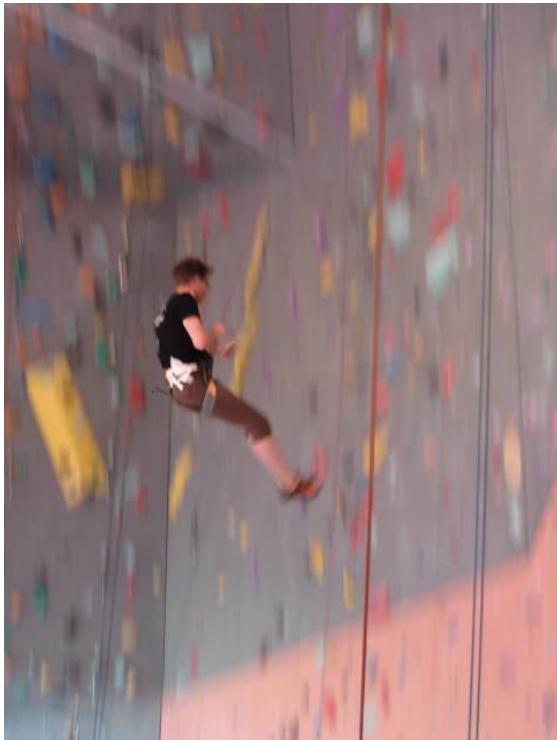
Tekstbijdragen: Tom Hijmans, Taco Walstra, Erik Clay en Joris Schefold. Foto en illustratie: Tom Hijmans

Anders dan bij het klassieke alpinisme zijn bij het sportklimmen (voorklim)vallen een ‘fact of life’. Hierom is, mede aangemoedigd door vallengoeroe Bart Korff, een valtraining een vast onderdeel bij de klimcursussen van regio Amsterdam. De cursisten zijn doorgaans ‘suitably impressed’ over de heftigheid van een voorklimval, zelfs bij een op het eerste gezicht bescheiden afsprongafstand. Dit geldt voor de vallende klimmer maar zeker ook voor de zekeraar die vaak zijn eigen kleine luchtreis onderneemt.

Een terugkerend punt van discussie bij dit soort val oefeningen is de vraag of de zekeraar wel of niet dynamisch moet zekeren. Dynamisch zekeren betekent dat de zekeraar er doelbewust naar streeft om extra touw uit geven op het moment dat de klimmer wordt afgeremd door het steeds strakker staande touw. Dit kan op verschillende manieren: door het touw wat extra door het zekerapparaat laten slippen, of door wat afstand tot de wand te houden en tijdens de val een stap naar voren te doen. De gedachte is dat door dynamisch zekeren weliswaar de valafstand wordt vergroot maar dat door het beschikbaar maken van extra touw tijdens de afremfase, de vangkracht¹ over een langer tijd wordt uitgesmeerd waardoor deze kleiner wordt. Voor de goede orde: dynamisch zekeren betekent zeker niet dat je een grote touw lus moet laten hangen tussen het zekerapparaat en de eerste haak. Dit vergroot alleen de valenergie, het is uitstel van executie en de vangkracht wordt er alleen maar groter door.

De dynamische zekertheorie heeft zo zijn critici. Sommige mensen redeneren als volgt: Vooral een lichte zekeraar komt al snel los van de grond. Dit geeft automatisch het effect dat er, juist op het moment dat het nodig is, meer touw beschikbaar komt. Een actieve dynamische zekertechniek is lastig. Te vroeg touw uitgeven werkt averechts, het touw door het zekerapparaat laten slippen heeft zijn beperking omdat er maar een korte slag beschikbaar is en vergroot mogelijk het risico van loslaten. Wellicht is het zo dat, zelfs als de techniek perfect wordt beheerst, dat dit voornamelijk tot gevolg heeft dat de zekeraar minder ver van de grond komt waarmee het eindresultaat niet zoveel verschilt van de statische methode. Het zou uiteindelijk zo maar kunnen dat al het dynamische gedoe alleen leidt tot een langere valweg zonder noemenswaardige comfortwinst voor de vallende klimmer. Hierover kan eindeloos woorden doorgeboomd aan de borreltafel maar wij hebben besloten de koe bij de horens te vatten en een en ander in de praktijk te meten. In het kader van een eerste-jaarsproject bij de afdeling natuurkunde van de Universiteit van Amsterdam hebben we klimmers en zekeraars voorzien van versnellings sensoren die op afstand kunnen worden aangestuurd en uitgelezen met een PC op de grond. En dan, springen maar.

