

Speciale Relativiteit in de klas - Leerlingboekje

Lesmateriaal ontwikkeld tijdens het promotieonderzoek van Floor Kamphorst, in samenwerking met Paul Alstein, Jan Dentener, Stefan van Dijk, Gerhard van Hunnik, Bart van de Laar, Sjaak Meertens, Johanna Phaf-Novozamsky, Marianne Verhaart, Bastiaan Vinke, Tienke de Vries en Nathalie van der Weide.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Bron afbeelding: pixabay.com



Inhoudsopgave

1. Hoe kan je beweging beschrijven?.....	2
2. Hoe beweegt licht?.....	11
3. Wat kunnen we leren van tekenregel-voorspellingen?.....	20
4. Kan een van de tekenregels bevestigd worden door experimenten om het als voortbewegingsmodel voor licht te kunnen gebruiken?.....	32
5. Kunnen we een algemeen voortplantingsmodel voor licht maken?.....	36
6. Wat zijn de gevolgen van het lichtpostulaat voor plaats en tijd?.....	44
7. Wat is er aan de hand met tijdsduur?.....	53
8. Met welke formule kunnen we de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 1 uitdrukken in de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 2?.....	61
9. Wat betekent dit allemaal voor metingen in de natuurkunde?.....	65



1. Hoe kan je beweging beschrijven?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Hoe kan je beweging beschrijven?'. Aan het eind van deze les kan je redeneren met beweging. Ook kan je die redeneervaardigheid toepassen in diagrammen om zo de positie en het tijdstip van een gebeurtenis te bepalen.

Opdracht 1.1: Redeneeropdracht

Gebruik bij deze opdracht de diagrammen 1.a en 1.b.

Een bal wordt afgeschoten (gebeurtenis 1) vanaf een rijdende truck. Op de grond kijkt iemand toe. De bal wordt in horizontale richting afgeschoten, maar zal natuurlijk ook naar beneden versnellen en op een gegeven moment op de grond terecht komen (gebeurtenis 2).

De verticale versnelling benaderen we met een eenparige beweging: de bal valt met een snelheid van 1 hokje per tijdstapje naar beneden.

1. Construeer gebeurtenis 2 in de diagrammen door te tekenen. Diagram 1.a is weergegeven vanuit de persoon op de grond, diagram 1.b vanuit de truck.
2. Geef het tijdstip waarop de bal wordt afgeschoten.
3. Geef de positie van gebeurtenis 1.
 - a. Ten opzichte van de persoon op de grond.
 - b. Ten opzichte van de persoon in de truck.
4. Geef de positie van gebeurtenis 2.
 - a. Ten opzichte van de persoon op de grond.
 - b. Ten opzichte van de persoon in de truck.
5. Geef de horizontale snelheid van de bal.
 - a. Ten opzichte van de persoon op de grond.
 - b. Ten opzichte van de persoon in de truck.

Opdracht 1.2: Redeneeropdracht

Beantwoord de volgende reflectievragen:

1. Wat kan je concluderen over de positie van gebeurtenis 2, volgens de verschillende waarnemers in de diagram?
2. Wat kan je concluderen over de horizontale snelheid van de bal, volgens de verschillende waarnemers in de diagram?
3. Wat kan je concluderen over het tijdstip van gebeurtenis 2, volgens de verschillende waarnemers in de diagram?



Opdracht 1.3: Reflectieopdracht

1. Wat is voor beide camera's hetzelfde?
2. Wat is voor beide camera's verschillend?

Opdracht 1.4: Verwerkingsopdracht

1. Teken een diagram van de gebeurtenissen 1 en 2 vanuit het referentiekader van de bal.

Opdracht 1.5: Verwerkingsopdracht

Gebruik bij deze opdracht Diagram 1.c en 1.d

Voer opdracht 1.1 uit in deze nieuwe diagrammen.

Opdracht 1.6: Verwerkingsopdracht

Gebruik bij deze opdracht diagram 1.e en 1.f.

Een lachende passagier op de trein is neergeschoten door een duister kijkende moordenaar. Op het moment dat de passagier geraakt wordt begint deze te huilen. Buiten op het perron staat een verbouwde toeschouwer. De kogel verlaat het geweer met een snelheid van 2 hokjes per tijdstapje.

1. Op welk tijdstip is de kogel afgevuurd?
2. Op welke positie is de kogel afgevuurd?
 - a. volgens de toeschouwer?
 - b. volgens de moordenaar?
 - c. volgens het slachtoffer?
3. Op welke positie wordt het slachtoffer geraakt?
 - a. volgens de toeschouwer?
 - b. volgens de moordenaar?
 - c. volgens het slachtoffer?
4. Wat is de snelheid van de kogel?
 - a. volgens de toeschouwer?
 - b. volgens de moordenaar?
 - c. volgens het slachtoffer?

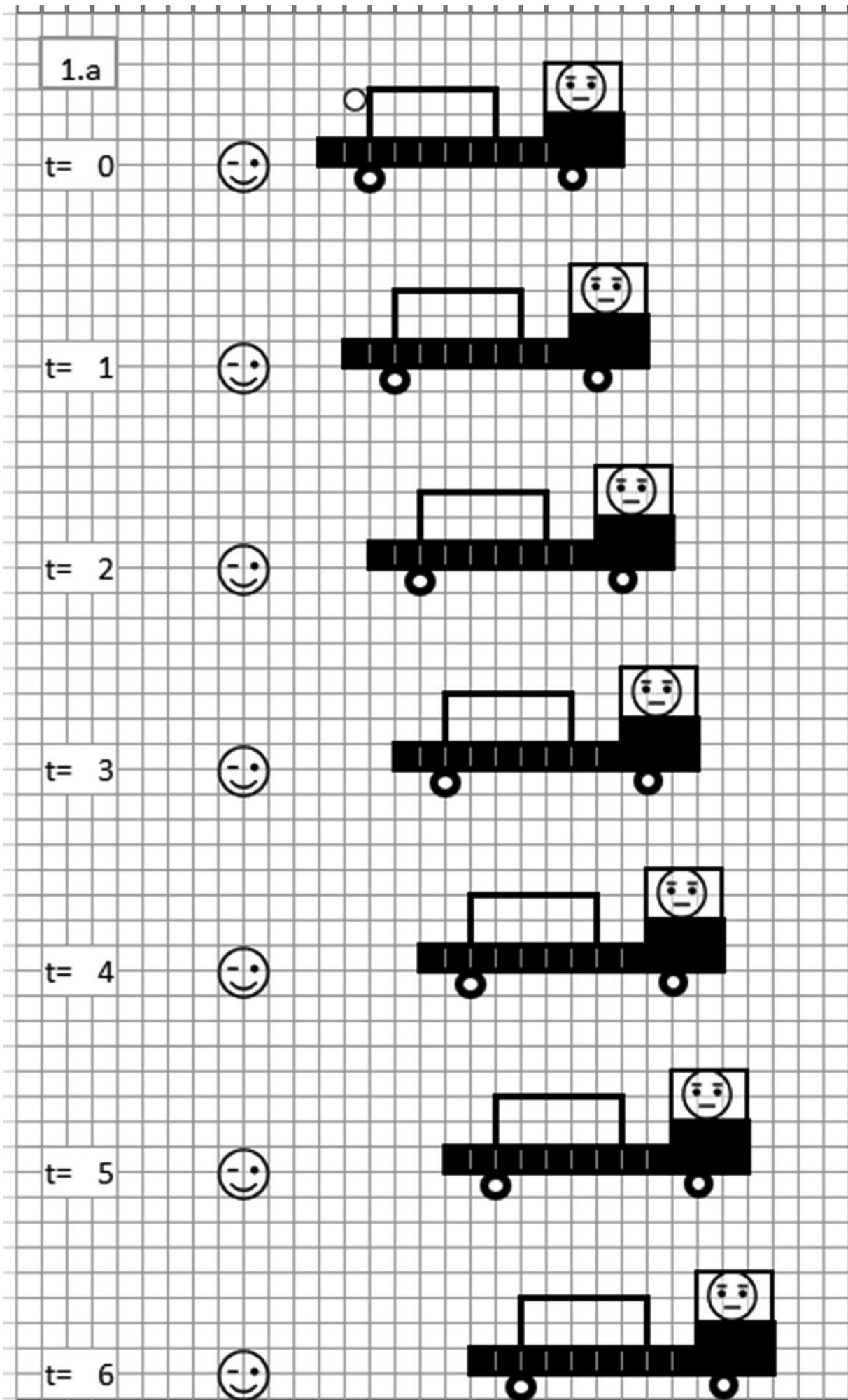
Opdracht 1.7: Verwerkingsopdracht

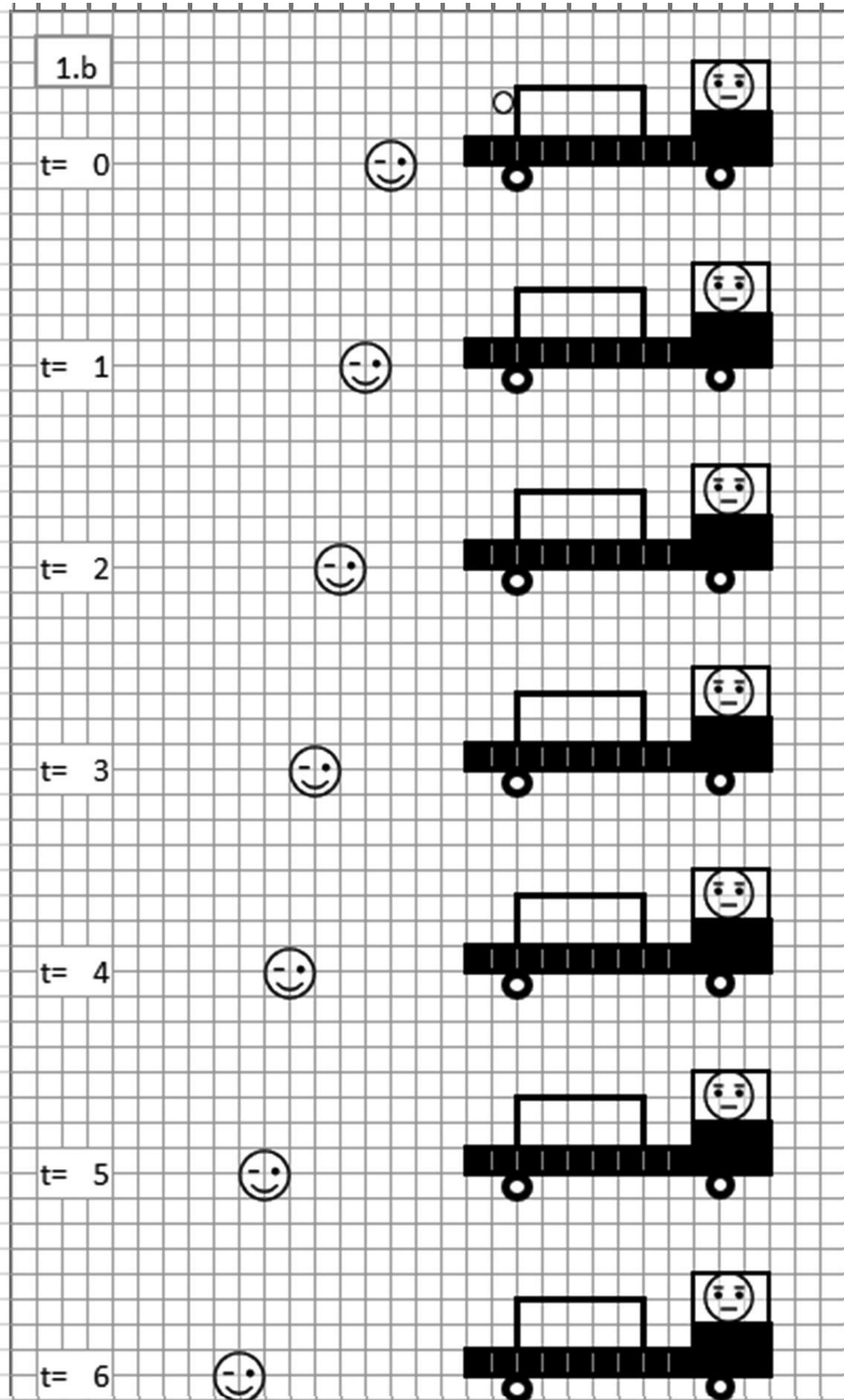
1. Wat kan je concluderen over de positie van de misdaad voor de verschillende waarnemers in het diagram?
2. Wat kan je concluderen over de snelheid van de kogel voor de verschillende waarnemers in het diagram?
3. Wat kan je concluderen over het tijdstip van de misdaad voor de verschillende waarnemers in het diagram?

