

Algemene instructies: Experimentele toets (20 punten)

Het niet voldoen aan een van de volgende voorwaarden kan leiden tot diskwalificatie

19 juli 2025

De experimentele toets duurt 5 uur en is in totaal 20 punten waard. Succes van Ad en Enno!

Het begin en het einde van de toets worden aangegeven door een mededeling, evenals elk uur van de verstreken tijd, en dertig, vijftien en vijf minuten voor het einde van de toets.

Maak de enveloppen en dozen pas open als je daar opdracht toe krijgt.

De volgende voorwerpen zijn voorzien voor gebruik op de tafel: (1) een balpen, (2) een vulpotlood, (3) een gum, (4) een liniaal met schaalverdeling, (5) een passer, en (6) een wetenschappelijke rekenmachine.

Tijdens het examen

- Gebruik de meegeleverde balpen. Als je het vulpotlood gebruikt om je aantekeningen, figuren, tabellen en grafieken te maken, moet je de contouren van de uiteindelijke versie over trekken met de balpen.
- Gebruik de speciale bladen met het label **A** voor je definitieve antwoorden. Vul de juiste vakjes in met je antwoorden en de nodige observaties. Teken grafieken als dat nodig is. Streep door wat je niet nagekeken wilt hebben.
- Er zijn blanco werkbladen met het label **W** om uitwerkingen en berekeningen te doen. Gebruik de daarvoor bestemde bladen. Streep onnodige antwoorden en kladwerk dat niet beoordeeld hoeft te worden door. Gebruik alleen de voorkant van elk vel en schrijf niet buiten de marge.
- Extra werkbladen met het label **Z** zijn beschikbaar als je die nodig hebt. Steek de "Help"-vlag omhoog en laat het de surveillant weten.
- Houd je antwoorden beknopt en leesbaar. Gebruik vergelijkingen, logische operatoren, symbolen en schetsen om je gedachten het beste over te brengen. Vermijd langdradigheid en veel woorden, omdat de markers mogelijk niet meertalig zijn.
- Kwantificering van de onzekerheid is niet nodig, tenzij anders aangegeven. Aan de andere kant mag u zelf bepalen hoeveel datapunten of meetreeksen nodig zijn, tenzij anders aangegeven.
- Verlaat je werkplek niet zonder toestemming. Als je een toiletpauze of andere hulp nodig hebt, steek dan de vlag(gen) "Toilet", "Water" of "Help" omhoog.

Aan het einde van de toets

- Stop onmiddellijk met schrijven wanneer het einde van het examen wordt aangekondigd.
- Doe alle bladen in de envelop met venster. Rangschik ze met de bedrukte zijde naar boven in de volgende volgorde: voorblad bovenaan, algemene instructies, vragenbladen (**Q**), antwoordbladen (**A**), werkbladen (**W**) en eventuele extra werkbladen (**Z**). Rangschik ze volgens hun paginanummer. Controleer of je ID, naam en stoelnummer op het schutblad zichtbaar zijn door het venster.
- Je surveillant laat je weten wanneer je kunt vertrekken. **Neem niets mee.** Als de tijd het toelaat, zet je alles terug zoals het was. Je medewerking wordt zeer op prijs gesteld.

Specifieke instructies

Verwijs in je uitwerkingen altijd naar de grootheden die in de instructies worden aangegeven, tenzij anders vermeld. Wanneer reeksen metingen worden gedaan, moeten de gemeten grootheden expliciet worden aangegeven in de tabellen, evenals de geplote grootheden indien deze verschillend zijn. In alle grafieken moeten de verschillende grootheden duidelijk worden aangegeven. In alle gevallen moeten de eenheden van alle gebruikte grootheden worden vermeld.

Metingen aan het aardmagnetisch veld (10 punten)

Inleiding

Het doel van dit experiment is om de horizontale component van het aardmagnetisch veld te meten. De eigenschappen van een magneet zullen eerst bepaald worden met behulp van een zogenaamde Gouy-balans, voordat deze gebruikt wordt om het aardmagnetisch veld te meten.

In het gehele probleem kunnen onzekerheden bepaald worden uit de grafieken en niet uit de individuele experimentele punten.

Apparatuurlijst

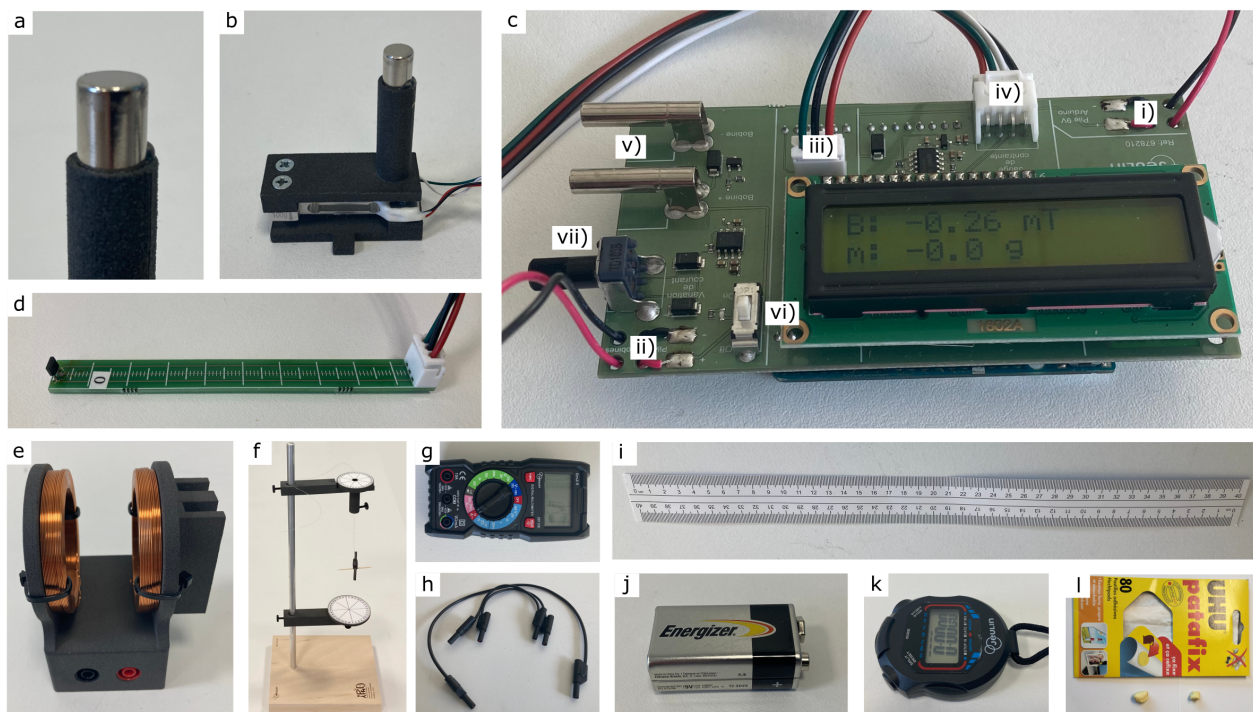


Fig. 1. Foto's van de apparatuur.

De lijst met apparatuur wordt hieronder gegeven en geïllustreerd in Fig. 1. Het aantal items wordt aangegeven tussen [] als het groter is dan één. Vraag om hulp vragen als iets niet blijkt te werken.

- **(a)** Magneten [3]. Eén magneet is bevestigd aan de krachtsensor (b) en mag niet worden verwijderd. Een tweede magneet is in de probe (f) gestoken en mag niet worden verwijderd totdat dit is aangegeven. De derde magneet wordt gebruikt in A.5. Alle magneten beschouwen we als identiek.
- **(b)** Krachtsensor. Aangesloten op de Arduino (c), meet deze sensor de kracht langs zijn as, genoteerd m_{f} in grammen-kracht ("g"), wat de kracht is die wordt ervaren door een massa van 1 gram op het aardoppervlak in het zwaartekrachtsveld ($g_0 = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Een van de magneten (a) is eraan bevestigd. Telkens als deze sensor weer wordt ingeschakeld, wordt de sensordisplay op 0 gezet, ongeacht de situatie. *Op deze sensor mogen geen krachten van meer dan 200 gram worden uitgeoefend. Haal de sensor voorzichtig uit de verpakking.*
- **(c)** Arduino met digitaal display. Dit element wordt gebruikt om de spoelen (e) van stroom te voorzien en om kracht- en magnetisch veldmetingen uit te voeren, direct weergegeven in gramkracht ("g") en mT. De batterij (j) die de Arduino van stroom voorziet moet worden aangesloten op slot (i)

en de batterij (j) die de spoelen (e) van stroom voorziet op slot (ii) (let op de polariteit van de aansluiting). De krachtsensor (b) en magnetische veldsensor (d) moeten respectievelijk worden aangesloten op sleuf (iv) en (iii), en de voedingskabels van de spoelen op sleuf (v). Een schakelaar (vi) sluit het voedingscircuit van de spoel (aangegeven door een LED), waarvan de stroomsterkte kan worden geregeld in (vii).

- **(d)** Magneetveldsensor met liniaal. Aangesloten op de Arduino (c) meet deze sensor het veld B_z langs de richting $\vec{e}_z$ van de liniaal, in mT.
- **(e)** Spoelen in anti-Helmholtz configuratie (gewikkeld in tegengestelde richting). Deze spoelen moeten in serie worden geschakeld met de amperemeter (g) en met de Arduino (c) om een magnetisch veld te creëren.
- **(f)** Metalen statief op een houten basis, met hangende probe waar een magneet (a) al in is gestoken, en met hoekmarkeringen. De gedetailleerde montage van dit apparaat wordt hieronder uitgelegd.
- **(g)** Multimeter. Wordt alleen gebruikt als ampèremeter in het bereik 10A. Als de multimeter niet wordt gebruikt, schakelt hij uit en moet hij weer worden ingeschakeld door hem eerst terug te zetten in de stand "OFF". Gebruik niet de twee kabels die in de behuizing van de multimeter zijn meegeleverd.
- **(h)** Elektrische snoeren [3].
- **(i)** 40 cm liniaal.
- **(j)** 9V batterijen [3]. Hun capaciteit is van de orde van $300 \text{ mA} \cdot \text{h}$.
- **(k)** Stopwatch.
- **(l)** Kleefpasta. Kan in het gehele probleem gebruikt worden.

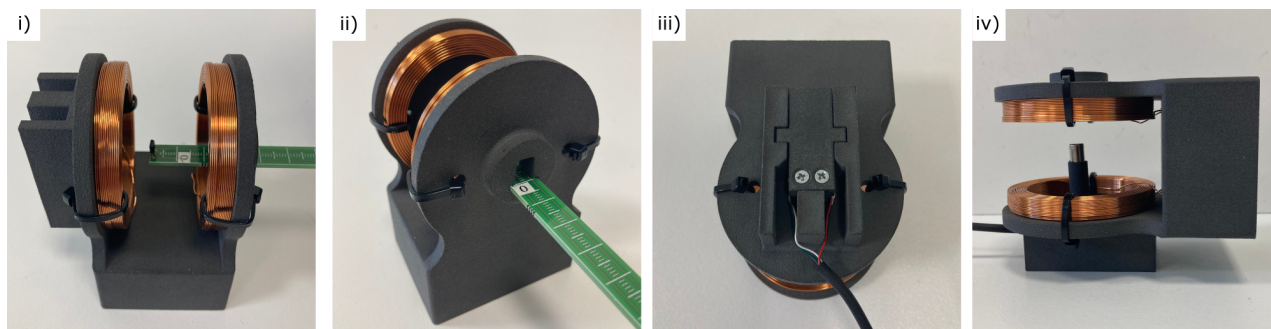


Fig. 2. Gebruik van de sensoren in de anti-Helmholtz-spoelen.