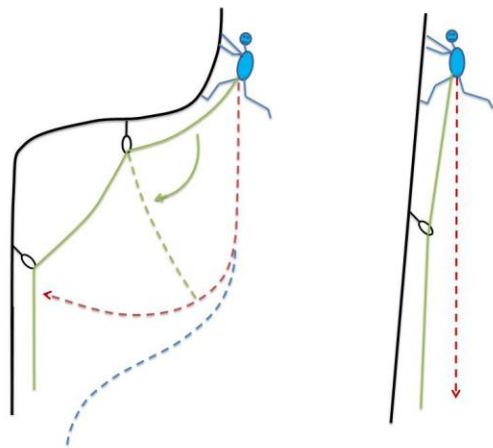
¹ In het Nederlands is het in klimmersjargon gebruikelijk om te spreken van vangstoot waar vangkracht wordt bedoeld. In de natuurkunde is het woord ‘stoot’ gereserveerd voor de kracht maal de tijd waarover deze kracht werkt. Wij geven er de voorkeur aan om hier de natuurkundig juiste naamgeving te hanteren.



Erik tijdens het 'afklimmen'.

Voordat we in het meetgeweld duiken nog een opmerking over zekermethodes. Er zijn in grote lijnen twee redenen om dynamisch zeker te overwegen. De eerste is bij een situatie zoals geschetst in het linker plaatje in figuur 1. Hier is de klimmer zojuist over een dakrand geklommen. Als hij valt dan is er sprake van een pendelbeweging rond de teruggeplaatste laatste tussenzekering en

zal hij met een beetje pech onaangenaam tegen de wand worden gesmaakt. Door wat touw uit te geven tijdens de val zal het valpad van de klimmer meer lijken op de gestippelde blauwe lijn en wordt de klap tegen de wand vermeden. Het staat min of meer buiten discussie dat dit werkt. Vraag het maar aan de liefhebbers van dit soort dakroutes. Wij zullen op deze situatie dan ook niet verder ingaan. Wat wij onderzocht hebben is de situatie zoals weergegeven in het rechter plaatje van figuur 1. De wand is hier recht of slechts heel licht overhangend. De klimmer valt ongeveer recht naar beneden. In dit geval is de zekerstijl alleen van invloed op de maximale vangkracht.



Figuur 1. Twee klim- en valsituaties.

De valproeven.

De valproeven zijn uitgevoerd in de klimhal van het sportcentrum van de UvA. We hebben een route uitgekozen in een licht overhangend wanddeel. In totaal zijn 18 klimvallen gemaakt door verschillende combinaties van de drie klimmers/zekeraars. Klimmer één woog 64 kg, klimmer twee 75 en klimmer drie 82 kg. De afspongspositie was steeds dezelfde, met het inbindpunt ongeveer 1.4 m boven de onderste karabijner van de laatste tussenzekering. De hoeveelheid uitgegeven touw was ruim 10 m wat leidt tot een nominale valfactor van ongeveer 0.28. De totale valafstand was om en nabij de 6 m, ruim drie meter vrije val gevolgd door een afremtraject dat bepaald werd door touwrek, touwslip in het zekerapparaat en het loskomen van de zekeraar van de grond. Vanzelfsprekend was de valafstand wat groter voor de combinatie lichte zekeraar/zware klimmer dan omgekeerd. Elke