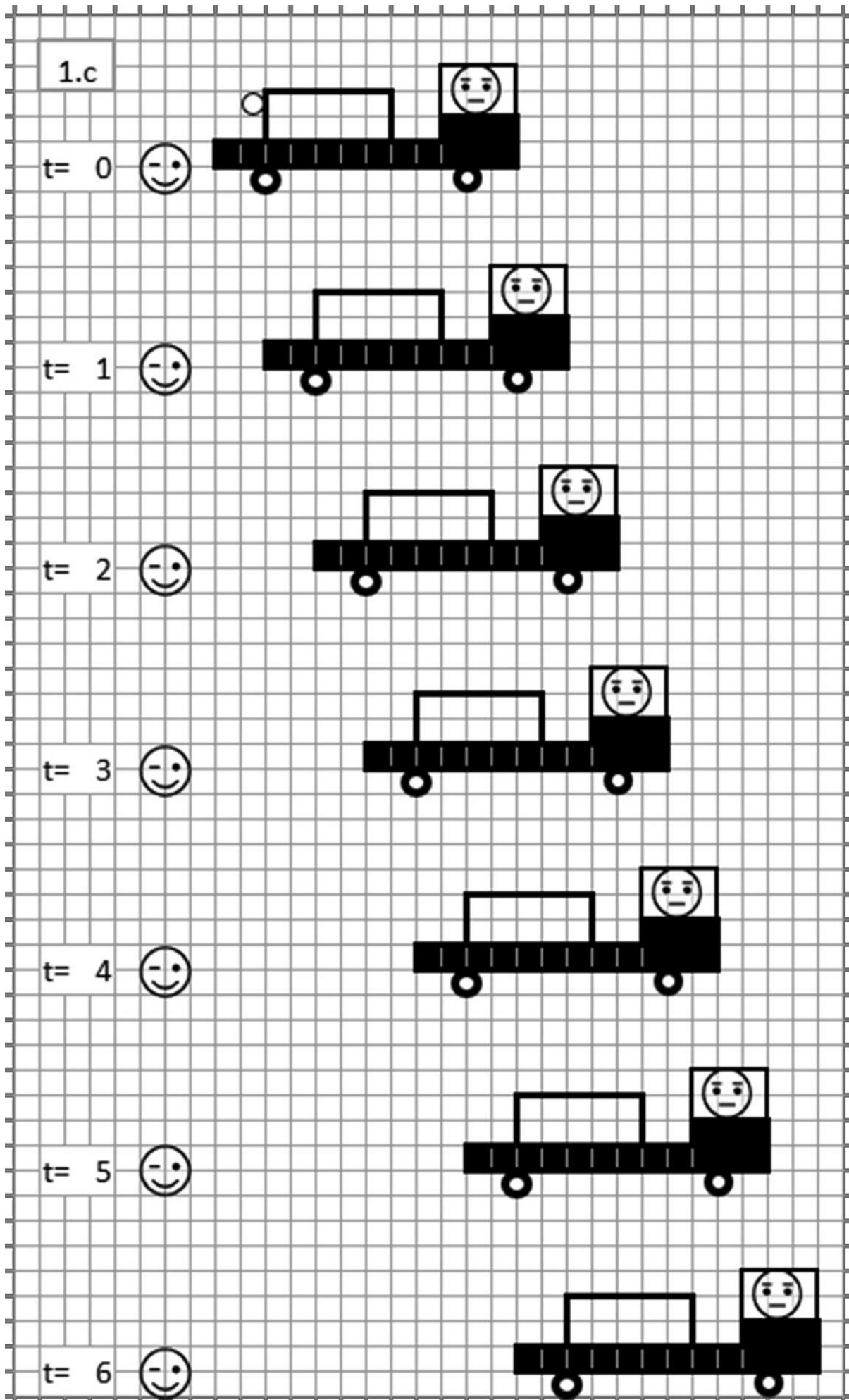


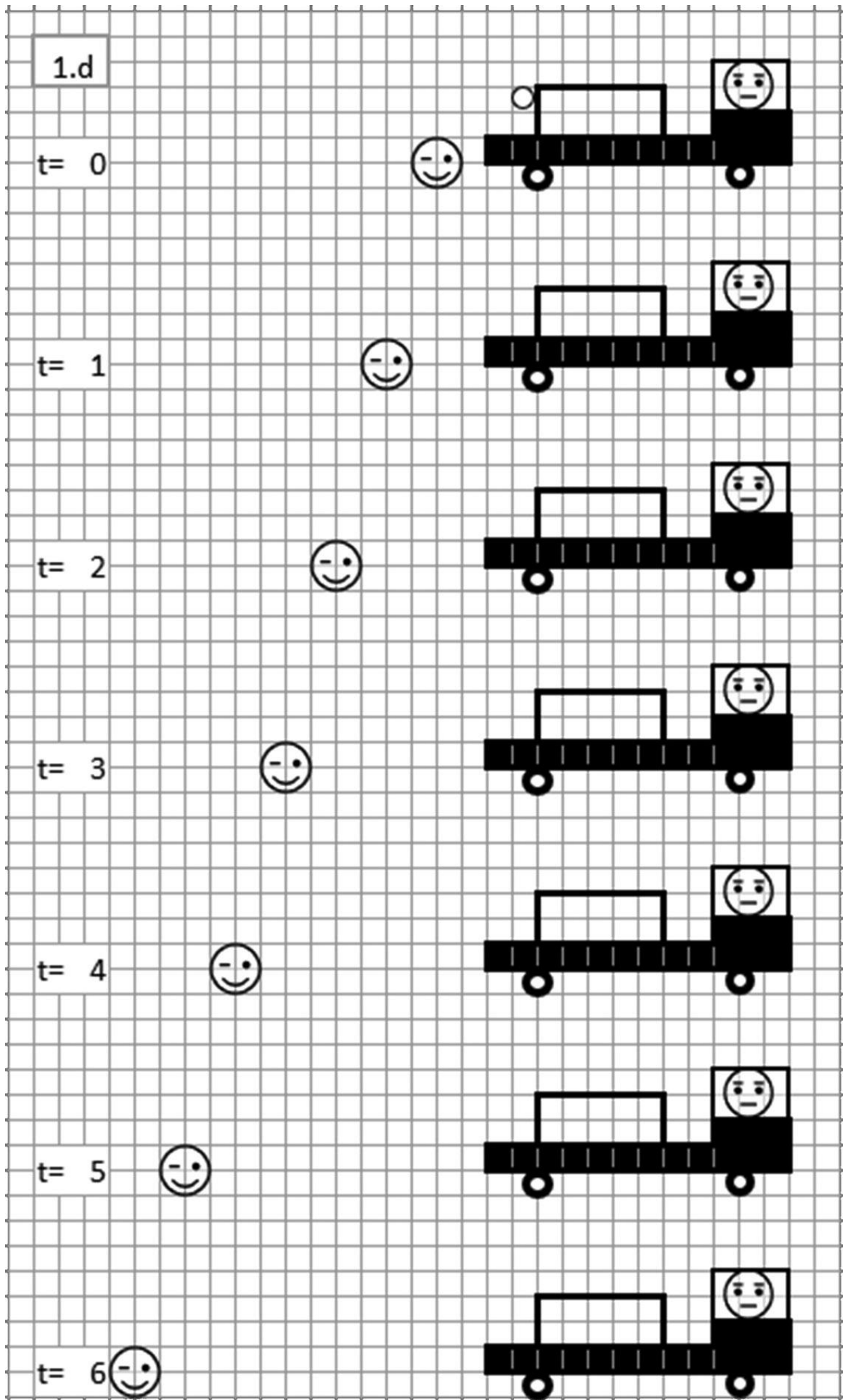
Opdracht 1.8: Beantwoorden lesvraag

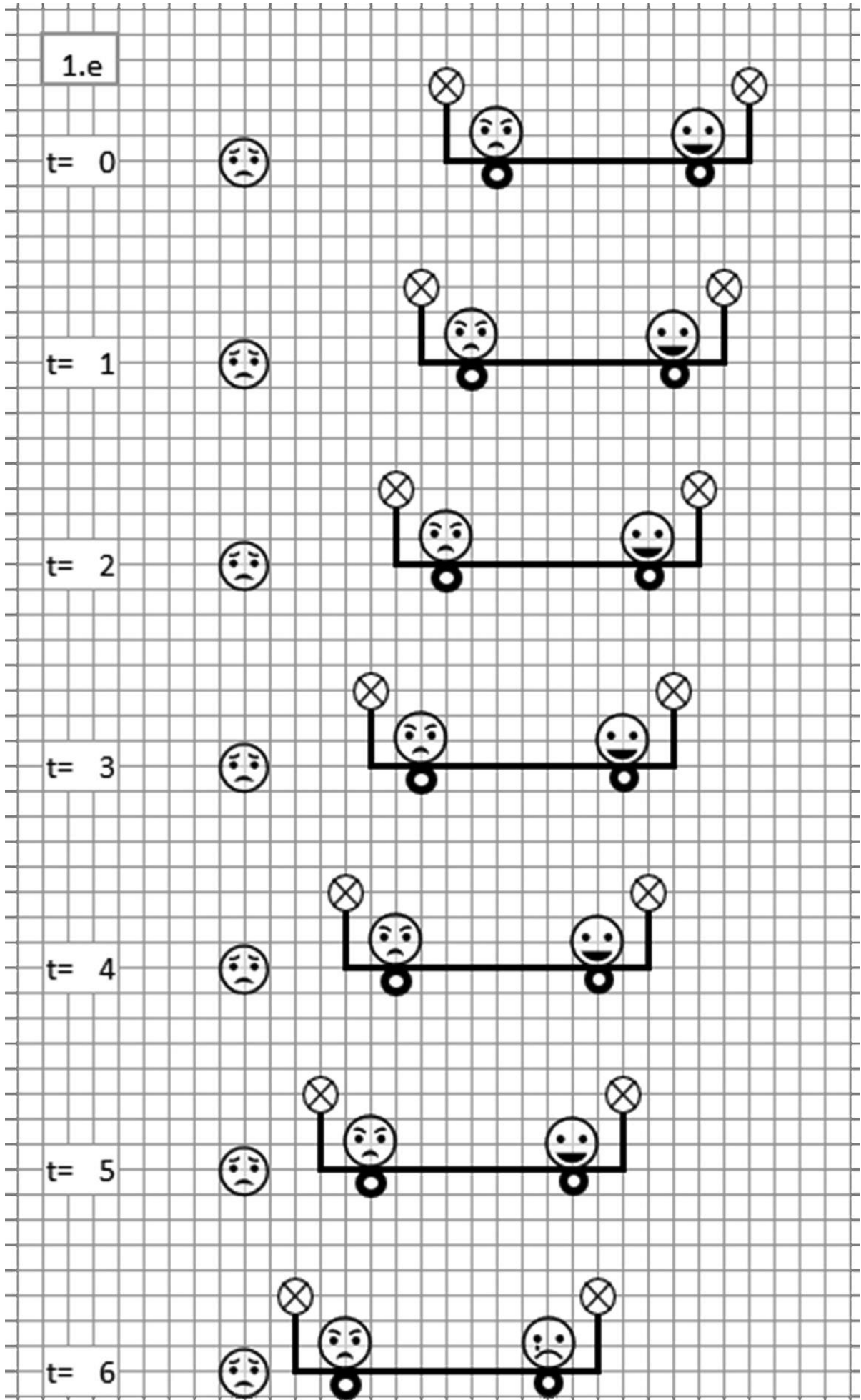
1. Geef een antwoord op de lesvraag: Hoe kan je beweging beschrijven?

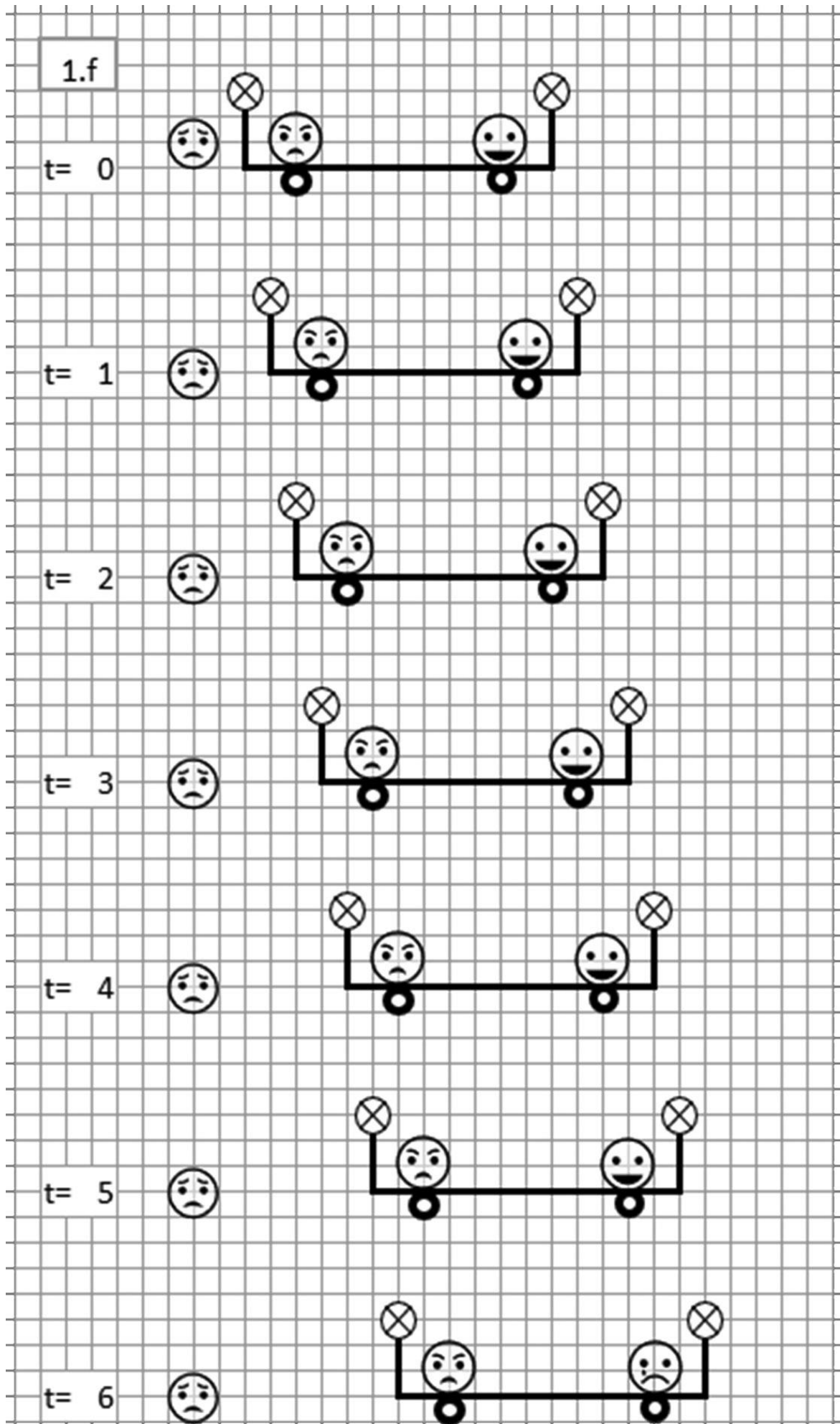














2. Hoe beweegt licht?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Hoe beweegt licht?'. Aan het eind van deze les kan je in diagrammen redeneren met het voortbewegen van licht. Ook kan je die redeneervaardigheid toepassen in diagrammen om zo het tijdstip van een gebeurtenis te bepalen.

Opdracht 2.1 Redeneeropdracht

Gebruik bij deze opdracht diagrammen 2.a, 2.b en 2.c.

In deze opdracht bekijken we een kamer met aan de zijkant twee deuren. In het midden van de kamer hangt een lamp en een onderzoeker bevindt zich ergens in of in de buurt van de kamer. De lamp zendt op tijdstip 0 een korte lichtflits uit en gaat daarna weer uit.

Het diagram in deze opdracht lijkt op de diagrammen waar je al eerder in de les mee hebt gewerkt. Kamer, deuren, lamp en onderzoeker zijn weergegeven op verschillende opeenvolgende tijdstippen.

Je tekent zelf het licht dat door de lamp wordt uitgezonden in de diagram. Het licht verplaatst zich met drie hokjes per tijdstapje.

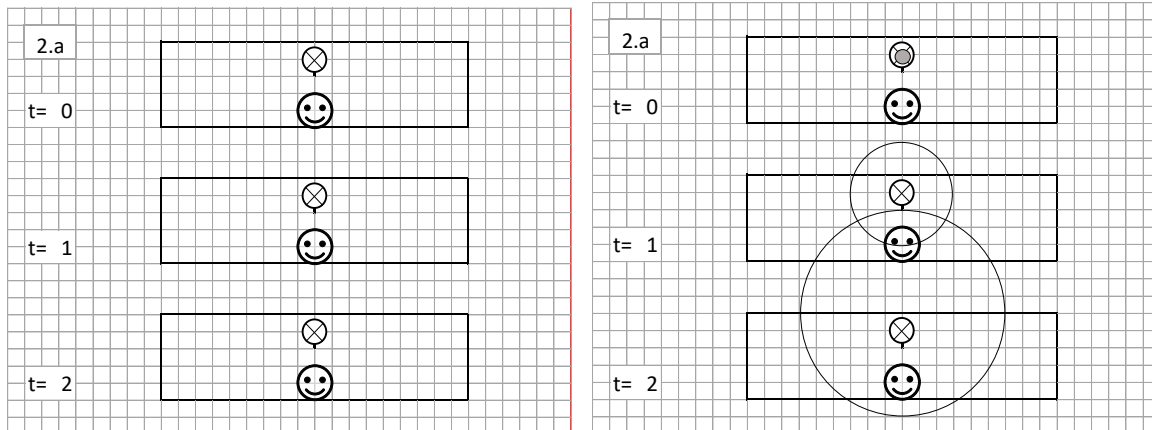
1. Bepaal bij alle diagrammen (2.a, 2.b en 2.c) op welk tijdstip het licht bij de muren van de kamer aankomt.