Gebruik van de sensoren gekoppeld aan de Arduino (Fig. 2)

De magneetveldsensor (d) kan in de spoelen (e) schuiven zoals getoond in (i), terwijl de sensor het veld op hun as meet. De $z = 0$ positie voor de sensor wordt getoond in (ii), en z neemt toe naarmate hij binnen de spoelen beweegt.

De krachtsensor (b) wordt in de spoelen gestoken zoals getoond in (iii), voordat de spoel wordt gedraaid zoals in (iv) zodat de transducer verticaal staat. *Om dit te doen, moet je de elektrische draden door de bijgeleverde goten leiden.*

Installatie van apparatuur (f) (Fig. 3), alleen te monteren voordat wordt begonnen met deel B, met een 34 cm draad

- Steek de metalen stang (f0a) in de houten plaat met plastic voetjes (f0b) om zodoende het statief (f0) te vormen.

Experiment



International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

Q1-3

Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

- Het onderdeel (f1) bevindt zich op het onderste deel en markeert de hoek van de probe. Installeer de arm (f1b) op de metalen paal met een schroef (f4) en zet vervolgens het onderdeel (f1a) erop vast met een tweede schroef (f4).
- Het onderdeel (f2) bevindt zich op het bovenste deel en houdt de draad vast die de probe ondersteunt. Installeer de arm (f2b) op de metalen stang met behulp van een schroef (f4) en plaats vervolgens het onderdeel (f2a) erop.
- Om de probe (f3) te bouwen, steekt u de traagheidsstaaf (f3b) en een tandenstoker (f3c) in het draageronderdeel (f3a) waarop al een magneet (a) is geplaatst. Steek de draad die de probe ondersteunt in het onderdeel (f2a) en zet het vast met een schroef (f4). Door aan onderdeel (f2a) te draaien, verandert de hoek waaronder de draad is bevestigd. Met de tandenstoker kan de hoekpositie van de peul nauwkeurig worden gemeten.

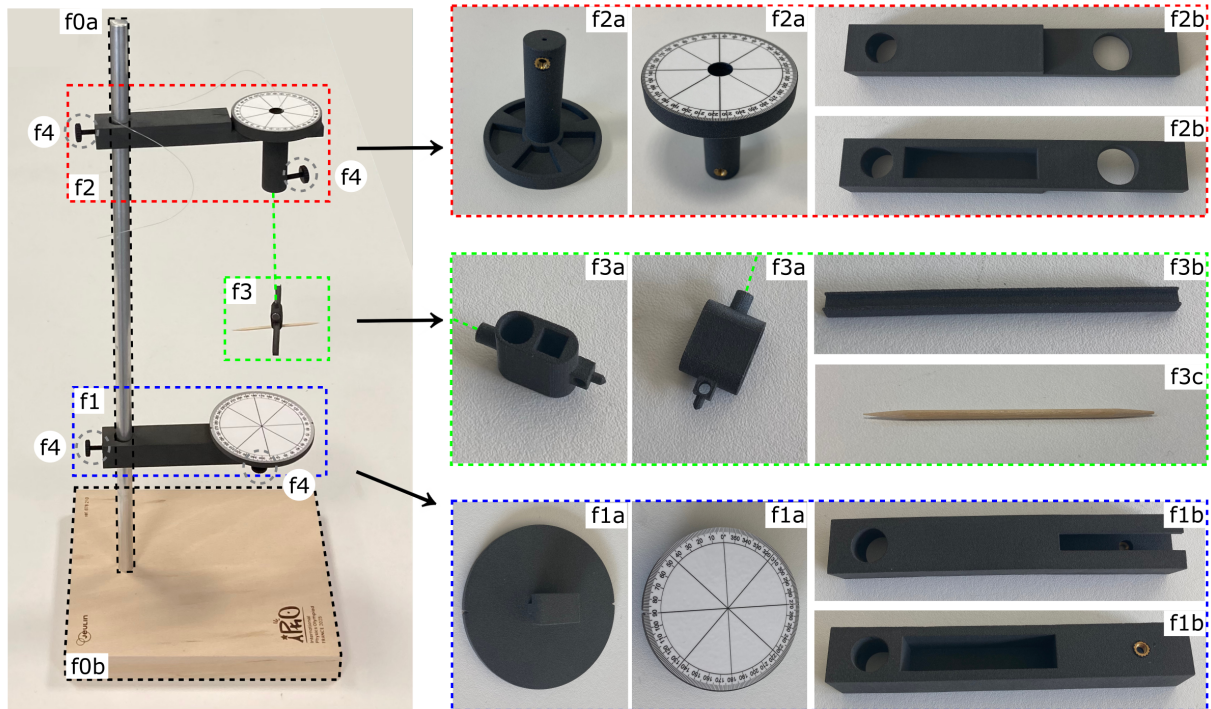


Fig. 3. Installatie van de probe aan het metalen statief. De onderdelen (f1a), (f1b), (f2a), (f2b) en (f3a) worden vanuit twee verschillende hoeken getoond. Er zijn vier identieke (f4) plastic schroeven.

Deel A. Gouy-balans en magnetisch moment

Theoretisch model

We nemen aan dat een magneet kan worden behandeld als een magnetische dipool met een magnetisch moment $\vec{m}_m$. De kracht die zo'n dipool van magnetisch moment $\vec{m}_m = m_m \vec{e}_z$ ondervindt in een magnetisch veld $\vec{B} = B(z) \vec{e}_z$ is

$$\vec{F} = m_m \frac{dB(z)}{dz} \vec{e}_z. \quad (1)$$

Als een elektrische stroom i door de anti-Helmholtzspoelen stroomt, wordt het veld $\vec{B}$ langs de eenheidsvector $\vec{e}_z$ van de omwentelingsas gegeven door

$$\vec{B}(z) = \alpha i(z - z_0)\vec{e}_z. \quad (2)$$

Deze vergelijking geldt alleen in de buurt van het middelpunt van het apparaat, waarvan de positie is aangegeven met $z = z_0$.

Magnetisch veld in de spoelen

- | | | |
|------------|--|-------|
| A.1 | Maak een numerieke schatting van de typische bedrijfstijd τ van één van de batterijen die in het experiment worden gebruikt, met een elektrische stroom in de orde van 2 A. | 0.2pt |
|------------|--|-------|

Met dit resultaat moet je rekening houden bij je metingen later, wetend dat de spoelen alleen worden gebruikt in deel A. Merk op dat er een reservebatterij beschikbaar is indien nodig.

Plaats de magneetveldsensor in de spoelen, zoals getoond in Fig 2. Zie ook deze figuur voor de positie van de sensor in de spoelen.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.2 | Meet en plot bij vaste elektrische stroomsterkte $i_0 \approx 1.0\text{ A}$ het magnetische veld B_z als functie van de positie z van de sensor op de as van de spoelen. Identificeer het grootste gebied $[z_{\min}, z_{\max}]$ waar het magnetische veld experimenteel lineair is met de positie. | 0.8pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.3 | Door de sensor op twee posities (z_1, z_2) in dit gebied van lineaire afhankelijkheid te plaatsen, trek je een kromme om de afhankelijkheid van $\vec{B}$ van de stroomsterkte uit vergelijking (2) te verifiëren en bepaal je de waarde van α , met zijn onzekerheid. | 0.9pt |
|------------|---|-------|

Gouy balans

Haal de magneetveldsensor uit de spoelen en plaats de krachtsensor er voorzichtig in, zoals beschreven in Fig. 2, met speciale aandacht voor de plaatsing van de elektrische draden in de gootjes.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.4 | Voer experimentele metingen uit van de kracht m_f (hier met eenheid gramkracht) als functie van de stroomsterkte i . Maak een geschikte grafiek om de waarde van het magnetisch moment m_m van de magneet te bepalen, met zijn onzekerheid. | 0.8pt |
|------------|---|-------|

Alternatieve meting van het magnetisch moment

In de dipolaire benadering geldt voor het magnetische veld van een cilindermagneet met magnetisch moment m_m op zijn omwentelingsas z

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 m_m}{2\pi(z - z_a)^3} \quad (3)$$

waarbij z_a niet noodzakelijk het geometrische middelpunt van de magneet is, en waarbij $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$.

A.5 Meet het magnetische veld B_z langs de omwentelingsas van de losse magneet, als functie van de afstand z . Maak een grafiek om het model uit Eq. (3) te verifiëren en laat de experimentele afwijkingen zien. Leid een nieuwe waarde af voor m_m , met onzekerheid. 1.3pt

A.6 Geef, uitgaand van de twee resultaten verkregen in A.4 en A.5, een definitieve experimentele waarde van m_m met zijn onzekerheid. 0.2pt

Deel B. Bepaling van het aardmagnetisch veld

Theoretisch model

We bestuderen nu de oscillerende beweging van de magneet in een horizontaal vlak om de waarde van de horizontale component B_e van het aardmagnetisch veld te bepalen/schatten, zie Fig. 3 en de montagehandleiding boven Fig.3. De probe (f3), die de magneet bevat, ondervindt twee draaimomenten rond de verticale as:

- de torsie van de draad, gemodelleerd als $\Gamma_f = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0)$, waarbij C_f een constante is en L de totale lengte tussen de twee aanhechtingen van de draad en de hoek θ_0 overeenkomt met de hoek als de draad niet gedraaid is,
- het koppel van de magnetische veld van de aarde, wordt gegeven door

$$\Gamma_e = -m_m B_e \sin(\theta - \theta_e)$$

als de hoekpositie van het magnetische veld van de aarde wordt gegeven door de hoek θ_e .

Stel dat J het onbekende traagheidsmoment van de probe en de magneet is. De impulsmomententheorie om de verticale as geeft dan

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Gamma_f + \Gamma_e = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0) - m_m B_e \sin(\theta - \theta_e) \quad (4)$$

Als de $\sin(\theta - \theta_e) \approx \theta - \theta_e$ benadering geldig is, leidt dit tot een sinusoidale oscillatie met een periode T .

Voor dit deel kan kleefpasta (l) in elke vorm of maat worden vervormd en aan andere apparaten of items worden bevestigd.

Let op: Om storing door externe magnetische velden te voorkomen, moet de magneet ten minste 20 cm verwijderd zijn van metalen voorwerpen of magnetische bronnen (inclusief de andere magneten).

Experimentele opstelling en eerste meting

Stel voor de vragen B.1 tot en met B.5 de lengte van de draad in op $L = 34$ cm en zorg ervoor dat de draad niet gedraaid is. In deze instelling nemen we aan dat het koppel van de draad verwaarloosbaar is ten opzichte van het koppel van het magnetisch veld van de aarde, een hypothese waarop we later zullen terugkomen.