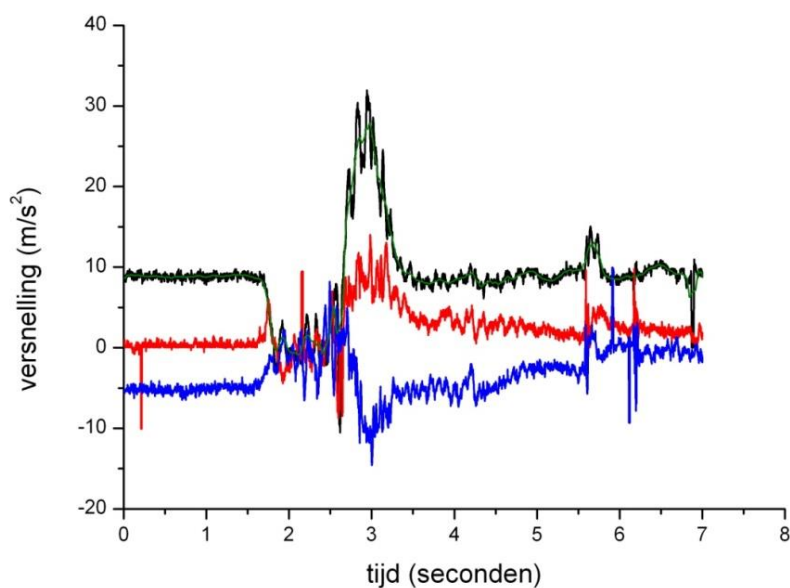
klimmer/zekeraarcombinatie maakte zes vallen, drie keer zo statisch mogelijk en drie zo dynamisch mogelijk. Bij de meeste vallen is gezekerd met een ATC-guide maar we hebben ook twee vallen onderzocht met de in principe statischer werkende Grigri. Elke val leidt tot zes datasets: de waarden voor de versnelling langs de verticale en de twee horizontale richtingen, dit voor zowel de klimmer als voor de zekeraar. Helaas is een deel van de meetgegevens verloren gegaan door een fout in de dataopslag. De gegevens van de sensor van de zekeraar bleken lastig te interpreteren. We beschrijven hier alleen de data horend bij de vallende klimmer.

Details van de meetapparatuur staan in een apart kader beschreven. Hier volstaat het te zeggen dat de sensor eigenlijk niets anders is dan een miniatuur weegschaal. Als de klimmer op de grond staat of op het afspringpunt dan is de meetwaarde van de twee horizontale versnellingscomponenten nul en de verticale $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, de zwaartekrachtsversnelling. Tijdens de vrije-valfase zijn alle versnellingscomponenten nul: de vallende klimmer is gewichtloos. Tijdens de afremfase van de val kan uit de meetwaarden rechtstreeks de kracht die het touw op de klimmer uitoefent worden bepaald. De sensoren (die ongeveer een gram wegen) zitten met sporttape op de blote rug van klimmer en zekeraar geplakt, de processor zit in een beschermend doosje aan de gordel en de batterij zit de broekzak.

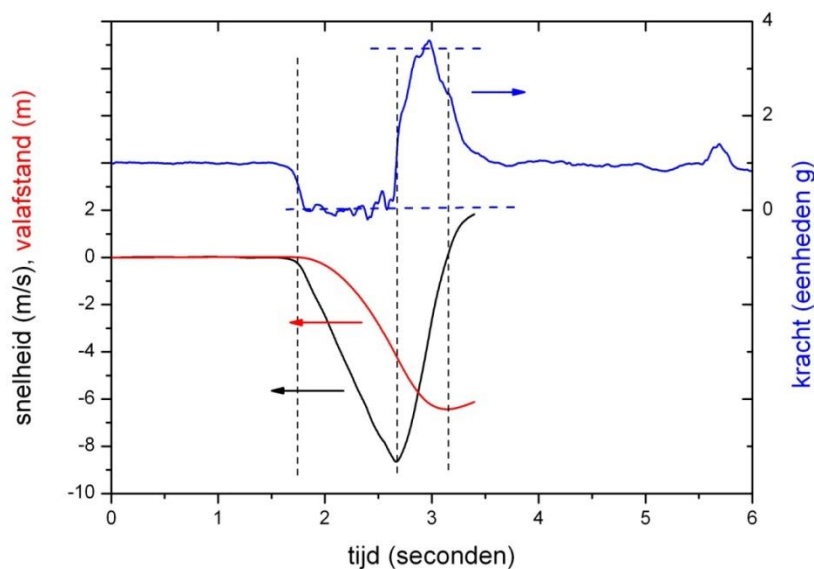
Resultaten van de metingen.

In figuur 2. is een meetserie weergegeven van de sensor op de rug van een klimmer. De data bevatten nogal wat storing. Verder zien we oscillaties in de gemeten versnelling. Deze kunnen het gevolg zijn van het bewegen van de sensor en de klingordel ten opzichte van het lichaamszwaartepunt, het periodiek veranderen van de remkracht van het zekeraparaat en de omleidkarabiner (dit schokken van het touw heet in jargon de stick-slip instabiliteit) en wellicht het trillen van het touw (het gedraagt zich als een gespannen gitaarsnaar). Hoe het ook zij, de storing en de snelle oscillaties zijn bij de verwerking achteraf op de computer zo goed als mogelijk digitaal weggefilterd. De gladdere getrokken lijn in figuur 2 is een voorbeeld van de gefilterde versie van een van de gemeten versnellingscomponenten.