Opdracht 2.2: Redeneeropdracht

In deze opdracht bekijken we een kamer met aan de zijkant twee deuren. In het midden van de kamer hangt een lamp en een onderzoeker bevindt zich ergens in of in de buurt van de kamer. De lamp zendt op tijdstip $t=0$ een korte lichtflits uit en gaat daarna weer uit. Je zoekt uit, door te tekenen in een diagram, bij welke tijdstapjes het licht bij de deuren aankomt.

Het diagram in deze opdracht lijkt op de diagrammen uit opdracht 2.1. Kamer, deuren, lamp en onderzoeker zijn weergegeven op verschillende opeenvolgende tijdstippen. Een voorbeeld hiervan is te zien in de linker figuur.

Je tekent zelf het licht dat door de lamp wordt uitgezonden in de diagram. Het licht verplaatst zich met drie hokjes per tijdstapje. In de rechterfiguur zie je hoe je dat kan weergeven.



De opdracht bestaat uit 4 diagrammen, waarbij de onderzoeker buiten de kamer (diagram 2.d en 2.e) of daarbinnen (diagram 2.f en 2.g) is. Je mag aannemen dat de onderzoeker gewoon naar binnen kan kijken. In deze opdracht is er steeds sprake van beweging van de onderzoeker, de kamer of beide.

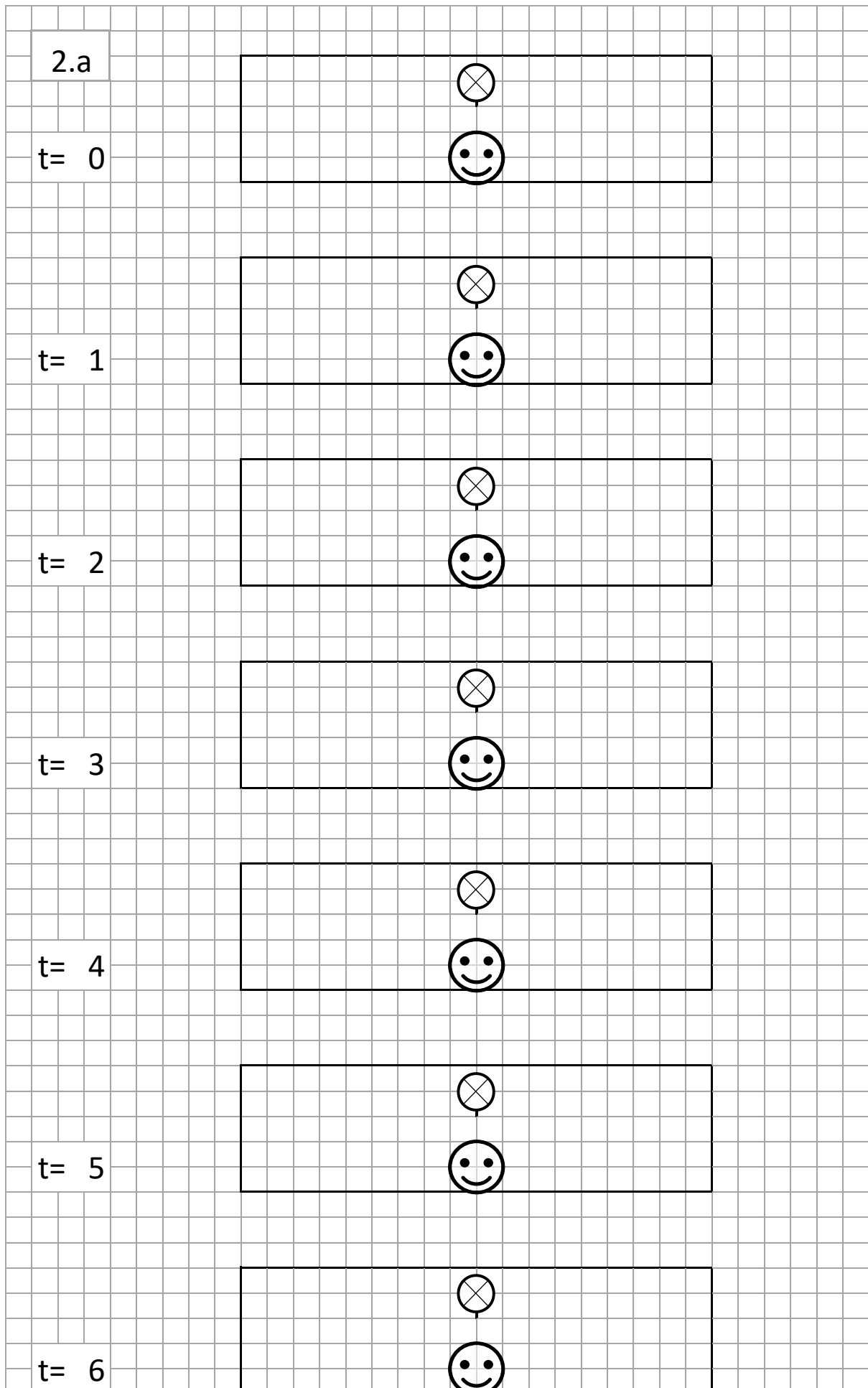
1. Teken het licht in diagrammen 2.d t/m 2.g op alle tijdstappen.
2. Tijdstapje dat het licht bij de deuren aankomt
 - a. 2.d: _____
 - b. 2.e: _____
 - c. 2.f: _____
 - d. 2.g: _____

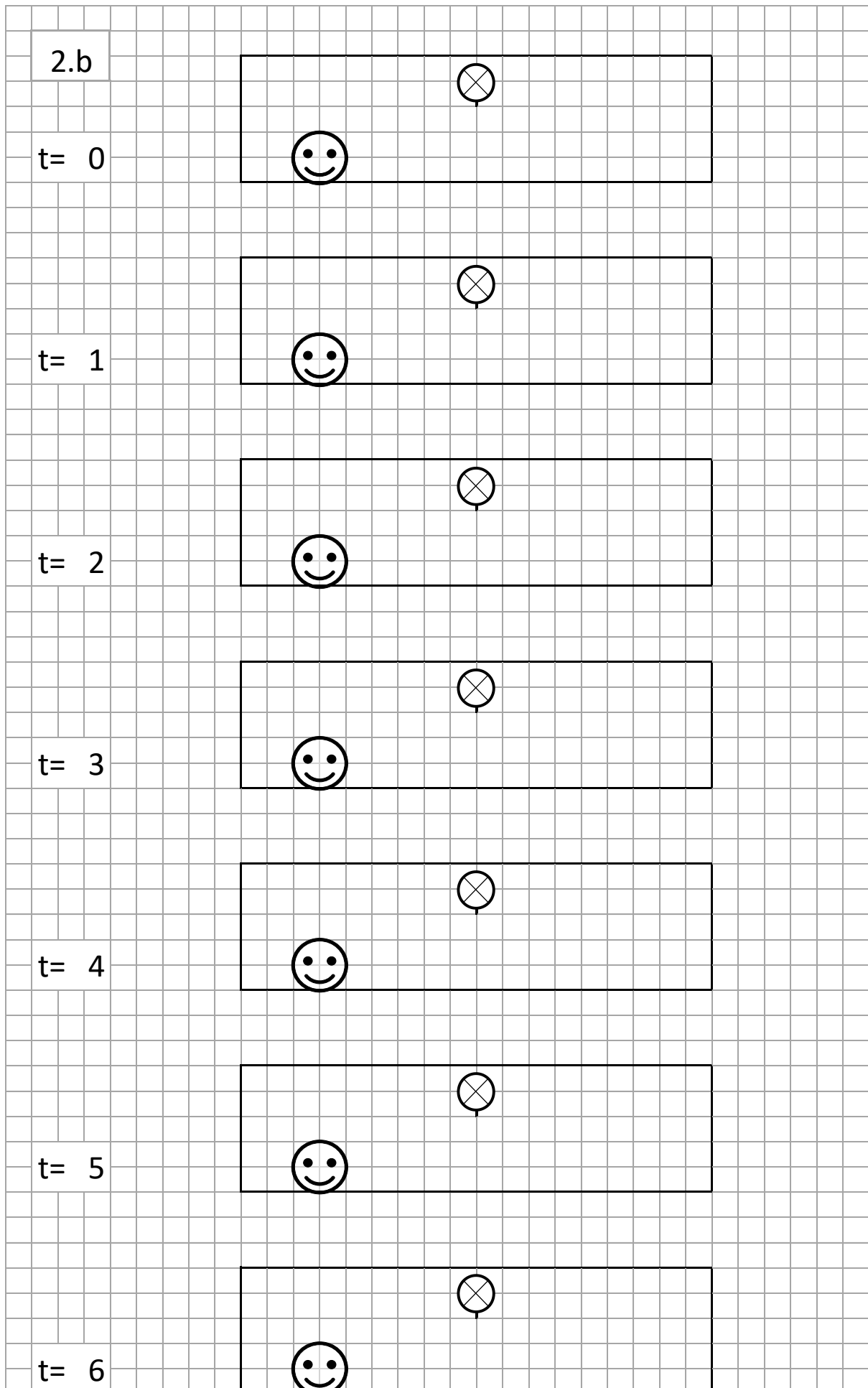
Opdracht 2.3: Reflectieopdracht

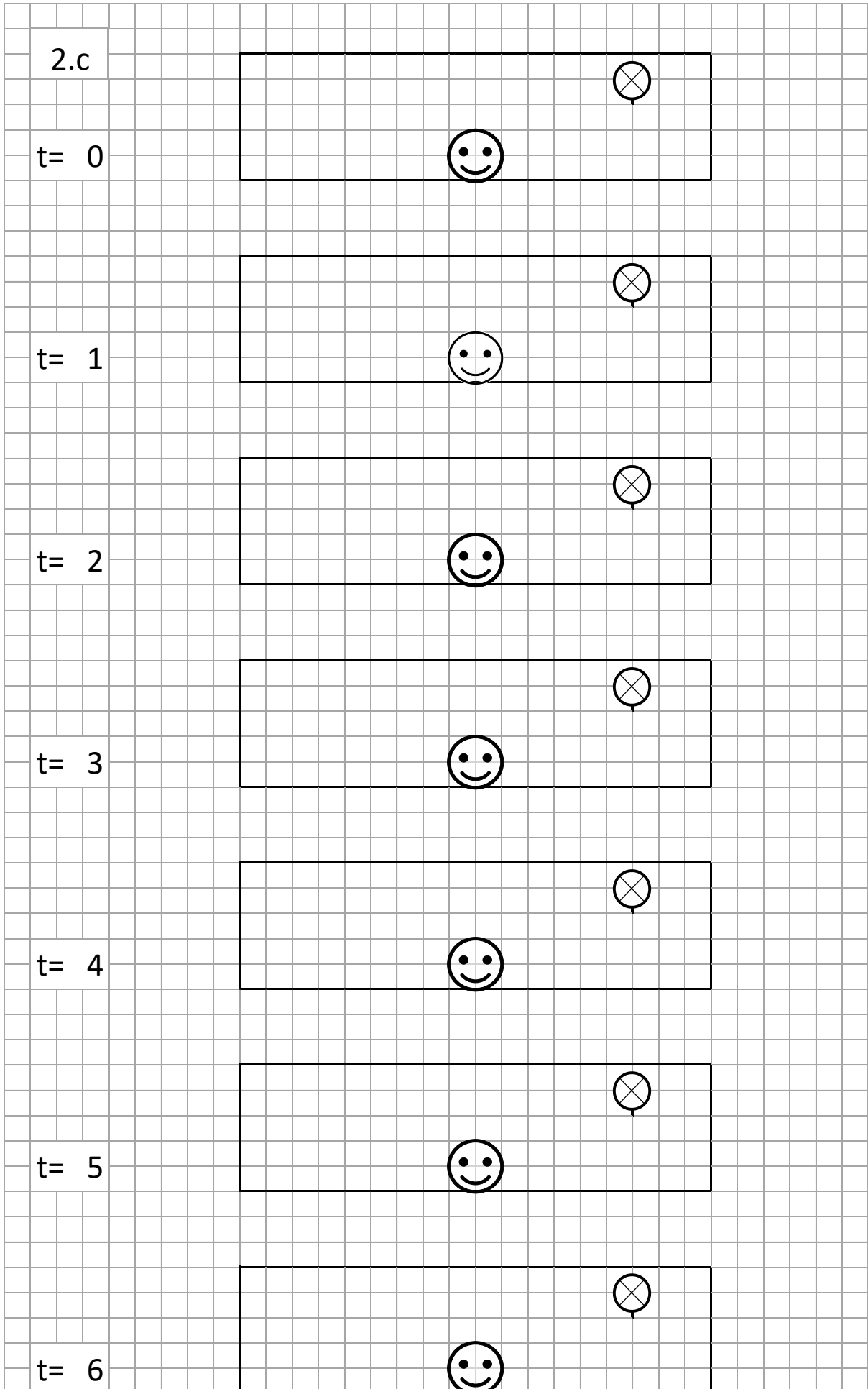
1. Hoe heb je zelf een constante snelheid toegepast in opdracht 2.2?
2. Hoe hebben anderen dat gedaan?
3. Wat is het verschil tussen de verschillende manieren van een constante snelheid toepassen?