Om θ_0 uit te lijnen met θ_e , gebruik je onderdeel (f2a) om θ_0 aan te passen zodat de probe (f3) niet draait wanneer de magneet wordt verwijderd. Plaats vervolgens de magneet weer in de probe en houd θ_0 ongewijzigd tot vraag B.5.

- B.1** Stel een voorschrift voor om B_e experimenteel te bepalen. Benoem de verschillende grootheden die je gaat meten samen met hun eenheden. Geef deze grootheden weer in een gedetailleerd schema en relateer ze aan die in de instructie door middel van een vergelijking. Geef voor elke grootheid aan of deze constant is (fixed, F) of varieert (varies, V) gedurende het voorschrift. 0.3pt

- B.2** Maak met behulp van het hierboven beschreven voorschrift een grafiek om een eerste waarde van B_e te bepalen, met de bijbehorende onzekerheid. 1.1pt

Onderzoek van het koppel van de draad

- B.3** Houd de lengte $L = 34$ cm aan. Onderzoek de beweging van de probe zonder de magneet en bepaal de waarde van C_f , met experimentele onzekerheid, met behulp van twee verschillende metingen van de periodes van twee verschillende systeem situaties. Geef de vergelijking die C_f relateert aan de gemeten grootheden. 0.7pt

- B.4** Geef met behulp van je eerdere metingen de uitdrukking en bepaal numeriek de kritische lengte L_c waarvoor de amplitude factoren C_f/L en $m_m B_e$ van de koppels Γ_f en Γ_e gelijk zijn. 0.3pt
Wat was in vraag B.2 de verhouding $(C_f/L)/(m_m B_e)$? Kies uit de intervallen: [0 %, <1 %]; [1 %, <5 %]; [5 %, <20 %]; [20 %, <50 %]; [50 %, ∞ %].

Metingen in het statisch regime

We stellen nu een statische meting van het magnetisch veld van de aarde voor. Plaats de magneet terug in de probe. Gebruik onderdeel (f2a) in Fig. 3 om de hoekpositie θ_0 aan te passen, waardoor de draad gaat draaien.

- B.5** Nog steeds bij een vaste lengte van $L = 34$ cm, teken een geschikte grafiek om te bestuderen hoe de evenwichtspositie van de magneet θ_{eq} afhangt van de hoek θ_0 , en bepaal een tweede waarde van B_e , met zijn onzekerheid. 1.1pt

- B.6** Verander de lengte L . Herhaal het vorige onderdeel voor twee andere lengtes om de L afhankelijkheid van het draadkoppel te verifiëren. Bepaal met behulp van een uiteindelijke grafiek die alle afhankelijkheden samenvat een nieuwe waarde voor B_e , met zijn onzekerheid. 2.3pt



Metingen aan het aardmagnetisch veld (10 punten)

Noteer de cijfers 0 tot en met 9 in de volgende tabel:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

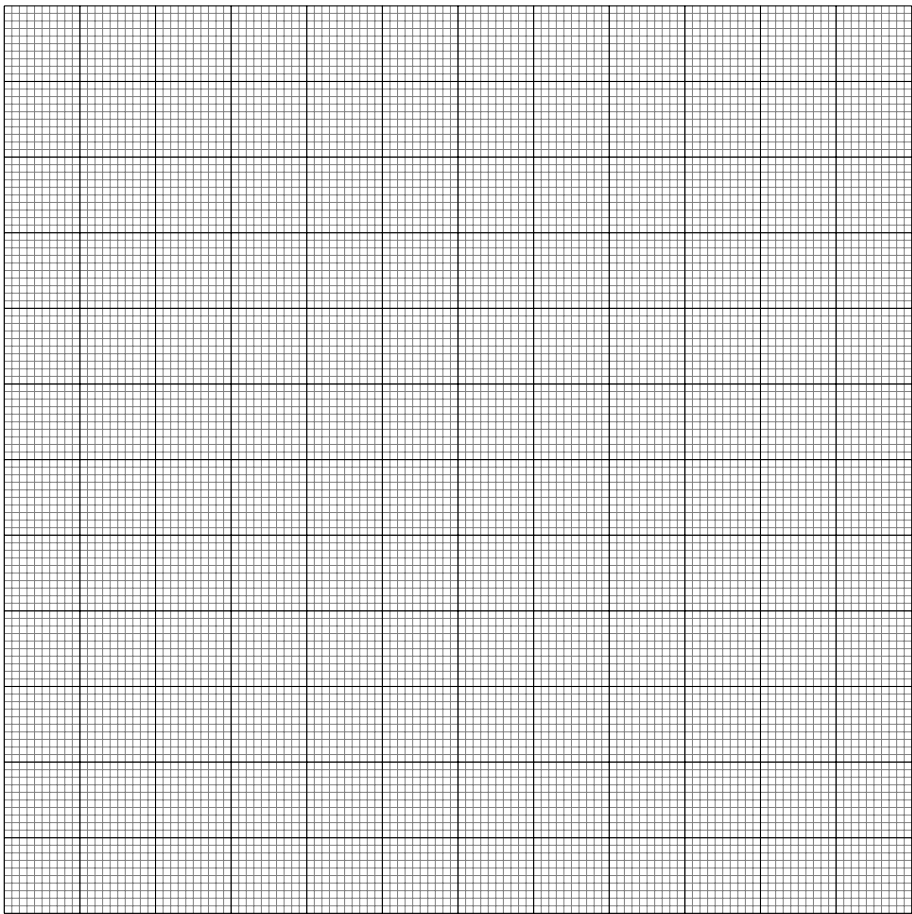
Gouy-balans en magnetisch moment

A.1 (0.2pt)

$\tau =$

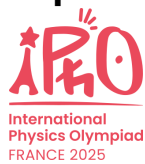
A.2 (0.8pt)

z (mm)													
B_z (mT)													



$[z_{\min}, z_{\max}] =$ mm

Experiment



A1-3

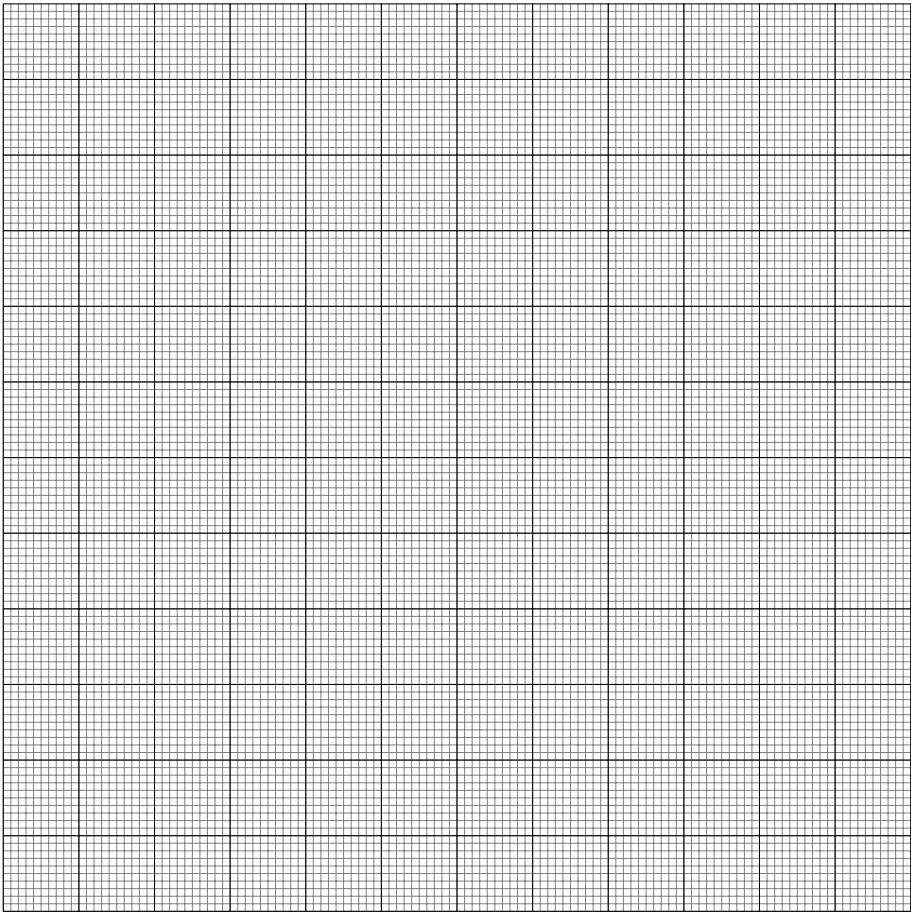
Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

A.3 (0.9pt)

$(z_1, z_2) =$ mm

i (A)										
B_{z_1} (mT)										
B_{z_2} (mT)										

Geplotte grootheden (eenheden):

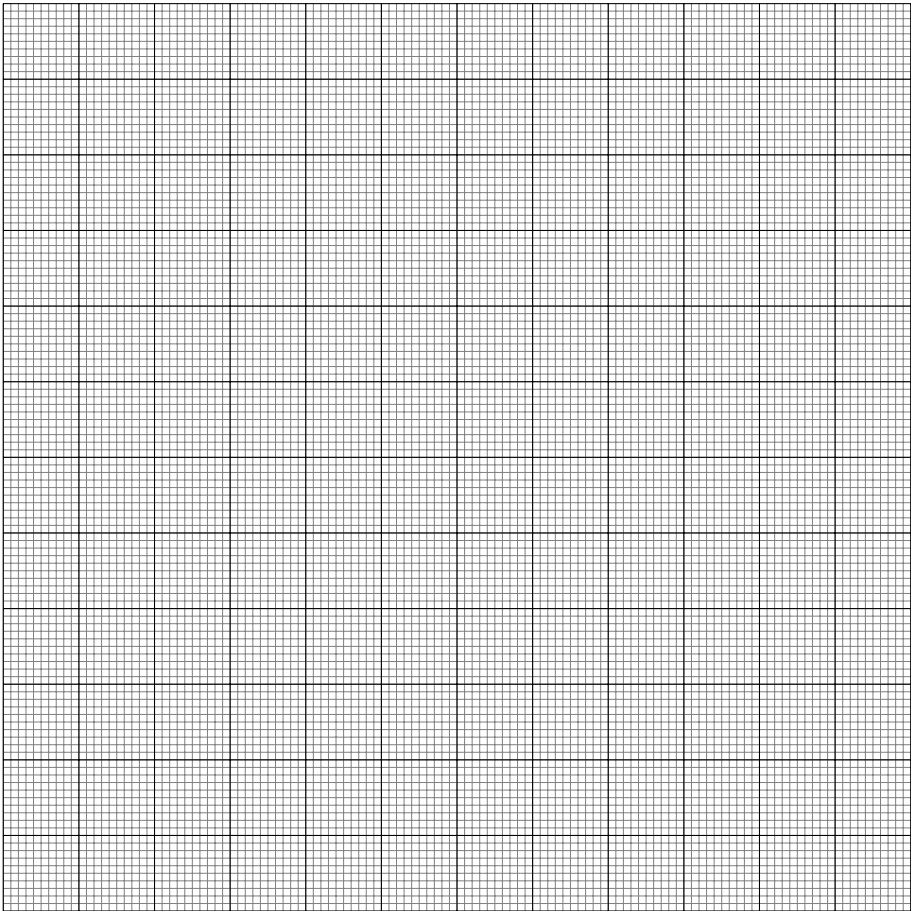


$\alpha =$ $\pm$

A.4 (0.8pt)

i (A)										
m_f (g)										