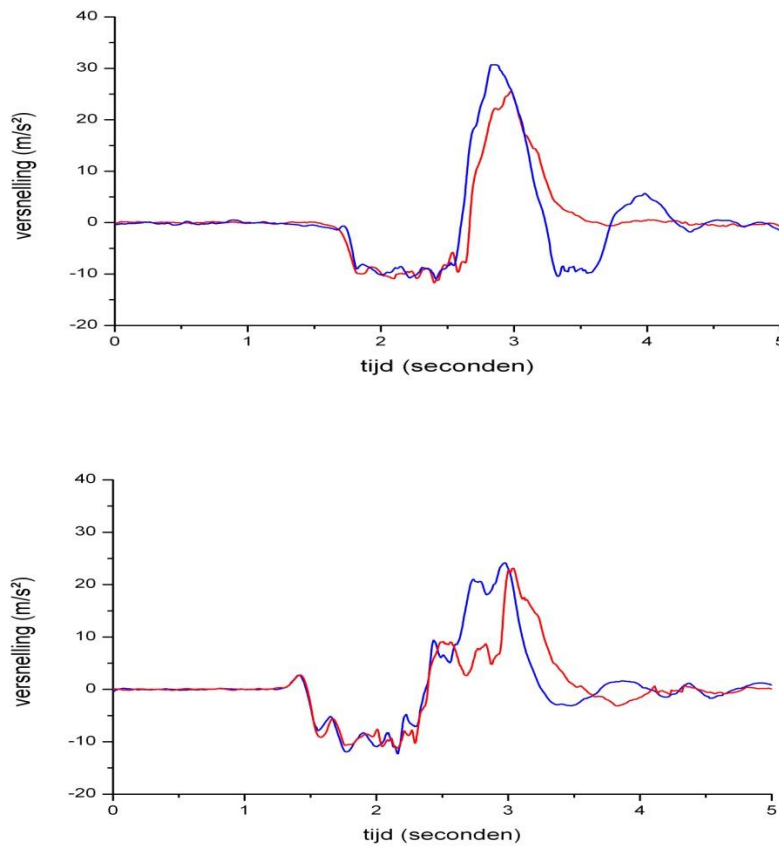
Met behulp van deze gegevens kan rechtstreeks de vangkracht worden bepaald maar ook, na wat rekenwerk, de snelheid en de valafstand ten opzichte van het afspringpunt. In figuur 3 is dit weergegeven voor de meting van figuur 2. De bepaling van de valsnelheid en de gevallen afstand is niet heel erg nauwkeurig. We hebben bij de analyse de situatie vereenvoudigd door aan te nemen dat de gemeten versnelling uitsluitend een gevolg is van de kracht in het touw. Hierbij is verwaarloosd dat tegen het einde van de val er meestal een bijdrage is van het tegen de muur afzetten met de voeten. Ook de centrifugale kracht die het gevolg is van rotatie van de lichaamsas tijdens de val en het naschudden van het lichaam aan het eind van de val zijn buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2. Ruwe data van de drie gemeten versnellingscomponenten voor een van de vallen. De gladde groene curve is het resultaat van het filteren van de zwarte meetwaarden.



Figuur 3. Anatomie van een klimval: de vangkracht (blauwe curve, rechter schaal) uitgerukt in de valversnelling g . De horizontale stippellijnen markeren de vrije-valfase (de klimmer is hier gewichtloos) en de maximale vangkracht. De waarde die wordt afgelezen op de rechteras geeft aan dat op dit moment de klimmer een kracht van ruim drie maal zijn lichaamsgewicht ondervindt door het strak-staande touw. De zwarte en de rode curve zijn de snelheid en de gevallen afstand (af te lezen op de linker as). De verticale lijnen markeren het begin van de vrije val, het moment van maximale snelheid en het diepste punt van de val.