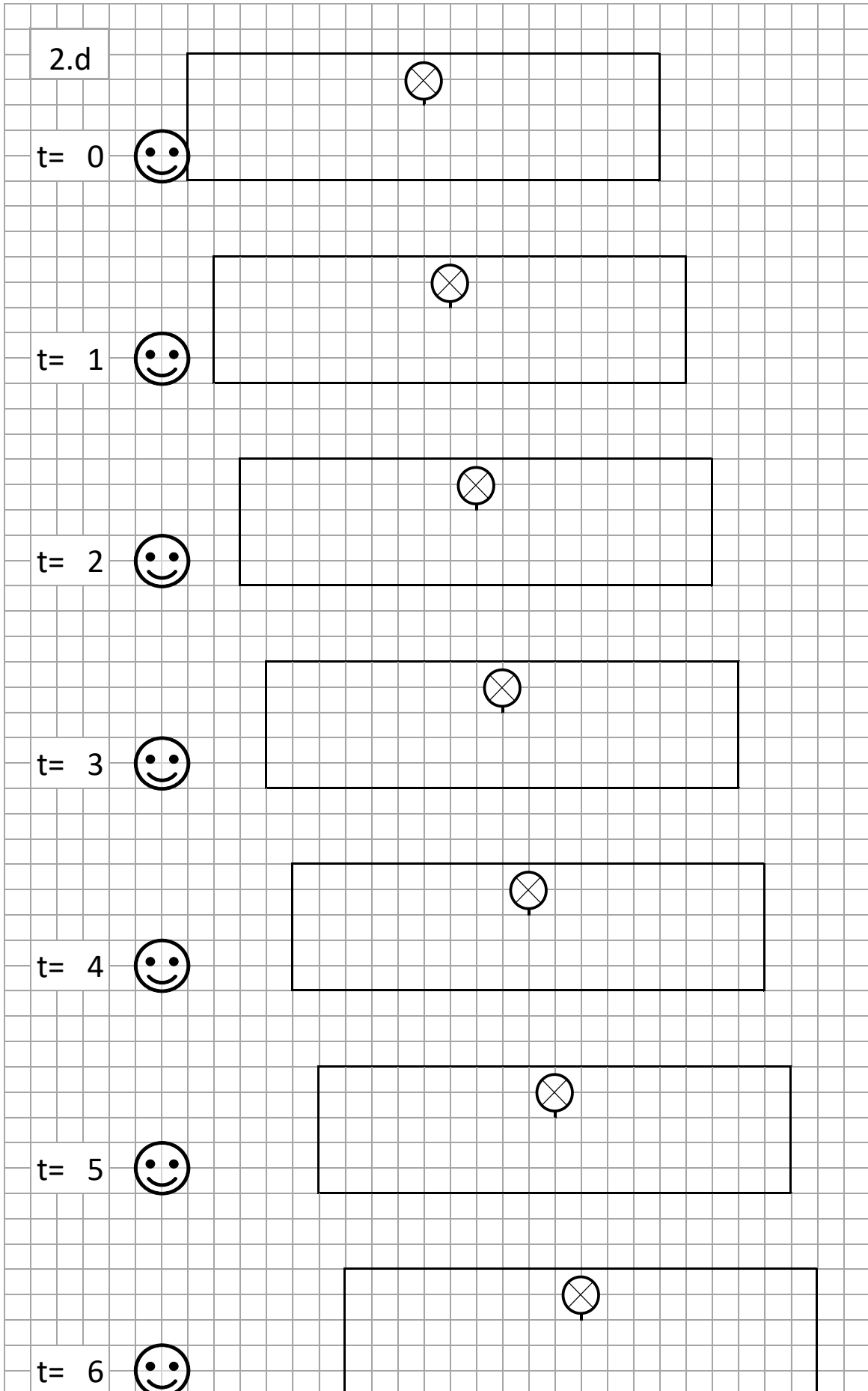
Opdracht 2.4: Beantwoorden lesvraag

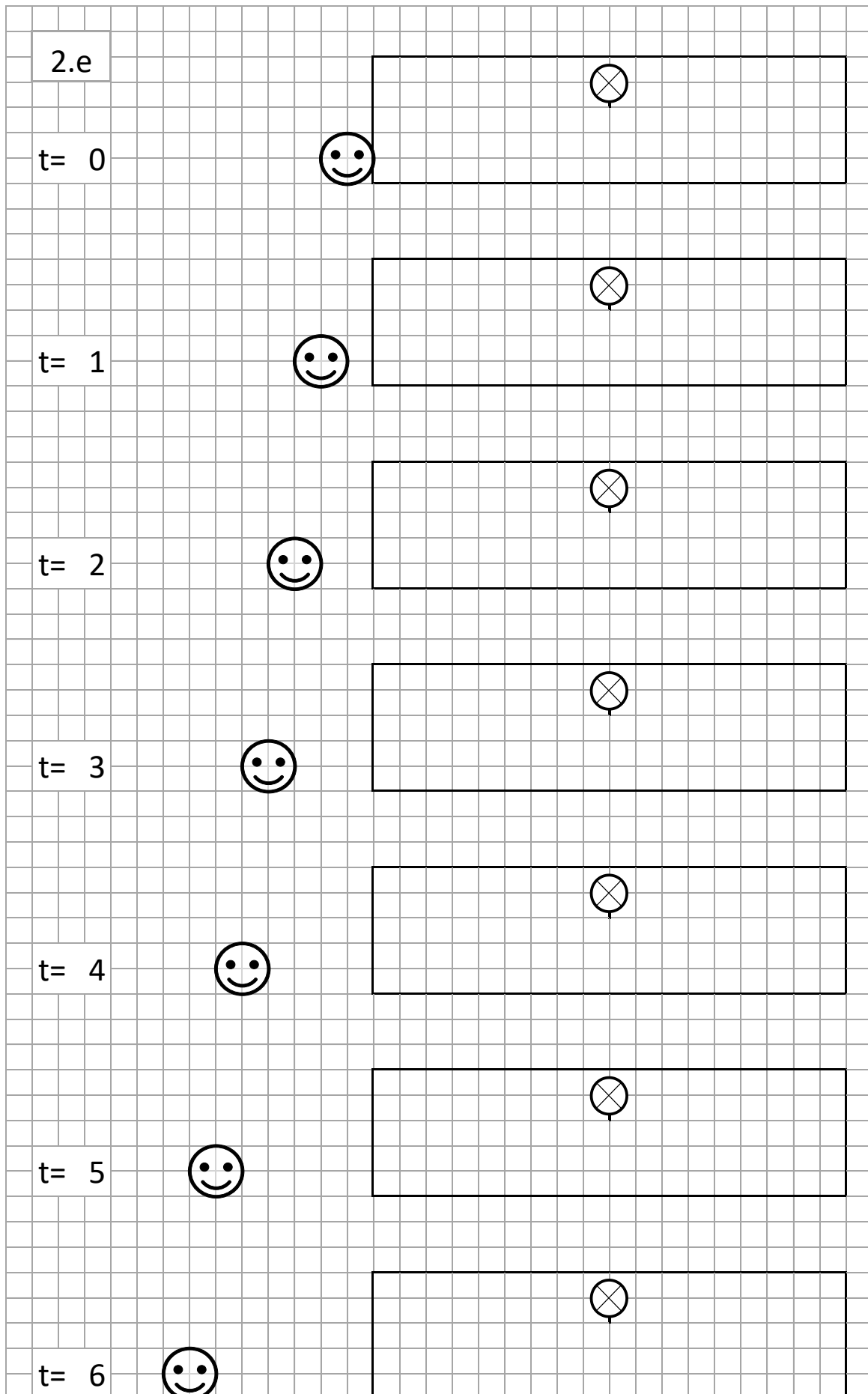
1. Geef een antwoord op de lesvraag: Hoe beweegt licht?

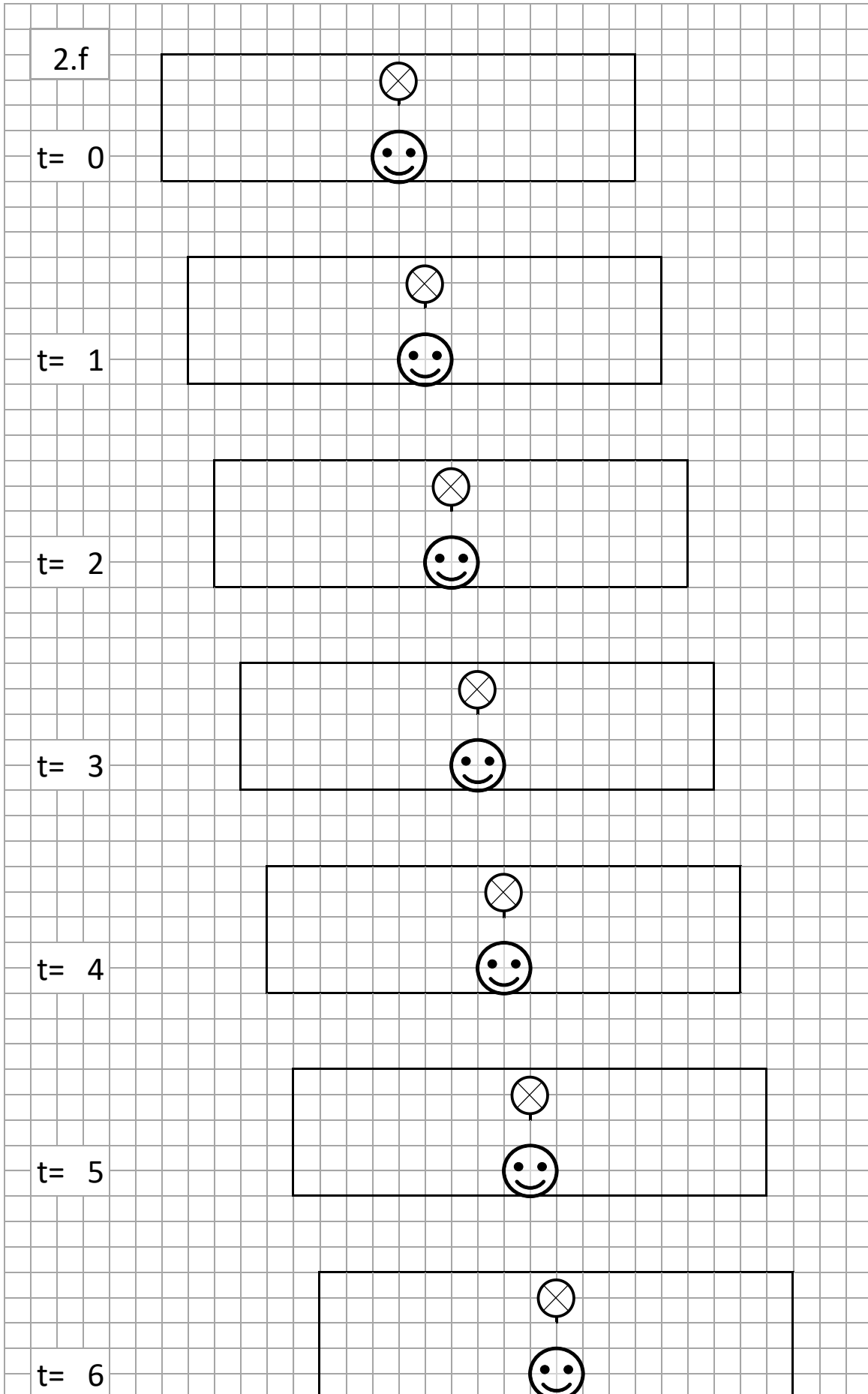


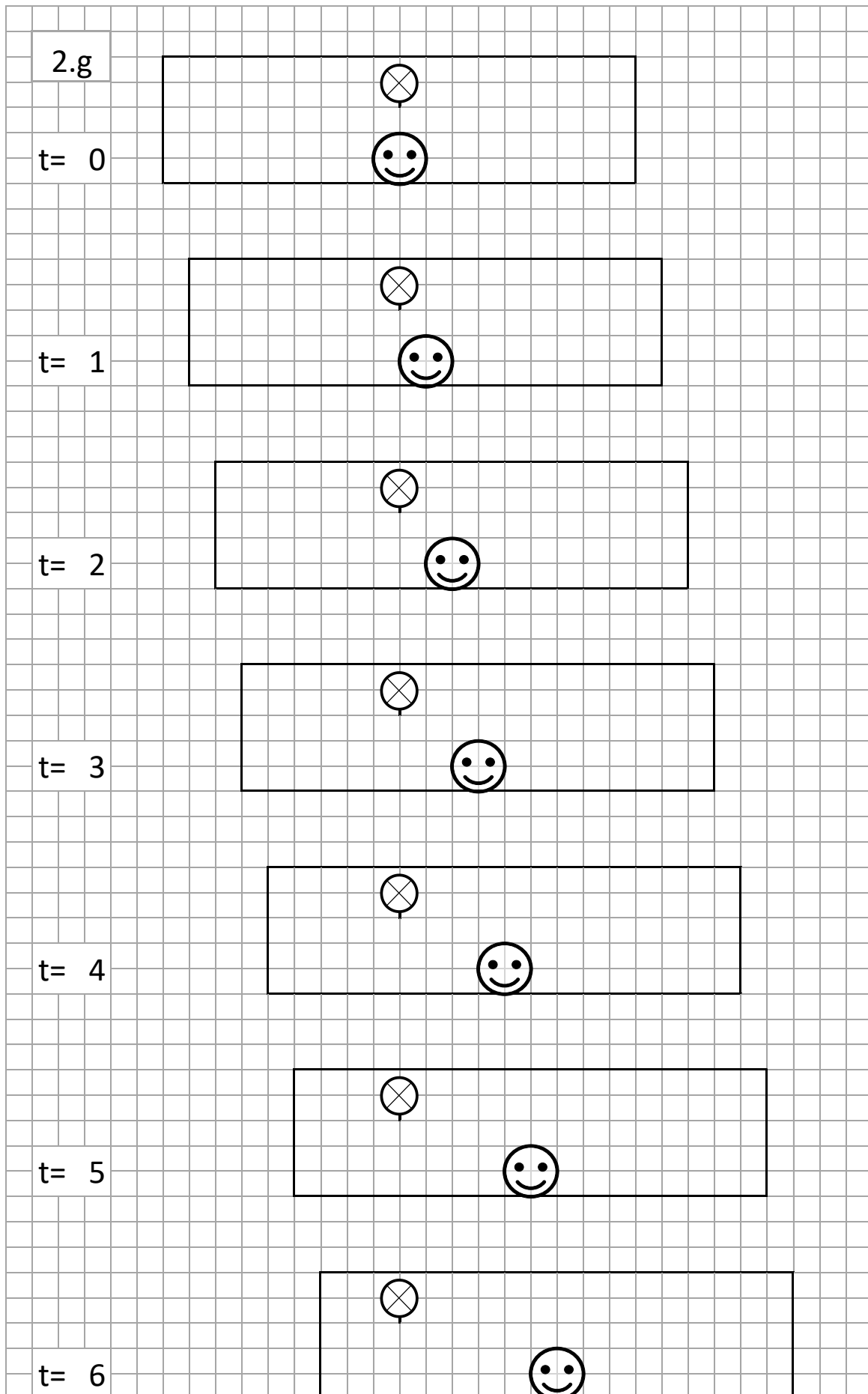














3. Wat kunnen we leren van tekenregelvoorspellingen?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Hoe kan je bepalen welk referentiekader overeenkomt met hoe licht zich daadwerkelijk gedraagt?'. Aan het eind van deze les kan je de twee tekenregels waarmee het voortbewegen van licht kan worden beschreven toepassen in verschillende contexten. Ook kan je deze tekenregels gebruiken om voorspellingen te doen.

Opdracht 3.1: Redeneeropdracht - Tekenregel 1

Gebruik bij deze opdracht diagrammen 3.a en 3.b.

In deze opdracht moet je terug redeneren. Op het tijdstip $t=0$ komen lichtflitsen gelijktijdig aan bij het meetinstrument van een onderzoeker. Deze lichtflitsen zijn een tijdje eerder uitgezonden door twee lampen die op een karretje staan. De lichtflitsen zijn niet per se op hetzelfde moment uitgezonden. Je bestudeert de situatie vanuit een onderzoeker die kijkt naar bewegende lichtbronnen (diagram 3.a) of vanuit een onderzoeker die met de lichtbronnen meebeweegt (diagram 3.b).