Geplotte grootheden (eenheden):

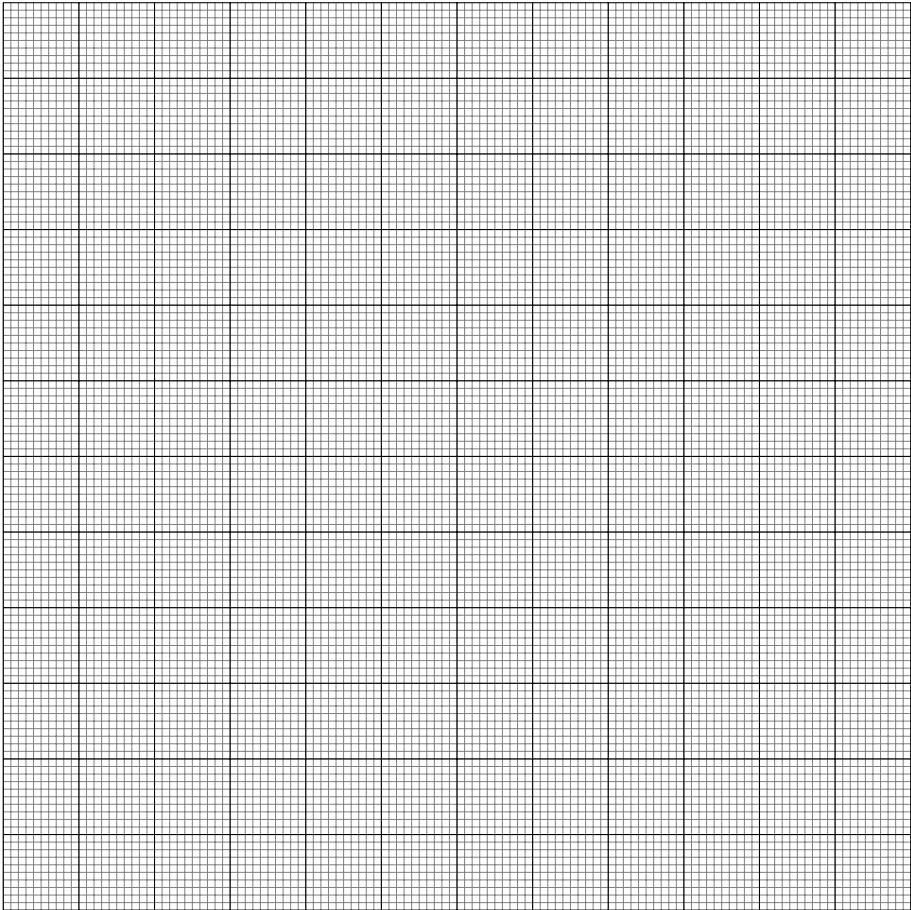


$m_m =$ $\pm$

A.5 (1.3pt)

z (mm)										
B_z (mT)										

Geplotte grootheden (eenheden):



$m_m = \quad \pm$

Experiment



International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

A1-6

Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

A.6 (0.2pt)

$m_m =$ $\pm$

Het magnetisch veld van de aarde bepalen

B.1 (0.3pt)

grootheid	eenheid	Constant (Fixed, F) / Variabel (Varies, V)

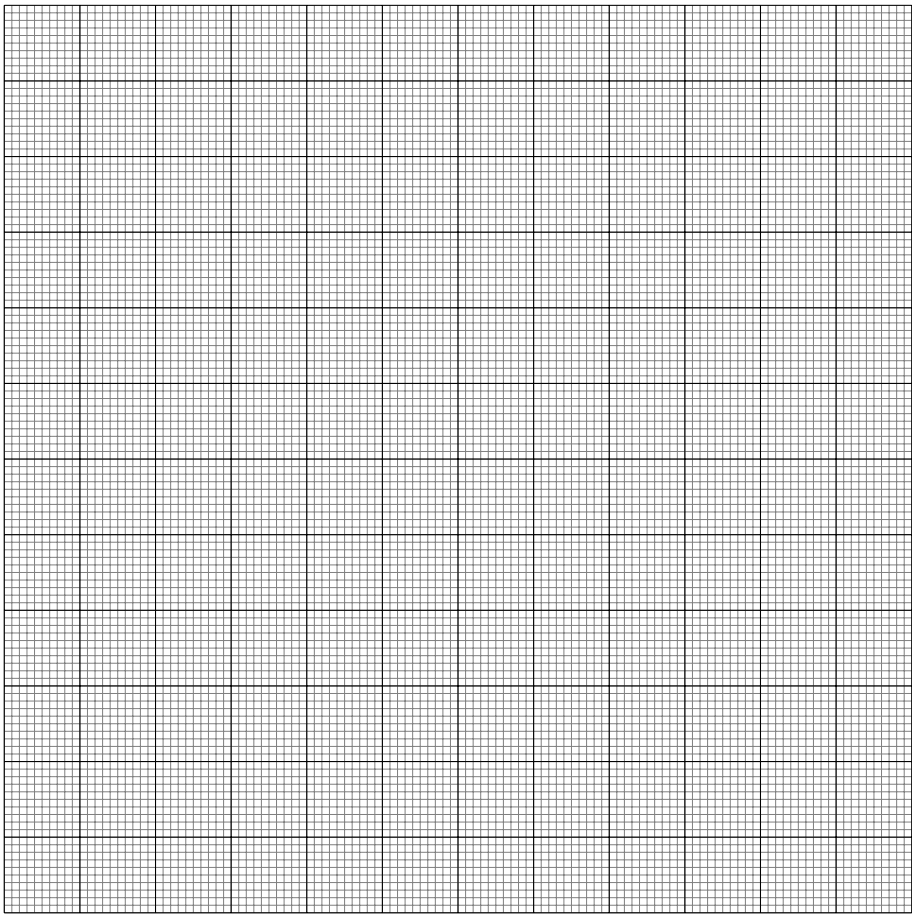
Vergelijking voor grootheden:

Schema:

B.2 (1.1pt)

Gemeten grootheden (eenheden):

Geplotte grootheden (eenheden):



$B_e =$ $\pm$

B.3 (0.7pt)

Specificeer de relevante grootheid voor elke meting:

Relevante grootheid in meting 1 (eenheid):

Periode: $T_1 =$

Relevante grootheid in meting 2 (eenheid):

Periode: $T_2 =$

Uitdrukking van C_f :

$C_f = \quad \pm \quad \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-1}$

B.4 (0.3pt)

Uitdrukking voor L_c :

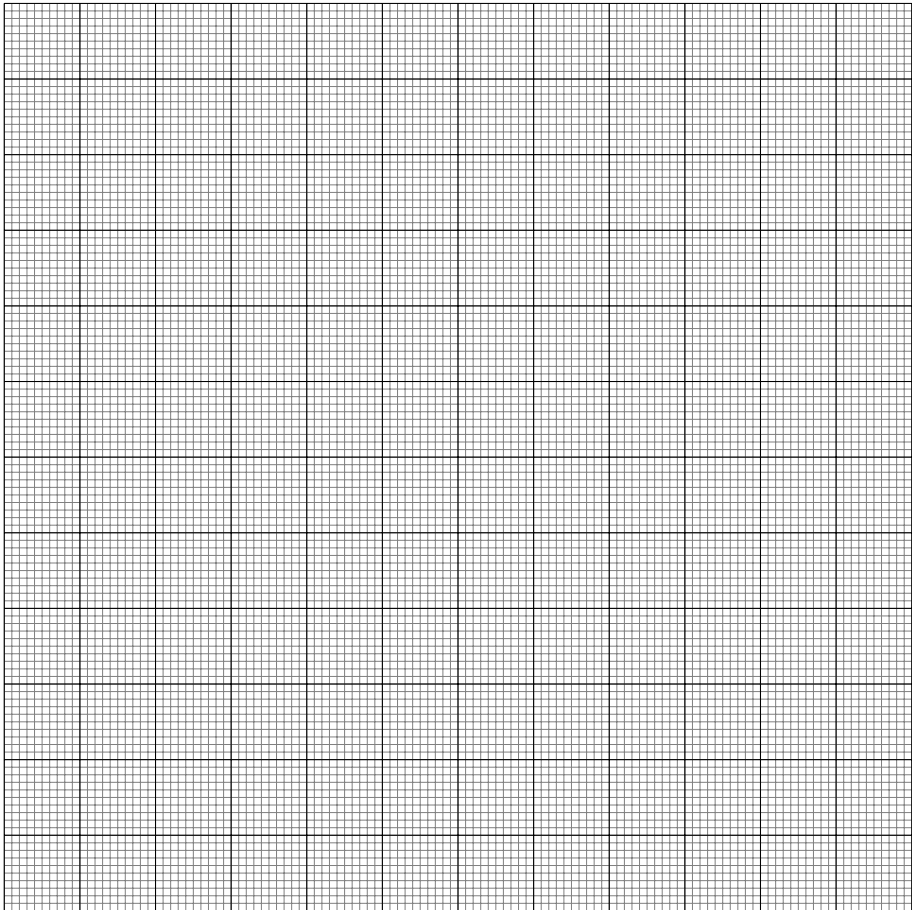
Numerieke waarde $L_c =$

$(C_f/L)/(m_m B_e) \in$

B.5 (1.1pt)
Evenwicht 1: $L = 34\text{ cm}$

θ_0 (rad)										
θ_{eq} (rad)										

Geplotte grootheden (eenheden):



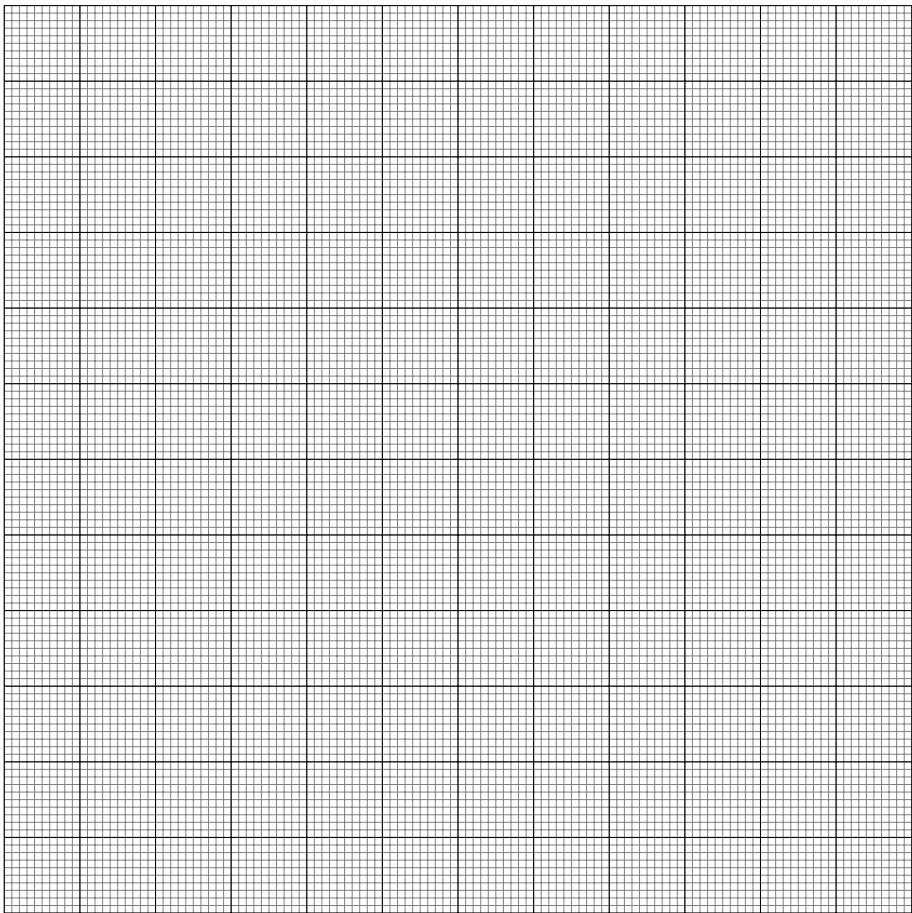
$B_e = \pm$

B.6 (2.3pt)