Figuur 4 Versnelling bij statisch (blauw) versus dynamisch (rood) zekeren. Een negatieve versnelling betekent dat de klimmer steeds sneller valt, een positieve waarde geeft aan dat hij wordt afgeremd. Bovenste paneel: klimmer 64 kg, zekeraar 82 kg. Onderste paneel: klimmer 82 kg, zekeraar 75 kg. Let op het omhoog veren van de lichte klimmer bij de statisch gehouden val (de klimmer wordt hier zelfs weer even gewichtsloos aan het eind van de val). De maximale versnelling is voor deze klimmer zichtbaar kleiner bij de dynamische methode. In de onderste grafiek is te zien dat het touw bij de val van de zwaardere klimmer kennelijk iets te vroeg wordt uitgegeven bij de dynamische poging. De maximale versnelling treedt daardoor iets later op maar wordt niet lager dan bij het statische geval. Alleen de valweg is hier langer.

Figuur 4 laat het verschil zien tussen statisch en dynamisch zekeren. De uitleg van wat er gebeurt is te zien in het onderschrift van de figuur.

De volgende tabel vat het belangrijkste resultaat van de metingen samen. In de eerste twee kolommen staan de massa van de klimmer en de zekeraar, in de derde kolom de massaverhouding. De vierde en vijfde kolom geven de zekermethode (statisch of dynamisch) en het gebruikte zekerapparaat. De laatste twee kolommen geven het meetresultaat, weergegeven als g-waarde en als kracht in kN. De vangversnelling a_{\max} (g-waarde) is de touwkracht, uitgedrukt als in het aantal malen het gewicht van de klimmer. Ter vergelijking, een straaljagerpilot ‘trekt’ ongeveer 10 g als hij zijn kist in een scherpe bocht smijt. Door de

bovenstaande vereenvoudiging van de analyse zijn de waarden in de laatste twee kolommen waarschijnlijk consequent iets hoger dan in werkelijkheid.

M_{klim} (kg)	M_{zek} (kg)	$M_{\text{klim}}/M_{\text{zek}}$	Zekering(S/D)	zekerapparaat	a_{max} (g)	F_{max} (kN)
64	82	0.78	S	ATC-guide	3.8	2.4
64	82	0.78	D	ATC-guide	3.3	2.0
82	75	1.09	S	ATC-guide	3.1	2.4
82	75	1.09	S	ATC-guide	3.3	2.6
82	75	1.09	D	ATC-guide	3.1	2.4
82	75	1.09	D	ATC-guide	2.9	2.3
75	64	1.17	S	ATC-guide	3.1	2.2
75	64	1.17	D	ATC-guide	2.9	2.1
75	64	1.17	D	ATC-guide	3.1	2.3
75	64	1.17	S	Grigri	3.2	2.3
75	64	1.17	D	Grigri	3.0	2.1

Conclusie.

Als alle rook is opgetrokken, wat kunnen we dan concluderen uit al deze gegevens. Om te beginnen, de conclusies zijn allerminst in graniet gebeiteld. Er kleven nogal wat onnauwkeurigheden aan de gebruikte meet- en analyseprocedure. Toch kunnen we voorzichtig wat trends vaststellen.

- Het is een bekende boekjeswijsheid dat de valafstand bij een voorklimval wordt gegeven door twee maal de afstand tot de laatste haak plus ‘een klein beetje’ wegens rek en doorschieten van het touw. De mathematische valafstand is in ons geval ongeveer 3 m. Het ‘kleine beetje’ is nog eens 3 m. Naast touwrek wordt er (of je het wil of niet blijkt) dynamisch gezekerd. Vergeet dus die boekjes.
- De meetnauwkeurigheid van de gemeten versnellingen en vangkrachten is ongeveer 10%. De verschillen tussen dynamisch en statisch zekeren zijn meestal niet veel groter dan die meetprecisie. Een uitzondering is het geval van de lichte klimmer en de zware zekeraar. In dit geval wordt een verschil van 15 tot 20% gemeten in het voordeel van de dynamische methode.
- De maximaal optredende vangkracht (uitgedrukt in kN) is voor alle klimmer/zekeraarcombinaties vergelijkbaar. Dit geldt niet voor de maximale versnelling. De lichtere klimmer ondervindt een meetbaar grotere g-kracht. Dit is niet verwonderlijk. Bij klettersteigsets wordt er vaak op gewezen dat deze ongeschikt zijn kinderen. Door hun kleine massa ondervinden ze een relatief grote versnelling bij een gegeven kracht. Dit kan gevaarlijke situaties opleveren. Overigens zijn in ons experiment zelfs de grootst optredende versnellingen ruim onder de 4 g. Dit is prima te verdragen door het lichaam.
- Dynamisch zekeren is lastig. In een paar van de geanalyseerde dynamische vallen is uit de meetgegevens op te maken dat het touw in een te vroeg stadium wordt uitgegeven. De maximale vangkracht wordt zo op een later tijdstip bereikt maar de vangpiek is niet significant lager dan in het statische geval. Het ziet er door de langere

valweg allemaal reuze dynamisch uit maar het helpt niet echt. De timing is erg kritisch en hoe dit in de praktijk moet gebeuren is moeilijk aan te geven.