Tweetal 1: inertiaalstelsel van de onderzoeker die naar een bewegende lichtbronnen kijkt (diagram 3.a)

2. Bepaal hoeveel tijdstappen terug het licht is uitgezonden door de lampen als je tekenregel 1 gebruikt.
3. Bepaal de snelheid van de lichtflits.
4. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

Tweetal 2: inertiaalstelsel van de onderzoeker die met de lichtbronnen meebeweegt (diagram 3.b)

1. Bepaal hoeveel tijdstappen terug het licht is uitgezonden door de lampen als je tekenregel 1 gebruikt.
2. Bepaal de snelheid van de lichtflits.
3. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.



Opdracht 3.2: Redeneeropdracht - Tekenregel 2

Gebruik bij deze opdracht diagrammen 3.a en 3.b.

In deze opdracht moet je terug redeneren. Op het tijdstip $t=0$ komen lichtflitsen gelijktijdig aan bij het meetinstrument van een onderzoeker. Deze lichtflitsen zijn een tijdje eerder uitgezonden door twee lampen die op een karretje staan. De lichtflitsen zijn niet per se op hetzelfde moment uitgezonden. Je bestudeert de situatie vanuit een onderzoeker die kijkt naar bewegende lichtbronnen (diagram 3.a) of vanuit een onderzoeker die met de lichtbronnen meebeweegt (diagram 3.b).

Vanuit de onderzoeker die kijkt naar bewegende lichtbronnen (diagram 3.a).

1. Bepaal hoeveel tijdstappen terug het licht is uitgezonden door de lampen als je tekenregel 2 gebruikt.
2. Bepaal de snelheid van de lichtflits.
3. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

Vanuit onderzoeker die met de lichtbronnen meebeweegt (diagram 3.b)

1. Bepaal hoeveel tijdstappen terug het licht is uitgezonden door de lampen als je tekenregel 2 gebruikt.
2. Bepaal de snelheid van de lichtflits.
3. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

Opdracht 3.3: Redeneeropdracht - Interpretieren

Vragen bij diagram 3.a

1. Wat is de snelheid van het licht naar rechts?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.
2. Wat is de snelheid van het licht naar links?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.

Vragen bij diagram 3.b

1. Wat is de snelheid van het licht naar rechts?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.
2. Wat is de snelheid van het licht naar links?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.



Opdracht 3.4: Reflectieopdracht

In opdracht 3.3 heb je twee verschillende tekenregels gebruikt. Deze tekenregels leveren verschillende voorspellingen op voor het moment dat je denkt dat de lampen een lichtflits hebben uitgezonden.

1. Welke tekenregel(s) is/zijn juist? Omcirkel de stelling die het dichtst bij jouw idee komt:
 - A. De tekenregel die ik bij opdracht 2.2 gebruikte kan juist zijn, de andere tekenregel niet.
 - B. De tekenregel die ik bij opdracht 2.2 gebruikte is niet juist, de andere kan wel juist zijn.
 - C. De tekenregel die ik bij opdracht 2.2 gebruikte EN de andere tekenregel kunnen juist zijn.
 - D. De tekenregel die ik bij opdracht 2.2 gebruikte OF de andere tekenregel kunnen juist zijn.

Een onderzoeker gebruikt zowel tekenregel 1 als tekenregel 2 om een voorspelling te doen. De voorspellingen komen niet overeen.

2. Kunnen beide voorspellingen juist zijn? Leg je antwoord uit.
3. De onderzoeker doet een meting. Kan deze meting beide voorspellingen bevestigen? Leg je antwoord uit.

Opdracht 3.5: Verwerkingsopdracht - Extra oefenen met tekenregel 1 en 2

Gebruik bij deze opdracht diagram 3.c en 3.d.

1. Herhaal opdracht 3.1 en 3.2 bij de nieuwe diagrammen.
2. Wat is het verschil in de uitkomst?
3. Hoe kan je dat verklaren?

Opdracht 3.6: Verwerkingsopdracht - Extra oefenen met tekenregel 1

Gebruik bij deze opdracht diagram 3.e en 3.f.

In de trein zendt een lichtbron een korte lichtflits uit op tijdstip 0. De trein heeft een snelheid van 1 hokje per tijdstap naar links ten opzichte van de ruitjes. Een toeschouwer op het perron zit dit allemaal gebeuren.

Inertialstelsel van de onderzoeker die naar een bewegende lichtbron kijkt (diagram 3.e)

1. Bepaal na hoeveel tijdstappen de lichtflits de andere kant van de trein raakt als je tekenregel 1 gebruikt.
2. Bepaal de snelheid van de lichtflits
3. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal



Inertiaalstelsel van de onderzoeker die met de lichtbron meebeweegt (diagram 3.f)

1. Bepaal na hoeveel tijdstappen de lichtflits de andere kant van de trein raakt als je tekenregel 1 gebruikt.
2. Bepaal de snelheid van de lichtflits
3. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

Opdracht 3.7: Verwerkingsopdracht - Extra oefenen met tekenregel 2

Gebruik bij deze opdracht diagram 3.e en 3.f.

In de trein zendt een lichtbron een korte lichtflits uit op tijdstip 0. De trein heeft een snelheid van 1 hokje per tijdstap naar links ten opzichte van de ruitjes. Een toeschouwer op het perron zit dit allemaal gebeuren.

Inertiaalstelsel van de onderzoeker die naar een bewegende lichtbron kijkt (diagram 3.e)

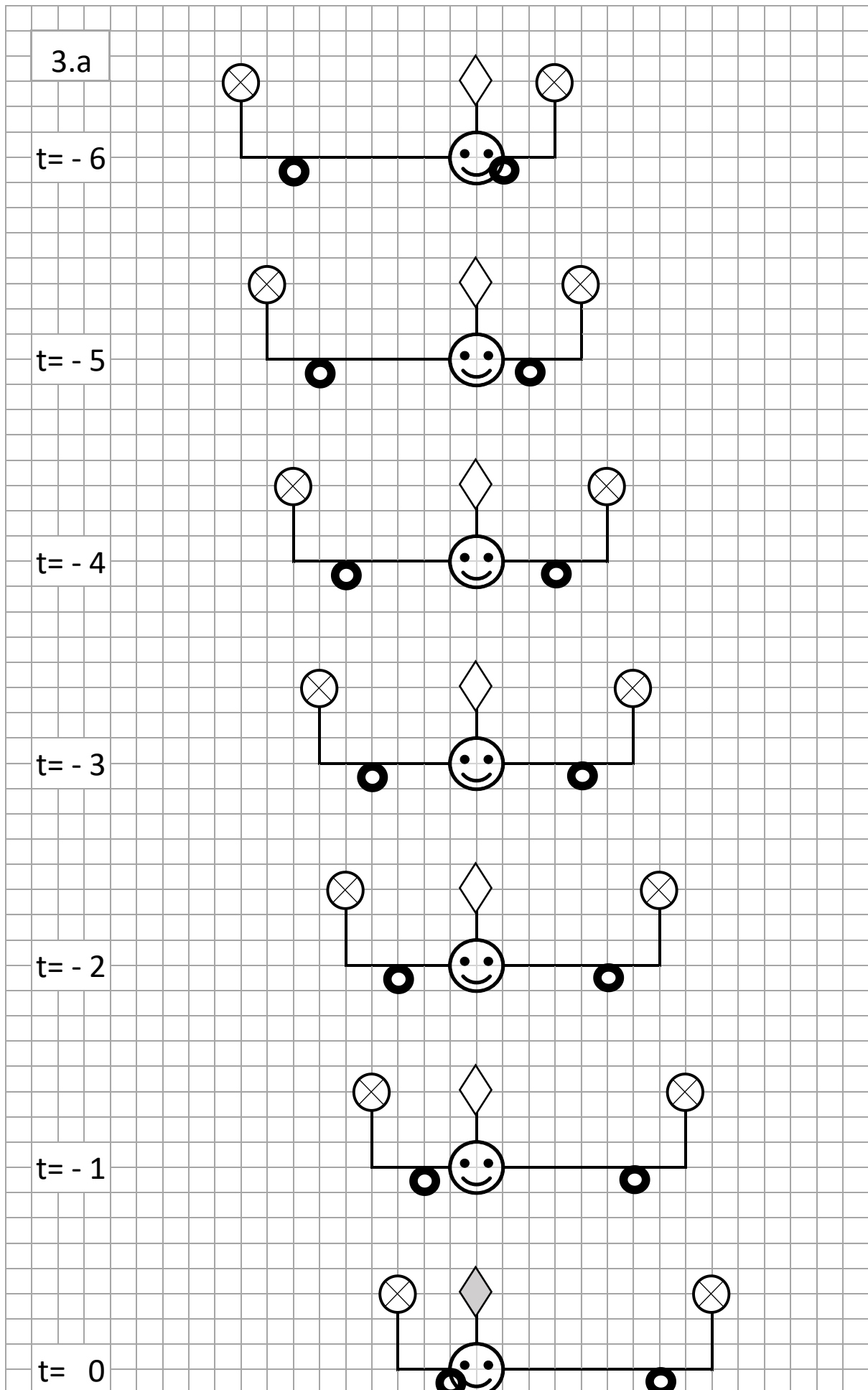
1. Bepaal na hoeveel tijdstappen de lichtflits de andere kant van de trein raakt als je tekenregel 2 gebruikt.
2. Bepaal de snelheid van de lichtflits.
3. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

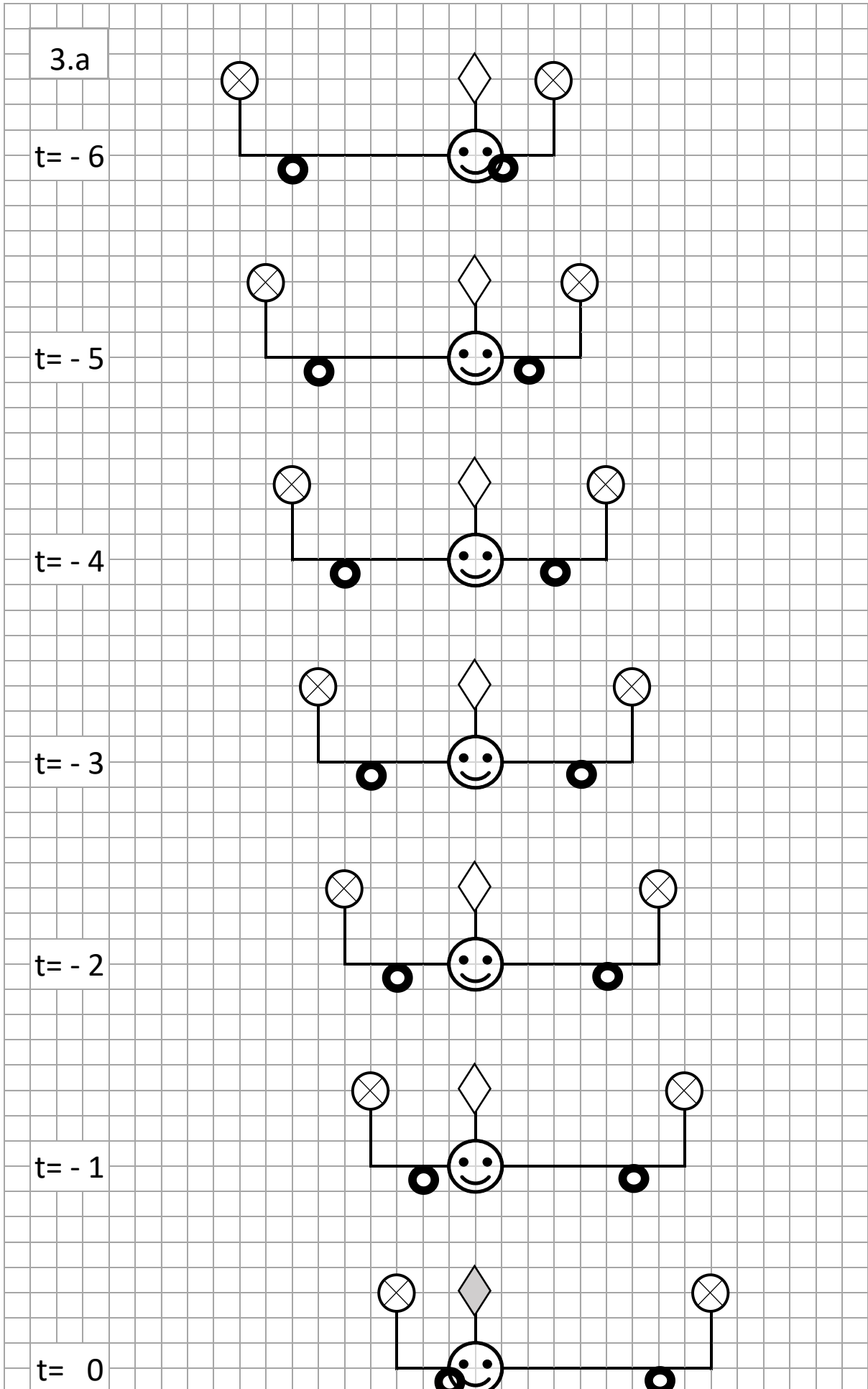
Inertiaalstelsel van de onderzoeker die met de lichtbron meebeweegt (diagram 3.f)