Evenwicht 2: $L =$

Gemeten grootheden (eenheden):

Geplote grootheden (eenheden):

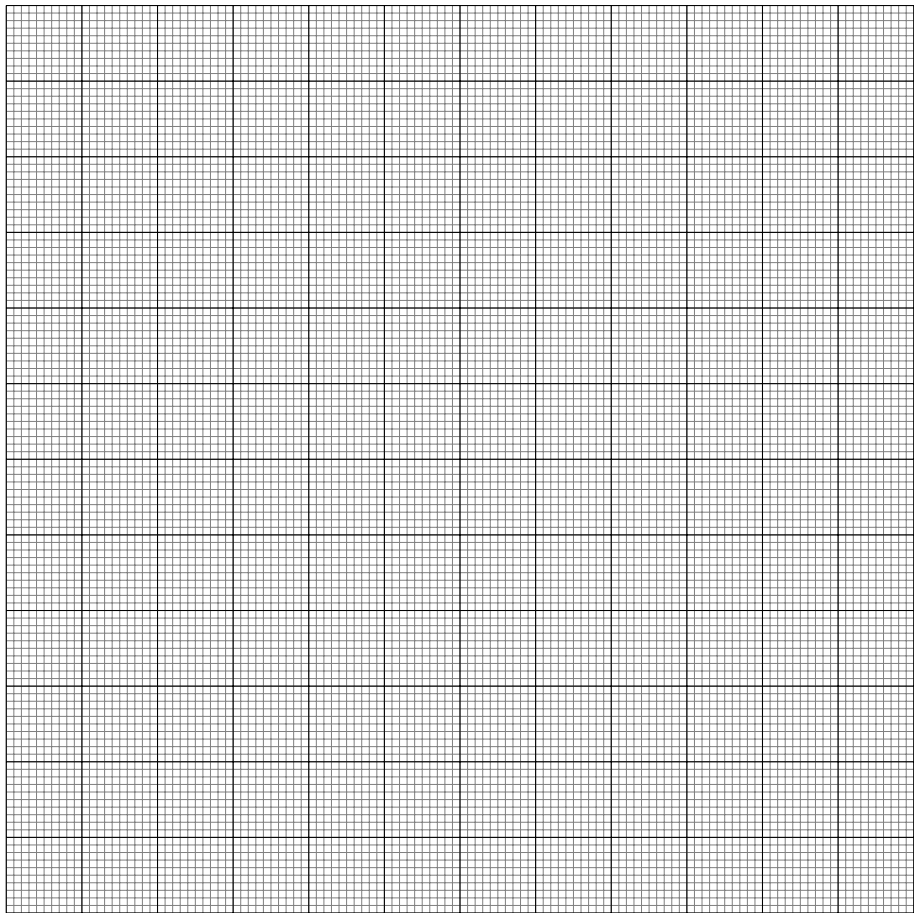


B.6 (cont.)

Evenwicht 3: $L =$

Gemeten grootheden (eenheden):

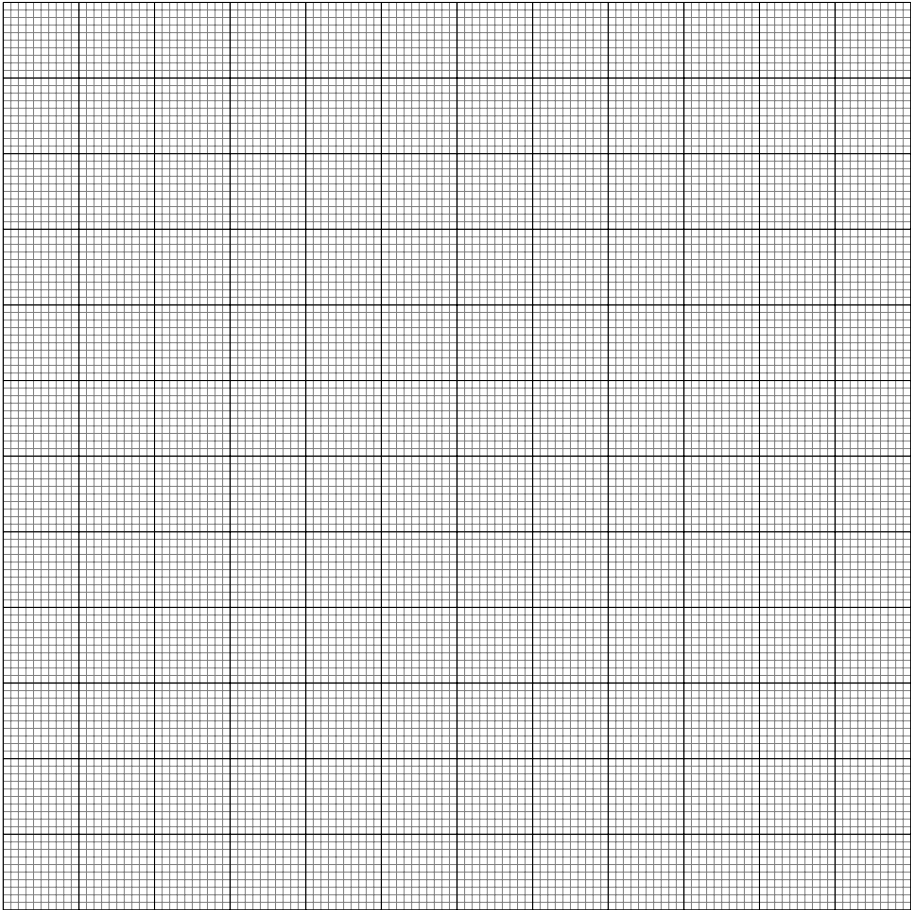
Geplotte grootheden (eenheden):



B.6 (cont.)

Geplotte grootheden (eenheden):

	Evenwicht 1	Evenwicht 2	Evenwicht 3



$B_e =$ $\pm$

Zandkraters en duinen (10,0 punten)

NASA's Spirit rover (**Fig. 1.(a)**) landde in 2004 op Mars om de geologie en mogelijke aanwezigheid van water te bestuderen. De landingsplaats (**Fig. 1.(b)**) is omgeven door kraters van verschillende grootte en zandduinen. Tijdens de verkenning moet de rover voorkomen dat hij vast komt te zitten in de zandduinen van Mars.

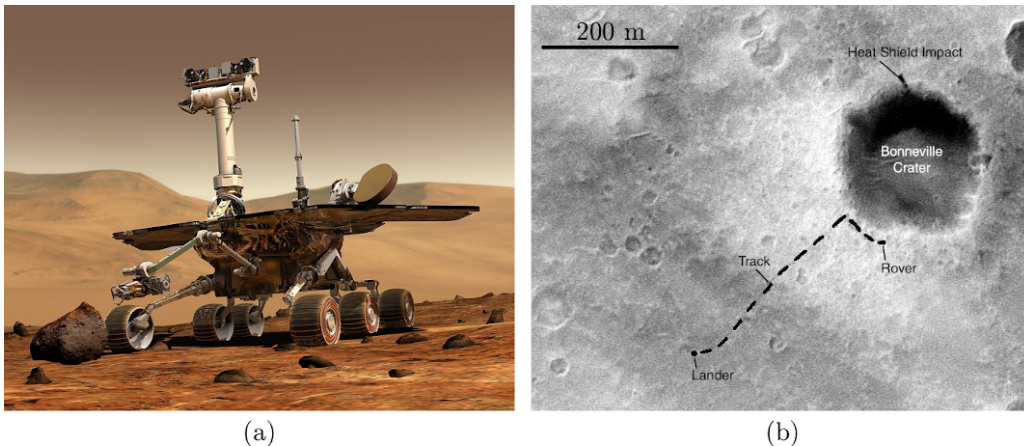


Fig. 1. (a) Een artistieke indruk van Spirit. (b) Landingsplaats van de rover op Mars. De schaalbalk komt overeen met 200 m.

Het probleem bestaat uit twee onafhankelijke delen A (kratervorming) en B (zand vangen) die in willekeurige volgorde kunnen worden behandeld. De lijst met apparatuur wordt hieronder gegeven en geïllustreerd in **Fig. 2**.

- (a) Plastic doos, moet leeggemaakt worden. De doos wordt gebruikt om het overlopende zand op te vangen tijdens de experimenten.
- (b) Kom.
- (c) Fles met zand.
- (d) 6 stalen kogels in een cilindertje. De kogels hebben 4 verschillende diameters. De drie kleinste kogels hebben dezelfde diameter.
- (e) Rolmaat.
- (f) statief bestaande uit een houten plaat met rubberen voetjes (f1), een verticale stang (f4), statiefklem (f2) en horizontale stang (f3). De verschillende elementen moeten worden gemonteerd zoals op de foto (f).
- (g) Zeef, gebruik je om het kogeltje terug te vinden als het niet te zien is in het zand.
- (h) Aluminium rail, 1 m lang.
- (i) Borstel om de rail en de kogels indien nodig van zand te ontdoen.
- (j) Houten bakje.
- (k) Stopwatch.
- (l) Kleefpasta.
- (m) Trechter om te helpen het zand aan het einde terug in de fles te doen.

Experiment



International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

Q2-2

Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

- (n) Lepel.
- (o) Liniaal.