- In het begin van dit stuk is de hypothese geponeerd dat een klimval die over het lichaam wordt gezekerd vanzelf al dynamisch is doordat de zekeraar los komt van de grond. Dit principe lijkt redelijk op te gaan als de zekeraar lichter is dan de klimmer. Het maakt in dit geval betrekkelijk weinig uit wat je doet. Bij een zwaardere zekeraar is er wel een verschil. Hier is de aanbeveling dan ook wellicht: maak, met mate, gebruik van enige afstand tot de wand en probeer wat extra touw uit te geven door het zekeraparaat (als dat kan met het gebruikte zekeraparaat). Doe dit overigens niet door het touw door de hand te laten glijden (brandwondenrisico en mogelijk controleverlies).
- Hoe dan ook, we kunnen voorzichtig stellen dat de nadruk die sommige mensen leggen op de absolute noodzaak om dynamisch te zekeren omdat anders de vangkracht op de klimmer onverantwoord hoog zou zijn, op grond van deze proeven als ietwat overtrokken gekenschetst kan worden.
- Tot slot, de gemaakte voorklimvallen zijn redelijk representatief voor klimhalsituaties en goed behaakte sportklimroutes. Toch kunnen we ook iets zeggen over wat er gebeurt bij zekeren vanaf een standplaats. Als een zware zekeraar leidt tot een grotere vangkracht dan geldt dit zeker voor een 'oneindig zware' zekeraar, d.w.z. bij zekeren over de standplaats. In het blad 'Bergundsteigen' [1] staat een artikel waarin Max Berger laat zien dat de kracht op de bovenste tussenzekering tot 50% hoger is bij de volledig statische methode (zekeren over de standplaats) dan wanneer er over het lichaam wordt gezekerd (uiteraard met in achtname van voldoende afstand tot de essentiële dummy runner). De titel van het verhaal laat er geen twijfel over bestaan over hoe de auteur denkt over het standplaats-zekeren. Hij stelt onomwonden dat het massaal negeren van de nog steeds geldende aanbevolen methode, veel levens heeft gered. Overigens, het door Berger aangehaalde onderzoek is uitgevoerd met statische gewichten, niet met klimmers en zekeraars van vlees en bloed.

Enkele technische details over de meetapparatuur

Voor de meting is gebruik gemaakt van 2 raspberry pi microprocessorsystemen met een 3D accelerometert. Zowel de klimmer als zekeraar kreeg een dergelijk systeem omgebonden. De raspberry pi is een populair microprocessorsysteem van 8x6 cm waarop een Linux operating system draait. De voeding werd verzorgd door een battery pack voor mobiele telefoons. Op ieder processorboard werd een ADXL345 sensor aangesloten die de meetgegevens van 3 assen naar de processor communiceerde via een I²C protocol. Meetgegevens werden vervolgens via WiFi naar een nabijgelegen laptop gestuurd. Alle software is geschreven in de programmeertaal Python.

Verantwoording.

Dit experiment is uitgevoerd door vier 1^e-jaarsstudenten natuurkunde aan de UvA: Joris Schefold, Joris Pierot, Harm van Ekeren en Lonnie Bregman. Het Project is begeleid door Taco Walstra en Tom Hijmans met hulp van Eric Clay op de experimenteerdag. Het idee om een dergelijk experiment te doen is oorspronkelijk afkomstig van Erik. Erik en Tom zijn sportkliminstructeurs bij de regio Amsterdam, Taco is alpien instructeur en voormalig lid van de Veiligheidscommissie van de NKBV.

Een videoimpressie van het hier beschreven experiment is voorlopig te vinden op de volgende link:

<http://tc.science.uva.nl/np1/index.html>

[1] Max Berger: 'Steinzeitmethode fixsicherung?', in Bergundsteigen 3/12, blz. 36.