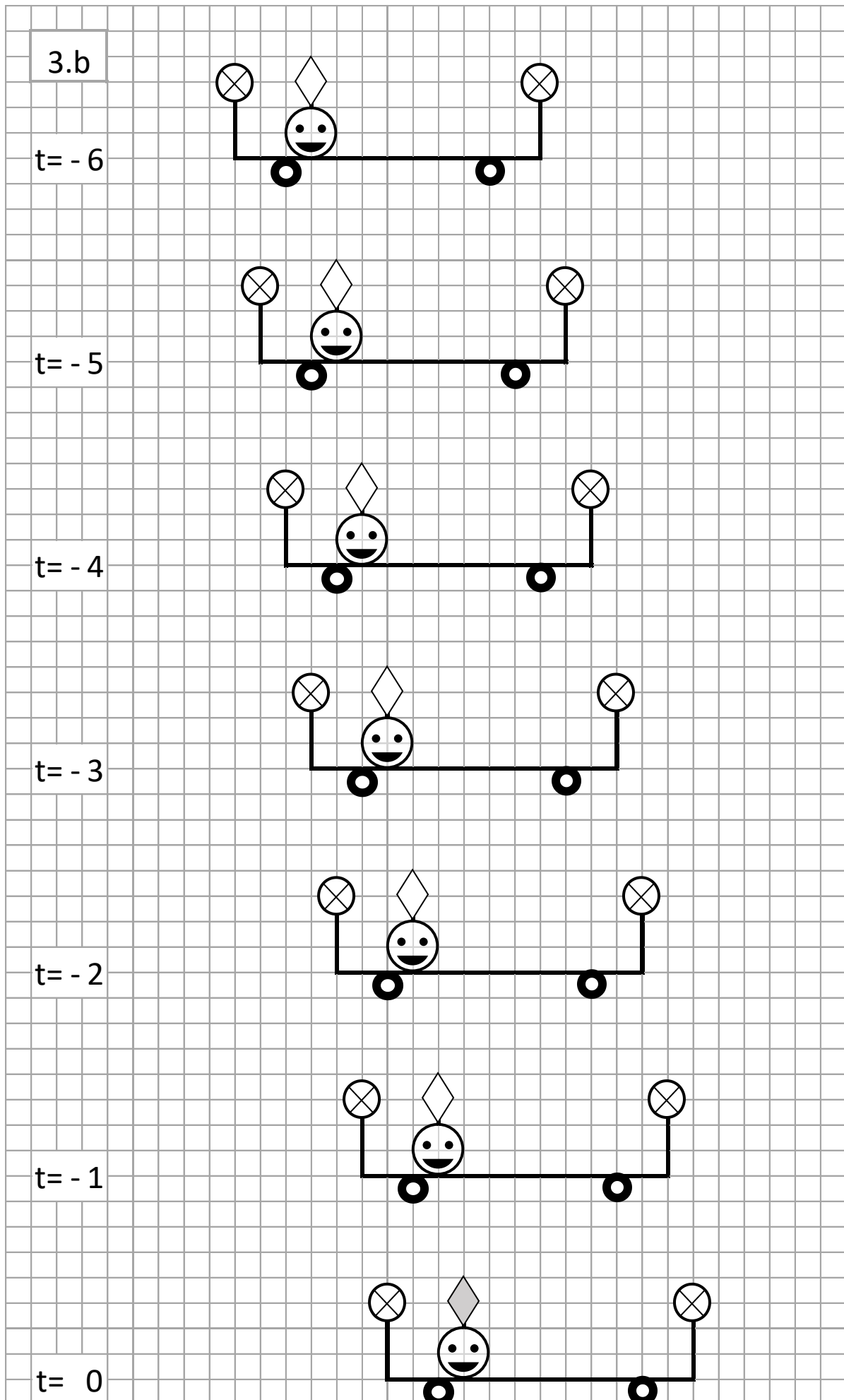
4. Bepaal na hoeveel tijdstappen de lichtflits de andere kant van de trein raakt als je tekenregel 2 gebruikt.
5. Bepaal de snelheid van de lichtflits.
6. Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

Opdracht 3.8: Beantwoorden lesvraag

1. Geef een antwoord op de lesvraag: Wat heb je geleerd over het doen met verschillend tekenregels voor het voortbewegen van licht?

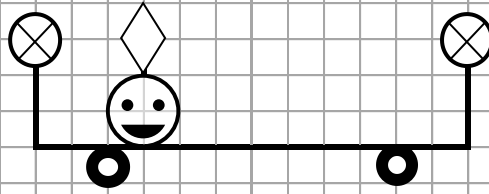




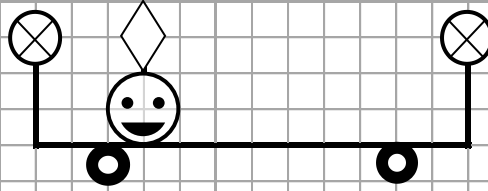


3.b

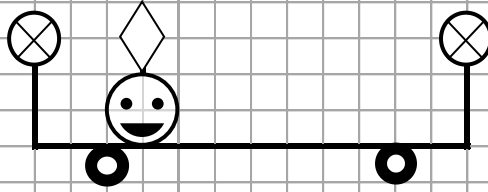
$t = -6$



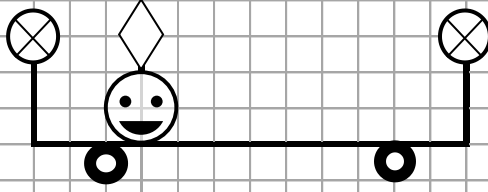
$t = -5$



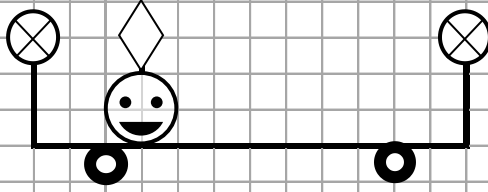
$t = -4$



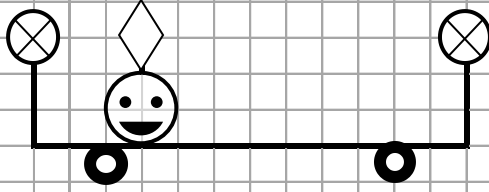
$t = -3$



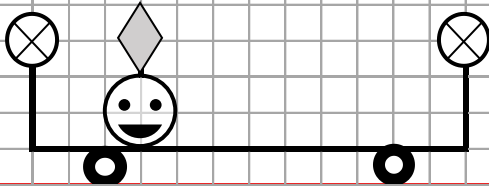
$t = -2$

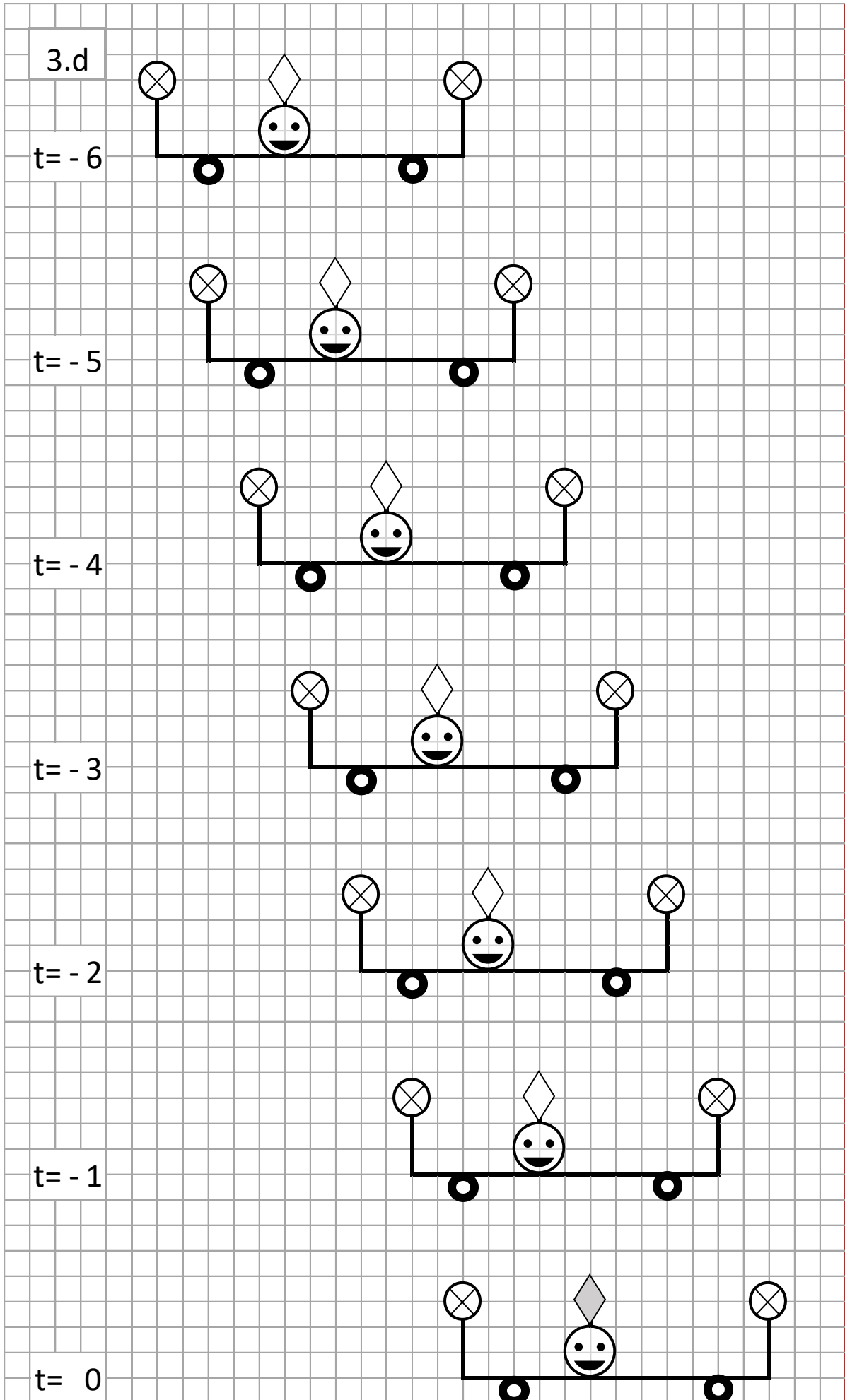


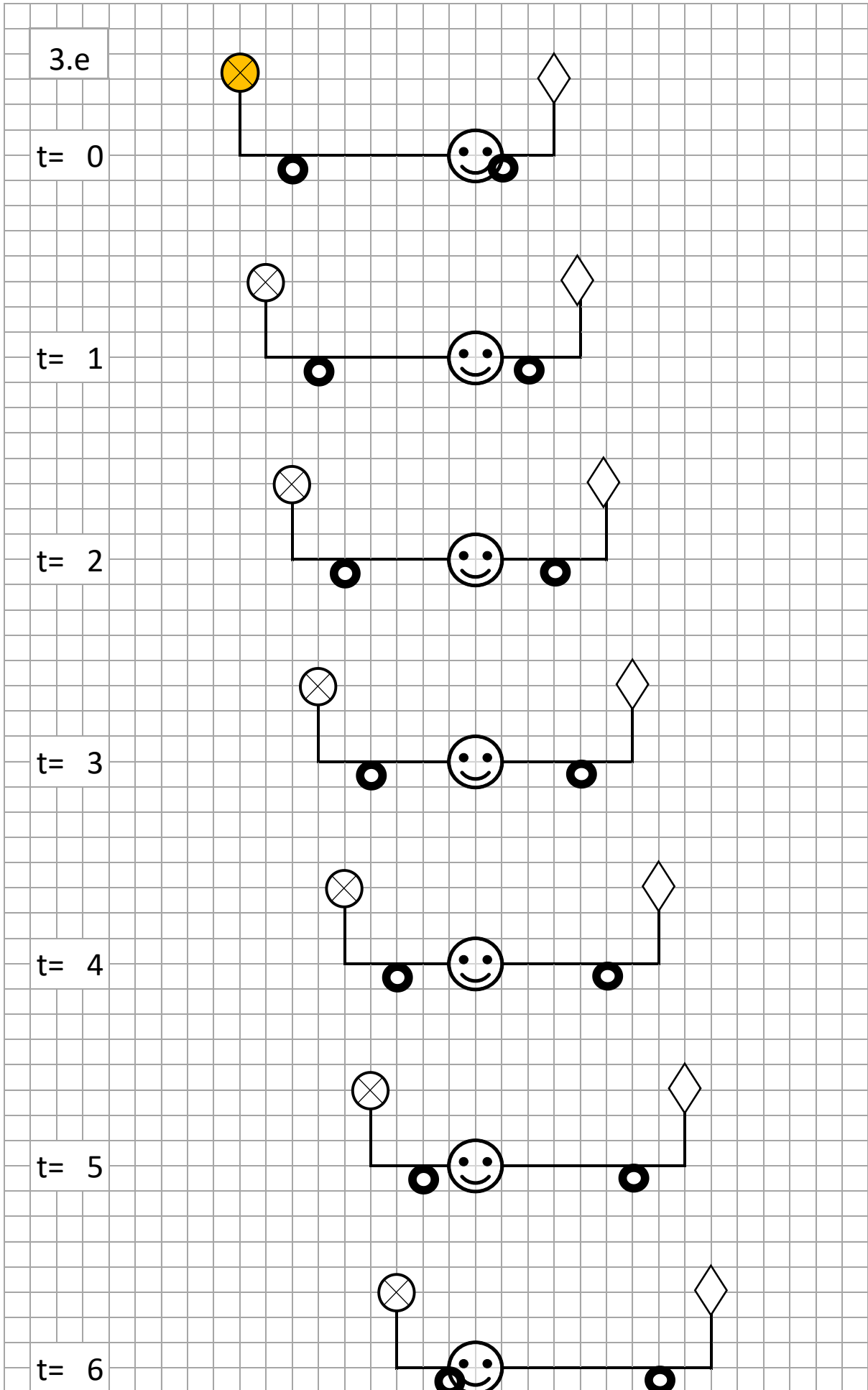
$t = -1$

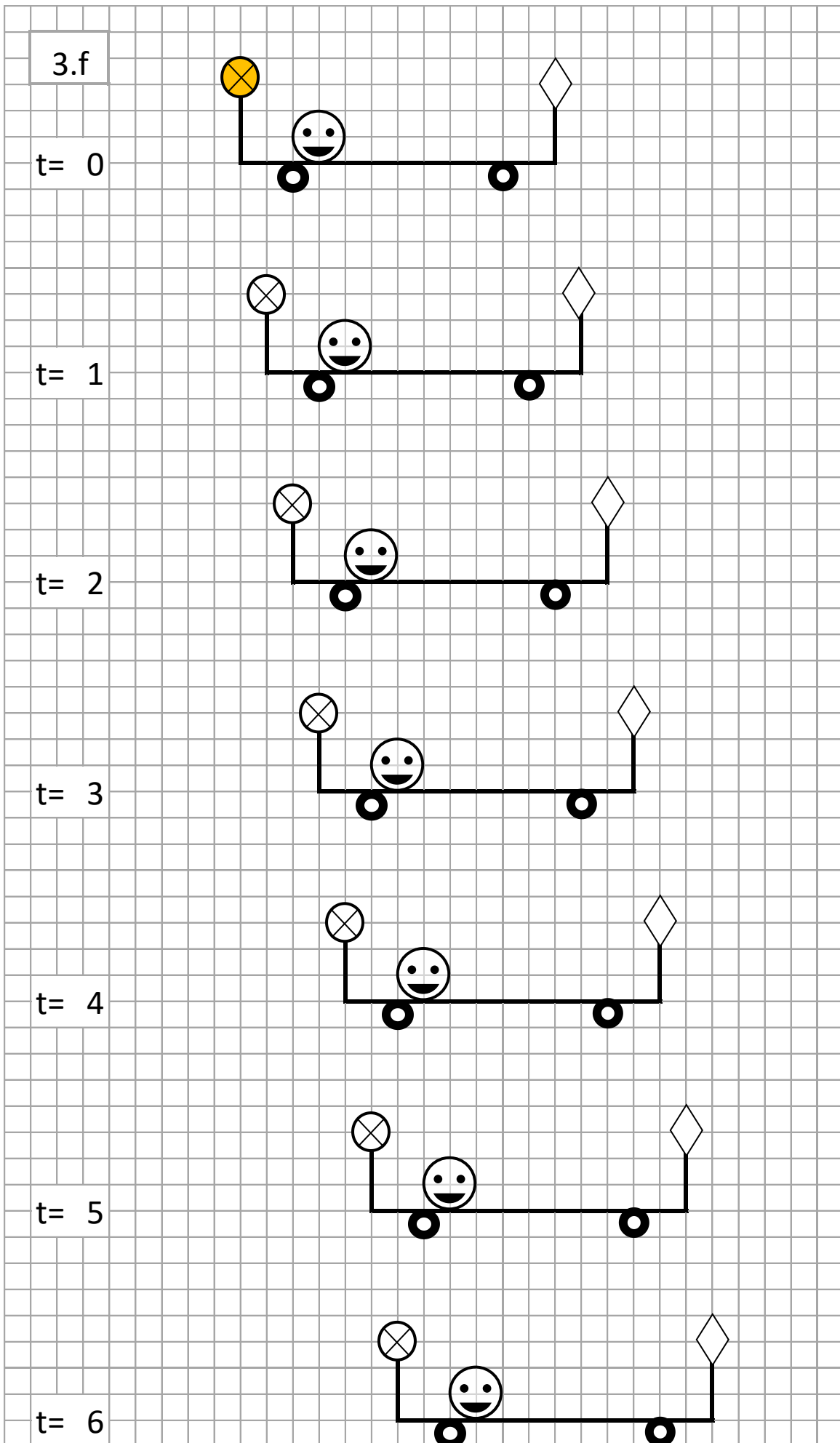


$t = 0$











4. Kan een van de tekenregels bevestigd worden door experimenten om het als voortbewegingsmodel voor licht te kunnen gebruiken?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Kan een van de tekenregels bevestigd worden door experimenten om het als voortbewegingsmiddel voor licht te kunnen gebruiken?'. Aan het eind van deze les weet je of de voorspellingen die met de tekenregels gemaakt worden ook worden bevestigd door experimenten. Met deze kennis kan je ook onderbouwen of (een van) de tekenregel(s) geschikt is als voortbewegingsmodel voor licht.