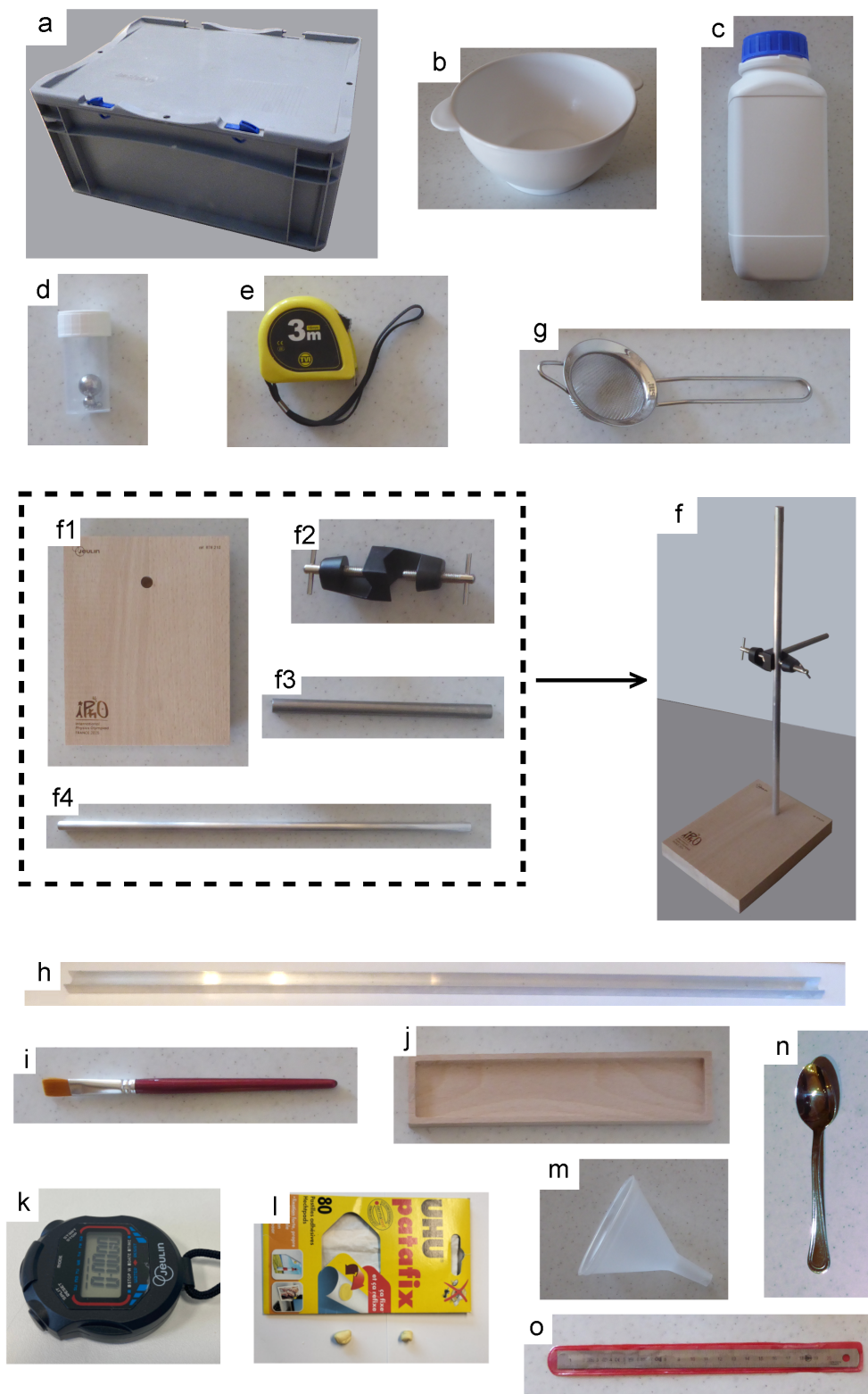


Fig. 2. Foto's van alle apparatuur.

A. Inslagkraters

De diameter D van de kraters op Mars varieert van ongeveer 10 m tot enkele honderden km. De kraters zijn het gevolg van de inslag van meteorieten. Verschillende modellen voorspellen hoe D afhangt van de inslagparameters: de diameter van het botslichaam (impactor) d , energie E (**Fig. 3**).

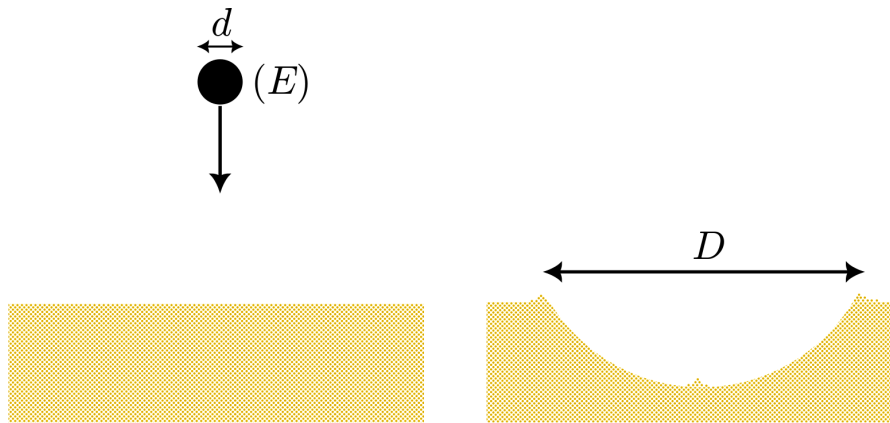


Fig. 3. Kratervorming.

Model 1: D hangt alleen af van de diameter van het botslichaam d

$$D = c_1 d, \quad (1)$$

waarbij c_1 een dimensieloos getal is dat onafhankelijk is van E en d .

Model 2: de energie van de meteoriet E wordt omgezet door volumische processen tijdens de inslag. Dit model voorspelt dat D evenredig is met $E^{1/3}$

$$D = c_2 E^{1/3} \quad (2)$$

waarbij c_2 een parameter is die onafhankelijk is van E en d .

Model 3: E wordt gebruikt om materiaal buiten de krater uit te stoten. Onder deze aanname geldt

$$D = c_3 E^{1/4} \quad (3)$$

waarbij c_3 een parameter is die onafhankelijk is van E en d .

Hier voeren we experimenten uit met kratervorming op een centimeterschaal om de drie modellen te vergelijken. Stalen kogels met verschillende diameters d en massa's m , met een dichtheid $\rho_a = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (item **(d)** van de uitrustingslijst), fungeren als de meteorieten.

Kogel 1	$d_1 = 2.0 \text{ mm}$	$m_1 = 0.033 \text{ g}$
Kogel 2	$d_2 = 5.0 \text{ mm}$	$m_2 = 0.51 \text{ g}$
Kogel 3	$d_3 = 9.0 \text{ mm}$	$m_3 = 3.0 \text{ g}$
Kogel 4	$d_4 = 16.0 \text{ mm}$	$m_4 = 17 \text{ g}$

Experiment

Q2-5

Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

De kom **(b)** gevuld met zand **(c)** wordt in de geleegde plastic doos **(a)** geplaatst die zal helpen om het overtollige zand op te vangen. De kom wordt volledig gevuld met zand en het oppervlak wordt zorgvuldig geëgaliseerd met de rand van de liniaal **(o)**. Voorkom dat je het zand niet verdicht (compact maakt).!

Om de kogel boven de kom los te maken, kan men de standaard gebruiken die voorzien is van een stang en duimschroef **(f)**. De staaf dient als geleider om de kogel recht boven de kom los te laten en ook om de valhoogte h boven het oppervlak te meten, die wordt gemeten met de rolmaat **(e)**.

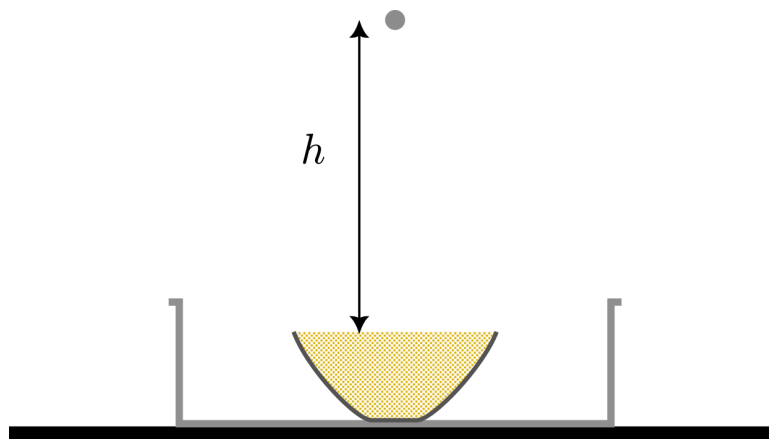


Fig. 4. Experimentele opstelling voor kratervorming.

Laat kogel 3 vallen vanaf een hoogte $h = 50\text{ cm}$ en meet de diameter D van de gevormde krater. Herhaal het experiment 5 keer. Na elke inslag meng je het zand met de lepel **(n)** en maak je het voorzichtig waterpas met de rand van de liniaal. Duw het zand niet aan! Gebruik indien nodig de zeef **(g)** om de kogel terug te vinden als die in het zand is verdwaald.

A.1 Noteer je resultaten in een tabel en bepaal D met zijn onzekerheid.

0.6pt

Tijdens de val geldt voor de luchtweerstand

$$F = \frac{1}{2} \rho_0 C_x v^2 \quad (4)$$

waarbij v de kogelsnelheid is, $\rho_0 \simeq 1.2\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de luchtdichtheid en C_x een dimensieloze coëfficiënt van orde één.

De luchtweerstand is verwaarloosbaar als de kogel valt van een hoogte kleiner dan de maximale valhoogte h_{max} , gedefinieerd als de hoogte waarop de luchtweerstand minder dan 10% van het gewicht blijft tijdens de gehele val.

A.2 Bepaal de theoretische uitdrukking voor de maximale valhoogte h_{max} . Bereken de numerieke waarde van h_{max} voor de vier beschikbare kogels.

0.5pt

Onderzoek experimenteel de relatie tussen D en E om de drie machtswetten (modellen) uit de inleiding te vergelijken. Zoek uit of de exponent verandert over het bereik van de geteste energieën. Doe hiervoor een reeks metingen door de kogels van verschillende hoogtes te laten vallen. Er moet over een breed bereik van energieën worden gemeten. De kogels kunnen van een maximale hoogte tot $h = 2\text{ m}$ vallen om hoge waarden van E te bereiken terwijl de voorwaarde van **A.2** wordt gerespecteerd. Herhaal het experiment slechts twee keer voor elke parameter en bereken de gemiddelde waarde D

A.3 Geef je resultaten in een tabel: massa van de kogel m , valhoogte h , inslagenergie E , kraterdiameter D . 1.7pt

A.4 Plot je resultaten op het grafiekpapier van je keuze (logaritmisch of lineair). Voeg op de grafiekweergave lijnen toe die overeenkomen met model 1, 2 en 3. Geef aan welk van de drie theoretische modellen het beste past bij de experimentele gegevens. 1.2pt

B. Rollen en vastlopen in zand

Vijf jaar na de landing is de rover Spirit voorgoed vastgelopen in het zand van een Marsiaanse duin. Rollen in zand is bijzonder delicaat omdat bij de beweging van de korrels veel energie verloren gaat. Hier bestuderen we het remmen van een kogel die door zand rolt. De kogel, die eerst in rust is, wordt eerst versneld op een rail onder een hoek θ en vervolgens afgeremd op een zandbed.

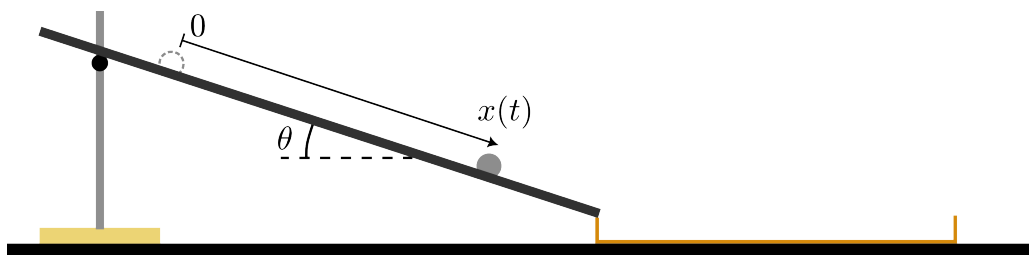


Fig. 5. Hellende rail (h) gecombineerd met het houten bakje (j).

Kogelbeweging langs de rail

Kogel 4 wordt losgelaten zonder beginsnelheid vanaf een willekeurig punt op de rail(h), gekozen als de oorsprong van de x -as ($x = 0$) (Fig. 5). Laat $x(t)$ de positie van de kogel op de rail weergeven. Het traagheidsmoment van een kogel met massa m en diameter d ten opzichte van een as door het middelpunt wordt gegeven door $J = md^2/10$. De kinetische energie K van een kogel die beweegt met de snelheid v terwijl hij roteert met de hoeksnelheid ω is

$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2. \quad (5)$$

We nemen aan dat de kogel over de rail rolt zonder te slippen (zuiver rollen) en verwaarlozen elke energiedissipatie.

B.1 Druk de positie x van de kogel uit als functie van tijd t , hoek θ en versnelling van de zwaartekracht g . 0.4pt

Eén uiteinde van de rail (h) rust op de rand van het houten bakje (j), dat op dit punt geen zand heeft. Het andere uiteinde van de rail wordt ondersteund door de statief (f), zodanig dat het een hellingshoek $\theta = 5^\circ$ vormt met de horizontaal. Voer deze afstelling zorgvuldig uit. De rail wordt vastgezet (aan beide zijden) met kleefpasta (l).

Gebruik een stopwatch (k) om de tijd t_{50} te meten die de kogel nodig heeft om een afstand $l = 50\text{ cm}$ langs de rail af te leggen.

Experiment



Q2-7

Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.2 | Doe 5 metingen en noteer het resultaat samen met de orde­grootte van de sta­ tistische on­ze­ker­heid. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

Meet t met de orde van grootte van de statistische on­ze­ker­heid voor ten­min­ste 8 ver­schil­len­de waarden van ℓ .

- | | | |
|------------|---------------------------------------|-------|
| B.3 | Geef je resultaten in een tabel weer. | 0.8pt |
|------------|---------------------------------------|-------|

- | | | |
|------------|--|-----|
| B.4 | zet je resultaten met foutbalken in grafiek om de wet van vraag B.1 te bevesti­gen. Leid een experi­men­tele schatting af van de constante g met zijn on­ze­ker­heid. | 1pt |
|------------|--|-----|

Beweging van de kogel in zand

We noteren ℓ als de afstand die de kogel op de rail heeft afgelegd. Op het zand komt de kogel tot stilstand na een afstand L (zie Fig. 6).

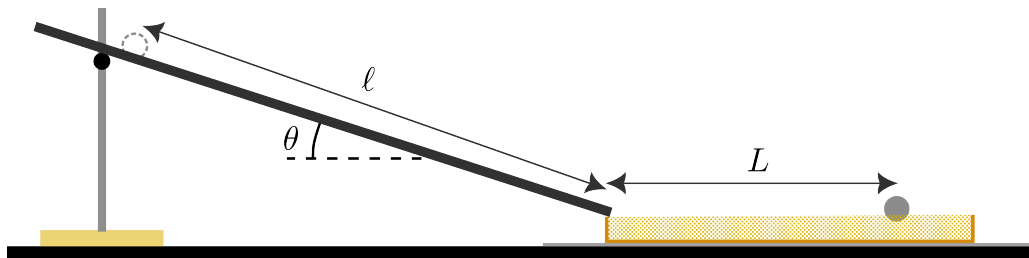


Fig. 6. Versnellen over een afstand ℓ en stoppen na een afstand L .

Het wordt dus afgeremd door een weerstand T die twee mogelijke oorzaken kan hebben:

- **Model #1 (wrijving met vaste stof):** net als tussen twee vaste stoffen in relatieve beweging, oefent het zand een constante weerstandskracht uit op de kogel $T = -\mu_{\text{eff}}mg$, waarbij μ_{eff} de effectieve weerstandscoefficiënt is van het kogel-zand contact en m de massa van de kogel.
- **Model #2 (vloeistofweerstand):** de weerstand hangt lineair af van de kogelsnelheid, $T = -kv$ waarbij k een constante is en v de norm van de snelheid.

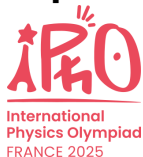
Het doel is om te bepalen welk model het best het waargenomen remgedrag beschrijft.

Tijdens de beweging van de kogel in het zand beschouwen wij de bal als een puntmassa. Vanwege de kleine hellingshoek van de rail, verwaarlozen wij elke energie verlies als gevolg van de transitie van rail naar zandbak.

Stel de theoretische uitdrukking vast die L koppelt aan ℓ in elk van de twee situaties (vwrijving met vaste stof of vloeistofweerstand). De twee uitdrukkingen leiden tot een machtswet van de vorm $L \sim \ell^\alpha$ waarin de exponent α twee verschillende waarden aanneemt.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.5 | Geef voor model 1 en model 2 het verband tussen L en ℓ en de waarde van α . | 0.6pt |
|------------|---|-------|

Experiment



Q2-8

Nederlands (NLD) (Netherlands (Kingdom of the))

Plaats het houten bakje (j) op een vel papier. Vul het bakje met zand en maak een gelijkmatige laag door het oppervlak voorzichtig glad te strijken met de rand van de liniaal. Vermijd het verdichten (compact maken) van het zand! Stel de hoek van de rail opnieuw zorgvuldig in op $\theta = 5^\circ$. Laat kogel 4 ($d_4 = 16.0\text{ mm}$) los op de schuine rail zodat de afgelegde afstand op de rail $l = 50\text{ cm}$ is.

Maak voor elke meting het houten bakje schoon, vul het bakje bij en strijk het zand weer glad. Maak de aluminium rail schoon (verwijder zandkorrels) met behulp van de borstel (i). Gebruik aan het einde van het experiment het vel papier als trechter om het overtollige zand terug in de fles te doen.

B.6	Meet de afstand L_{50} die afgelegd wordt in het zand tot de kogel tot stilstand. Voer verschillende metingen uit (minstens 5) om L_{50} te bepalen, samen met de eenheid en de onzekerheid.	0.8pt
------------	--	-------

B.7	Na tenminste 8 metingen voor verschillende waarden van ℓ (waarbij $\theta = 5^\circ$ wordt aangehouden), zet je L uit als functie van ℓ (inclusief error bars) en concludeer je welk model de weerstand T het beste beschrijft.	1.5pt
------------	---	-------

B.8	Geef op basis van het gekozen model de waarde op van de coëfficiënt μ_{eff} of k die de kracht T karakteriseert.	0.2pt
------------	---	-------

Zandkraters en duinen (10 punten)

A. Inslagkraters

A.1 (0.6pt)

D (mm)					
----------	--	--	--	--	--

$$D = \quad \pm \quad \text{mm}$$

A.2 (0.5pt)

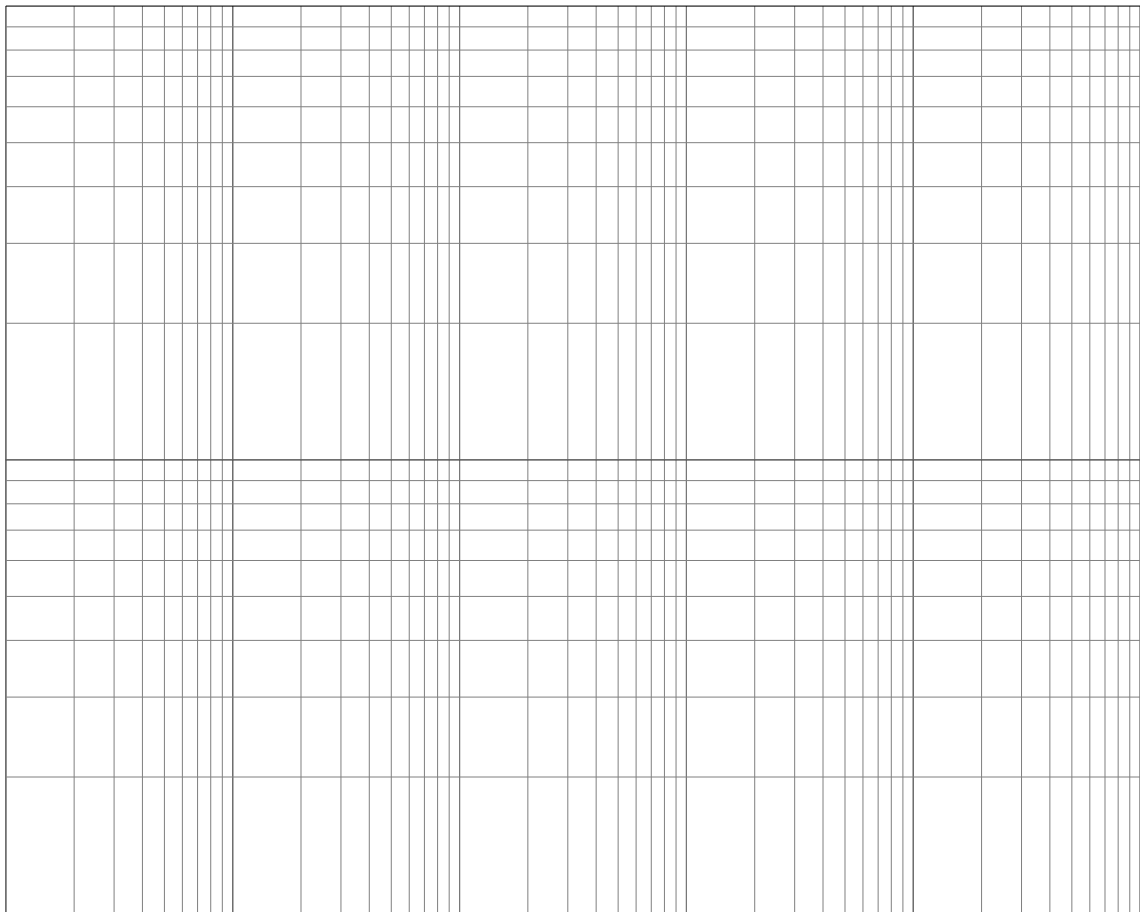
$$h_{\max} =$$

d (mm)				
$h_{\max}$ (m)				

A.3 (1.7pt)