Opdracht 4.1: Redeneeropdracht - Michelson-Morley Experiment

Michelson en Morley hebben de lichtsnelheid op aarde gemeten. Een lichtbron maakte deel uit van hun meetopstelling. Met hun opstelling hebben Michelson en Morley de lichtsnelheid van licht dat voortbewoog in de bewegingsrichting van de aarde gemeten en de lichtsnelheid van licht dat loodrecht voortbewoog op de bewegingsrichting van de aarde. Michelson en Morley hebben gemeten dat de lichtsnelheid steeds dezelfde waarde had. Ongeacht van de bewegingsrichting van het licht of hoe de aarde door het heelal beweegt.

Daaruit concluderen Michelson en Morley dat de gemeten lichtsnelheid steeds gelijk is, onafhankelijk van richting waarin de onderzoeker en lichtbron door de ruimte bewegen.

Beweging

1. In het Michelson-Morley experiment bewegen de waarnemer en de lichtbron *wel/niet* ten opzichte van elkaar.
2. In het Michelson-Morley experiment bewegen de waarnemer en het heelal *wel/niet* ten opzichte van elkaar.
3. In het Michelson-Morley experiment bewegen de lichtbron en het heelal *wel/niet* ten opzichte van elkaar.
4. Het experiment lijkt op de situatie in diagram: _____

Het Michelson-Morley experiment in het Gebeurtenisdiagram

De onderzoeker in de diagram gaat nu ook de lichtsnelheid meten. Met het meetinstrument meet de onderzoeker de snelheid van het licht dat afkomstig is van de linker lamp en de rechter lamp. **De bevindingen van de onderzoeker komen overeen met die van het experiment van Michelson en Morley.**

1. De onderzoeker zal het volgende meten aan licht dat afkomstig is van de linker- en rechterlamp: De snelheid van licht dat afkomstig is van de linker lamp is volgens de onderzoeker *groter dan/kleiner dan/gelijk aan* de snelheid van licht dat afkomstig is van de rechter lamp.
2. Welke tekenregel beschrijft deze bevinding het beste?
 - a. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de lichtbron.*
 - b. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de achtergrond.*
3. Welke tekenregel is ontkracht door het experiment?
 - a. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de lichtbron.*
 - b. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de achtergrond.*

Geldigheid van de conclusie

De tekenregel die klopt met de uitkomst van het experiment is geldig als:

1. De lamp *beweegt/stilstaat* ten opzichte van de waarnemer.
2. De waarnemer *beweegt/stilstaat* ten opzichte van de achtergrond.
3. De lamp *beweegt/stilstaat* ten opzichte van de achtergrond.



Opdracht 4.2: Redeneeropdracht - De Sitter Experiment

De Sitter deed metingen aan de lichtsnelheid afkomstig van dubbelsterren. In een dubbelster roteren twee sterren om een gedeeld massamiddelpunt. De Sitter vond dat al het licht afkomstig van zo'n dubbelster dezelfde snelheid had. Dubbelsterren roteren met een hele hoge snelheid. De snelheid van de aarde ten opzichte van het massamiddelpunt van de dubbelster kunnen we daarom verwaarlozen.

Daaruit concludeert De Sitter dat de gemeten lichtsnelheid steeds gelijk is, zowel voor licht dat afkomstig is van de ster die van de aarde af beweegt als voor licht dat afkomstig is van de ster die naar de aarde toe beweegt.

Beweging

1. In het De Sitter experiment bewegen de lichtbronnen en de onderzoeker wel/niet ten opzichte van elkaar.
2. In het De Sitter experiment bewegen de lichtbronnen en het massamiddelpunt van de dubbelster wel/niet ten opzichte van elkaar.
3. In het De Sitter experiment bewegen de onderzoeker en het massamiddelpunt van de dubbelster wel/niet ten opzichte van elkaar.
4. Het experiment lijkt op de situatie in diagram: _____

Het De Sitter experiment in het Gebeurtenisdiagram

De onderzoeker in de diagram gaat nu ook de lichtsnelheid meten. Met het meetinstrument meet de onderzoeker de snelheid van het licht dat afkomstig is van de linker lamp en de rechter lamp. **De bevindingen van de onderzoeker komen overeen met die van het experiment van De Sitter.**

1. De onderzoeker zal het volgende meten aan licht dat afkomstig is van de linker- en rechterlamp: De snelheid van licht dat afkomstig is van de linker lamp is volgens de onderzoeker *groter dan/kleiner dan/gelijk aan* de snelheid van licht dat afkomstig is van de rechter lamp.
2. Welke tekenregel beschrijft deze bevinding het beste?
 - a. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de lichtbron.*
 - b. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de achtergrond.*
3. Welke tekenregel is ontkracht door het experiment?
 - a. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de lichtbron.*
 - b. *Licht beweegt met een constante snelheid ten opzichte van de achtergrond.*

Geldigheid van de conclusie

De tekenregel die klopt met de uitkomst van het experiment is geldig als:

1. De lamp *beweegt/stilstaat* ten opzichte van de waarnemer.
2. De waarnemer *beweegt/stilstaat* ten opzichte van de achtergrond.
3. De lamp *beweegt/stilstaat* ten opzichte van de achtergrond.



Opdracht 4.3: Reflectieopdracht

1. Is een van deze tekenregels een geschikt voortbewegingsmodel voor licht?

Opdracht 4.4: Verwerkingsvragen

Kijk voor deze opdracht alleen naar de uitwerkingen in de diagrammen die bevestigd zijn door de experimenten.

Vragen bij diagram 3.a

1. Wat is de snelheid van het licht naar rechts?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Tenopzichte van het ruitjespapier.
2. Wat is de snelheid van het licht naar links?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.

Vragen bij diagram 3.b

3. Wat is de snelheid van het licht naar rechts?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.
4. Wat is de snelheid van het licht naar links?
 - a. Ten opzichte van de onderzoeker.
 - b. Ten opzichte van de lichtbron.
 - c. Ten opzichte van het ruitjespapier.

Opdracht 4.5: Beantwoorden lesvraag

1. Geef een antwoord op de lesvraag: Kan een van de tekenregels gebruikt worden experimenten om het als voortbewegingsmodel voor licht te gebruiken?



5. Kunnen we een algemeen voortplantingsmodel voor licht maken?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Kunnen we een algemeen voortplantingsmodel voor licht maken?'. In deze les gebruik je de resultaten van de experimenten uit de vorige les om tot een nieuwe tekenregel te komen. Daarmee weet je aan het eind van deze les welk voortbewegingsmodel voor licht overeenkomt met de waarnemingen. Ook kan je dit voortbewegingsmodel toepassen in de diagrammen om voorspellingen te doen.

Opdracht 5.1: Redeneeropdracht

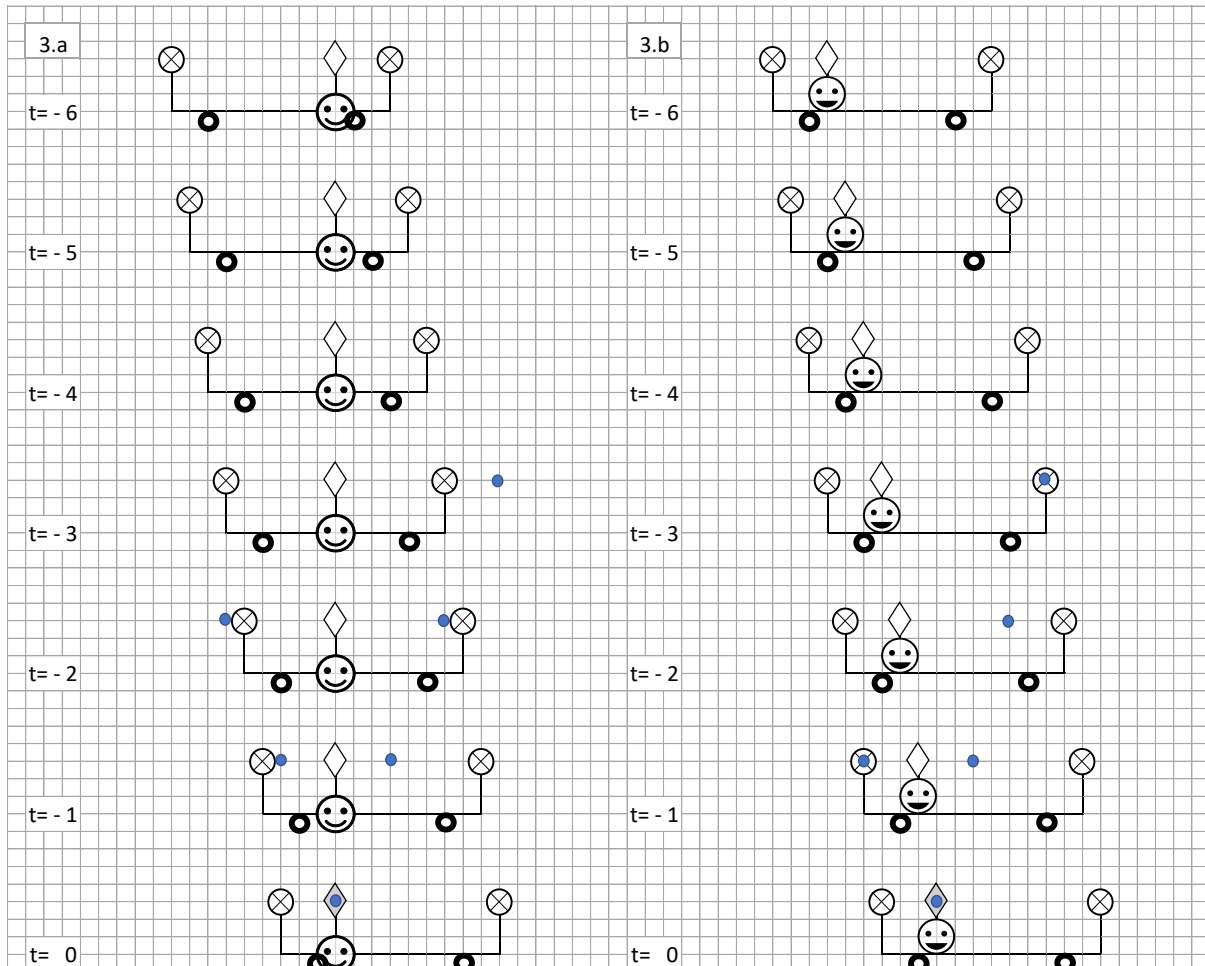
Vat de opbrengst van de afgelopen lessen in onderstaand schema samen.

Michelson Morley	De Sitter
Komt overeen met diagram	Komt overeen met diagram....
De lamp beweegt wel/niet t.o.v. de waarnemer	De lamp beweegt wel/niet t.o.v. de waarnemer
De waarnemer beweegt wel/niet t.o.v. de achtergrond	De waarnemer beweegt wel/niet t.o.v. de achtergrond
De lamp beweegt wel/niet t.o.v. de achtergrond	De lamp beweegt wel/niet t.o.v. de achtergrond
Snelheid licht t.o.v. waarnemer	Snelheid licht t.o.v. waarnemer
naar rechts:	naar rechts:
naar links:	naar links:
Snelheid licht t.o.v. lamp	Snelheid licht t.o.v. lamp
naar rechts:	naar rechts:
naar links:	naar links:
Snelheid licht t.o.v. ruitjespapier	Snelheid licht t.o.v. ruitjespapier
naar rechts:	naar rechts:
naar links:	naar links:

Opdracht 5.2: Reflectieopdracht

Gebruik de lege diagrammen van 5.a en 5.b voor deze opdracht.

In onderstaande diagrammen is weergegeven hoe licht beweegt. Deze resultaten zijn bevestigd door de experimenten.



De tekenregels die gebruikt zijn om deze resultaten te construeren kunnen niet meer in alle situaties gebruikt worden om kloppende voorspellingen te doen.

1. Geef een tekenregel waarmee je deze resultaten zou kunnen reproduceren.
2. Probeer je tekenregel uit in de lege diagrammen van 5.a en 5.b.
3. Ben je tevreden over je tekenregel? Leg je antwoord uit.



Opdracht 5.3: Verwerkingsopdracht

Gebruik bij deze opdracht diagram 5.c en 5.d.

Een passagier voor in de trein stuurt een tekstbericht met bluetooth (een lichtsignaal) naar een passagier achter in de trein. De telefoon van de voorste passagier is weergegeven als lampje, van de achterste passagier als ontvanger. Buiten op het perron staat een toeschouwer. Het bericht verlaat de telefoon met een snelheid van 3 hokjes per tijdstapje en de trein rijdt met 2 hokjes per tijdstap.

Vanuit de toeschouwer op het perron:

1. Bepaal na hoeveel tijdstappen het bericht de andere kant van de trein raakt.
2. Bepaal de snelheid van de elektromagnetische golf.

Vanuit de passagiers in de trein:

3. Bepaal na hoeveel tijdstappen het bericht de andere kant van de trein raakt.
4. Bepaal de snelheid van de elektromagnetische golf.

Vergelijk je antwoorden met de antwoorden van het andere tweetal.