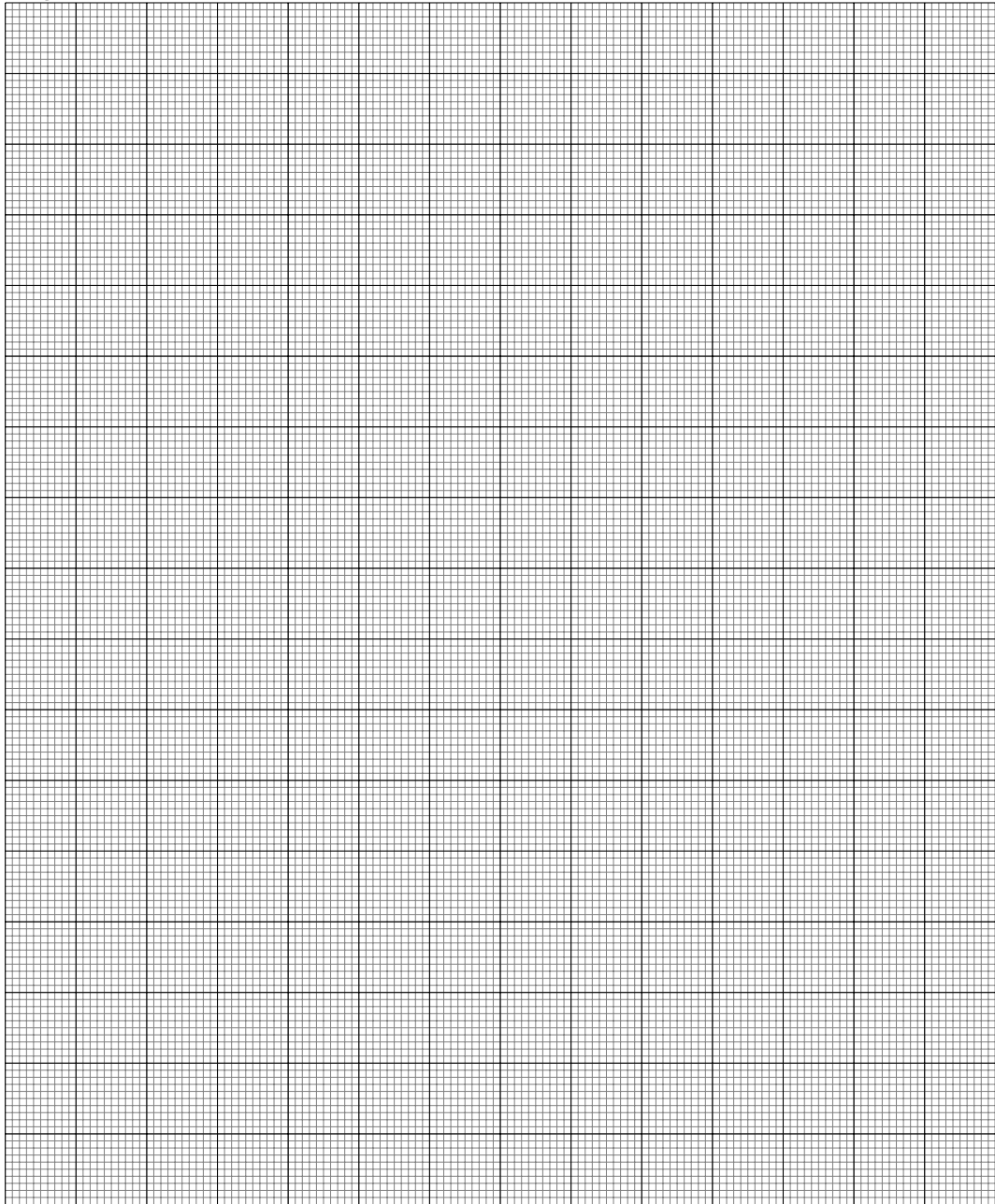
[illegible]

A.4 (1.2pt)



Conclusie:

A.4 (cont.)



Conclusie:

B. Rollen en vastlopen in zand

B.1 (0.4pt)

$$x(t) =$$

B.2 (0.7pt)

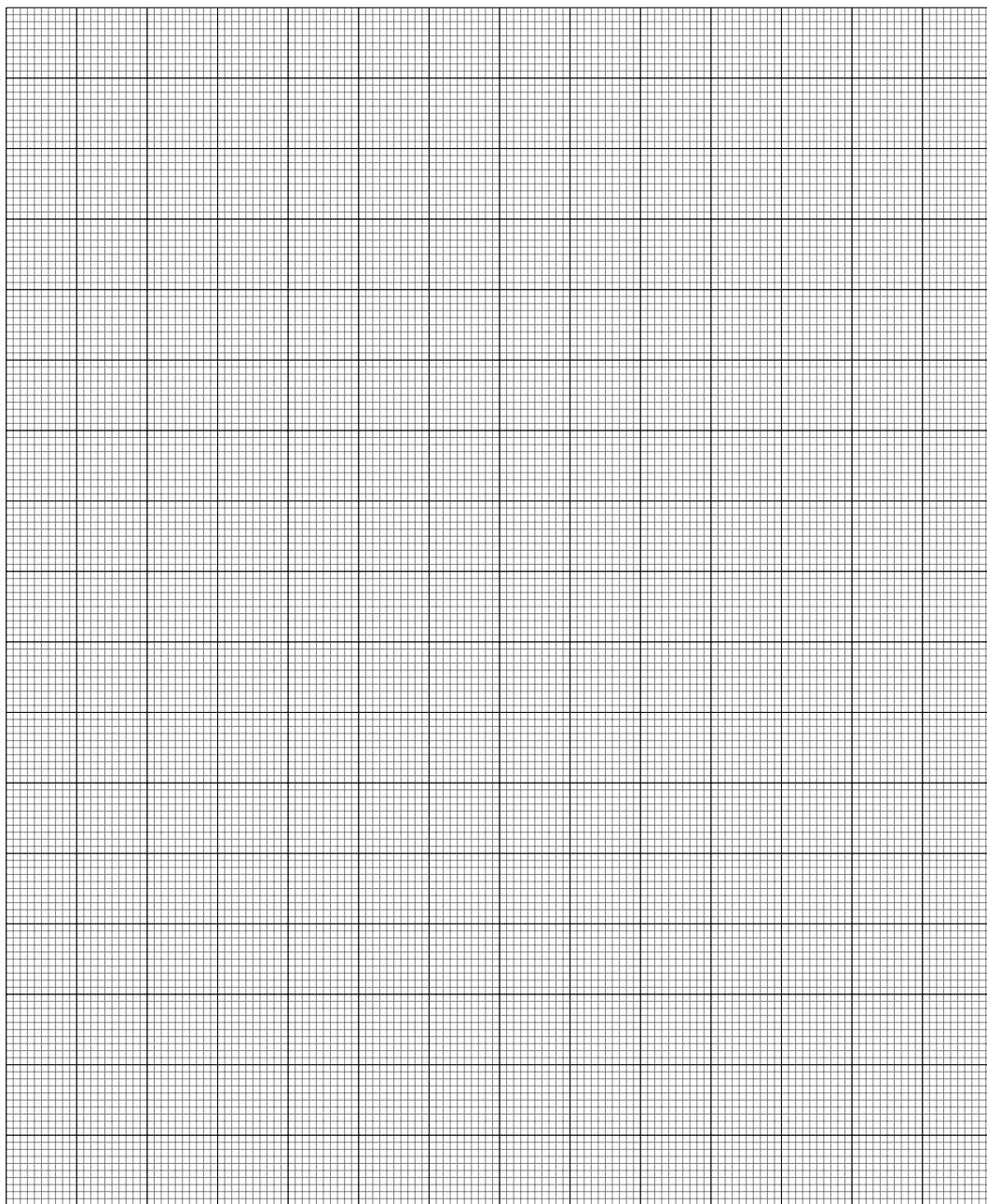
t_{50} (s)					
--------------	--	--	--	--	--

$$t_{50} = \pm S$$

B.3 (0.8pt)

[illegible]

B.4 (1pt)



$g =$

B.5 (0.6pt)

Model 1:

• $L =$

• $\alpha =$

Model 2:

• $L =$

• $\alpha =$

B.6 (0.8pt)

L_{50} (cm)					
---------------	--	--	--	--	--

$L_{50} = \quad \pm \quad \text{cm}$

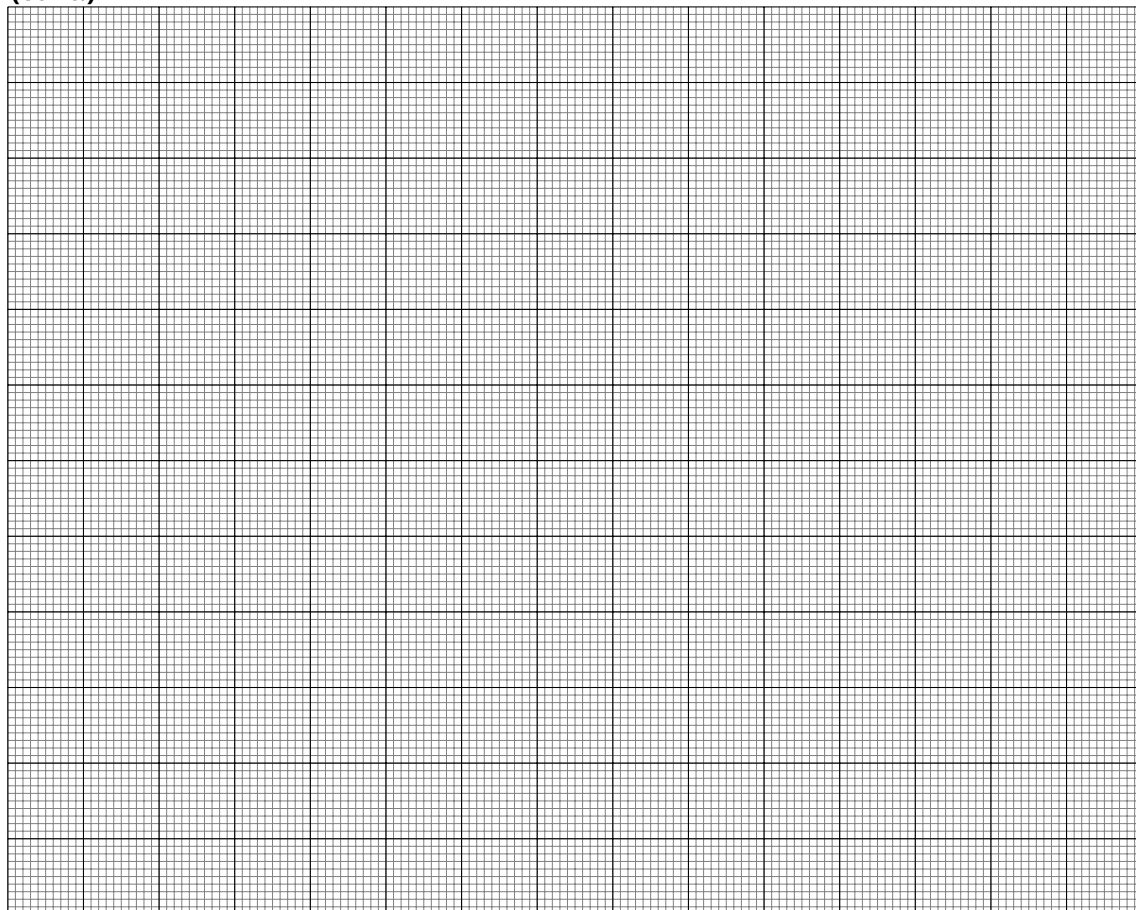
人声

A2-7

B.7 (1.5pt)

[illegible]

B.7 (cont.)



Het meest geschikte model is :

B.8 (0.2pt)

Als model 1 het gekozen model is: $\mu_{\text{eff}} =$

Als model 2 het gekozen model is: $k =$