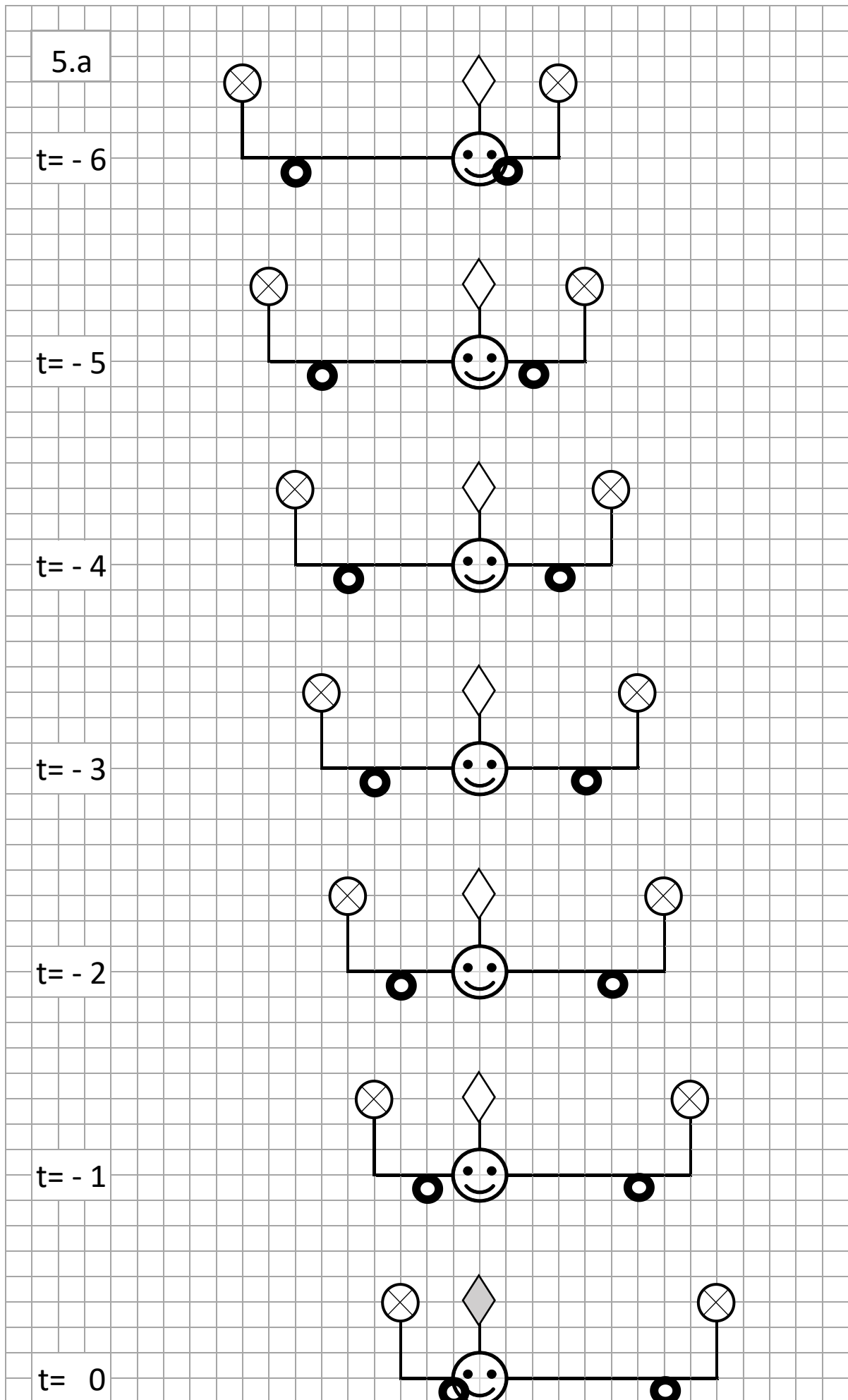
Opdracht 5.4: Verwerkingsopdracht

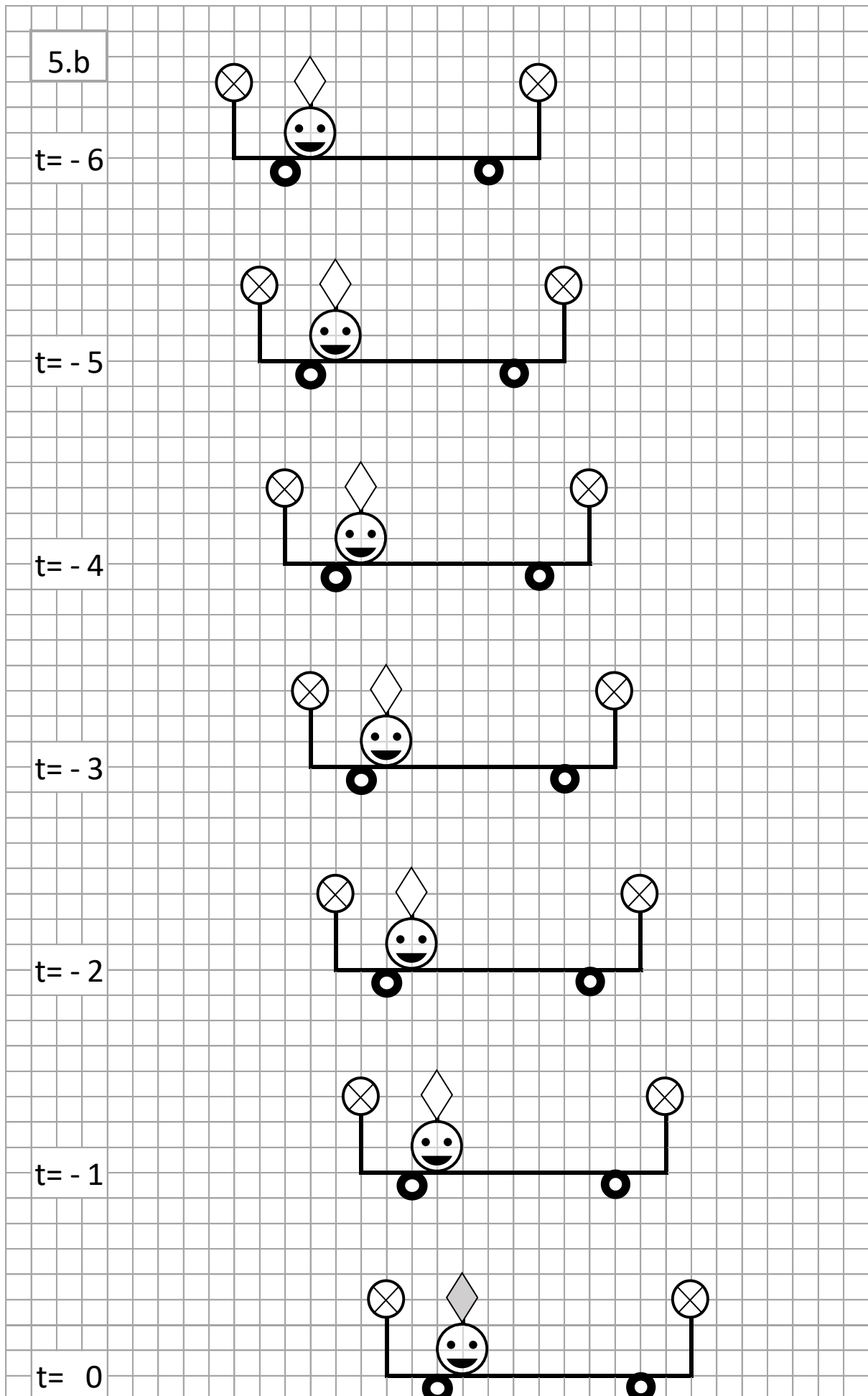
Gebruik voor deze opdracht diagrammen 5.e, 5.f, 5.g, 5.h.

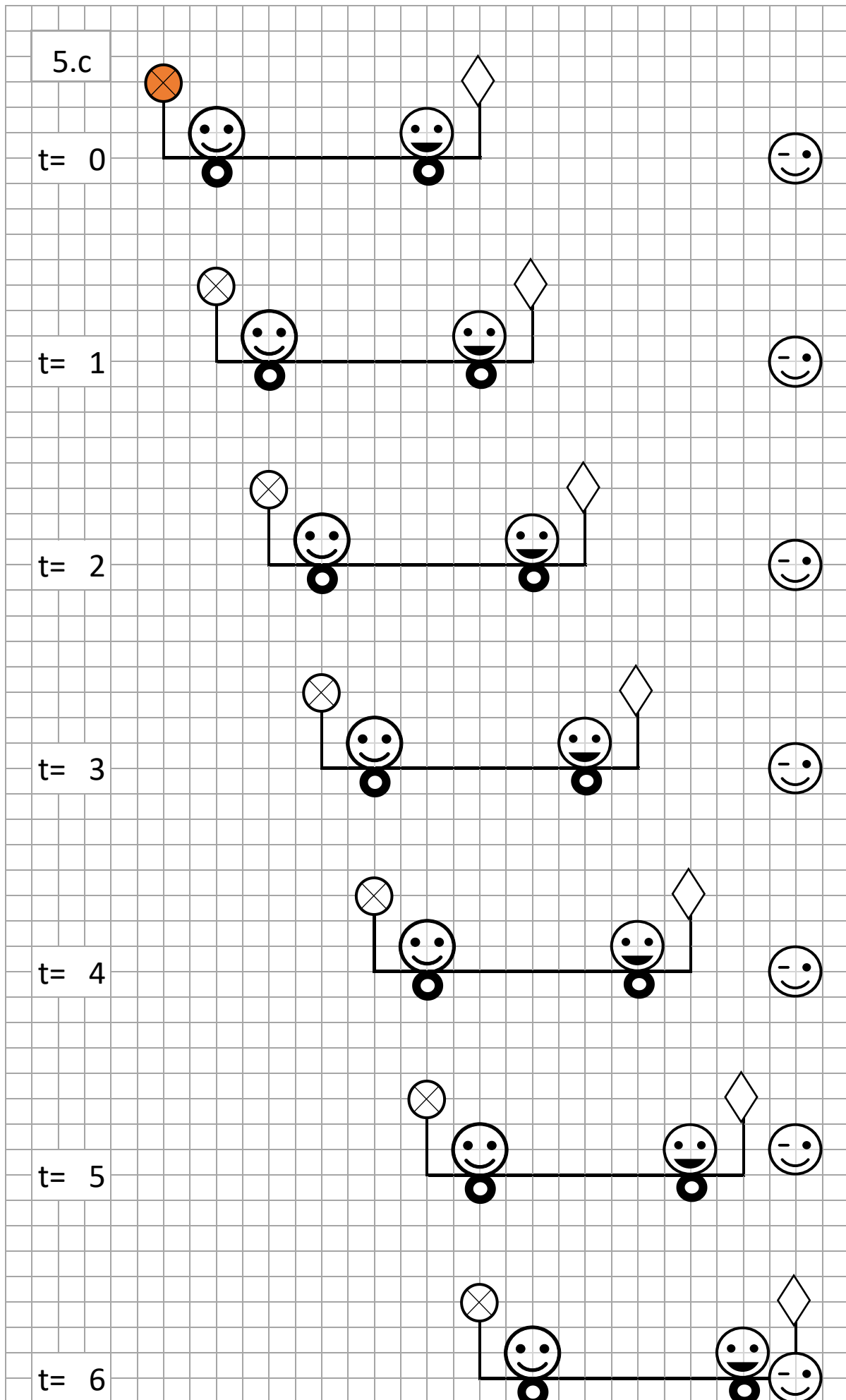
Teken het voortbewegen van licht in deze diagrammen voor de verschillende onderzoekers die staan weergegeven.

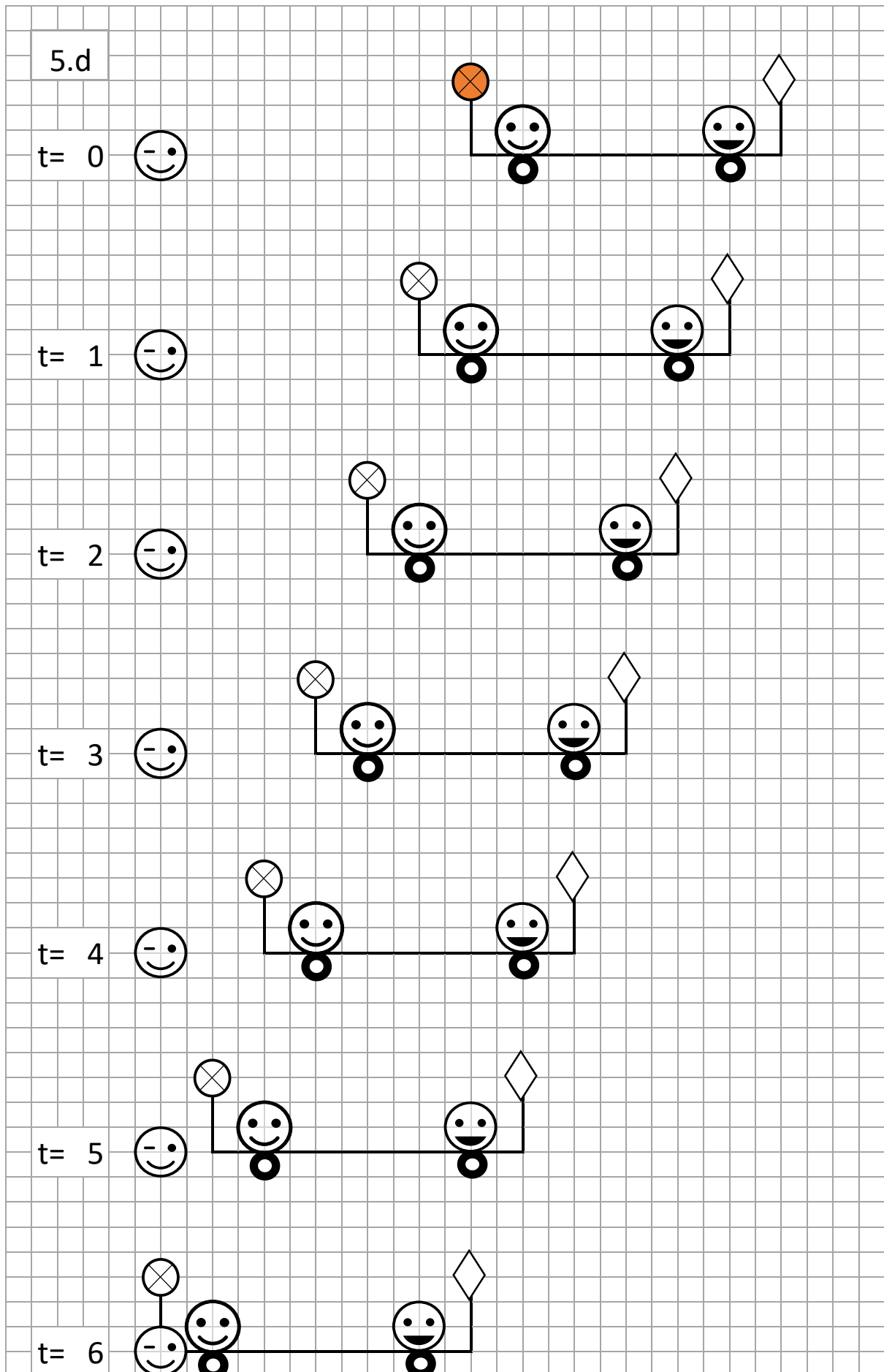
Opdracht 5.5: Beantwoorden lesvraag

1. Geef een antwoord op de lesvraag: Kunnen we een algemeen voortplantingsmodel voor licht maken?

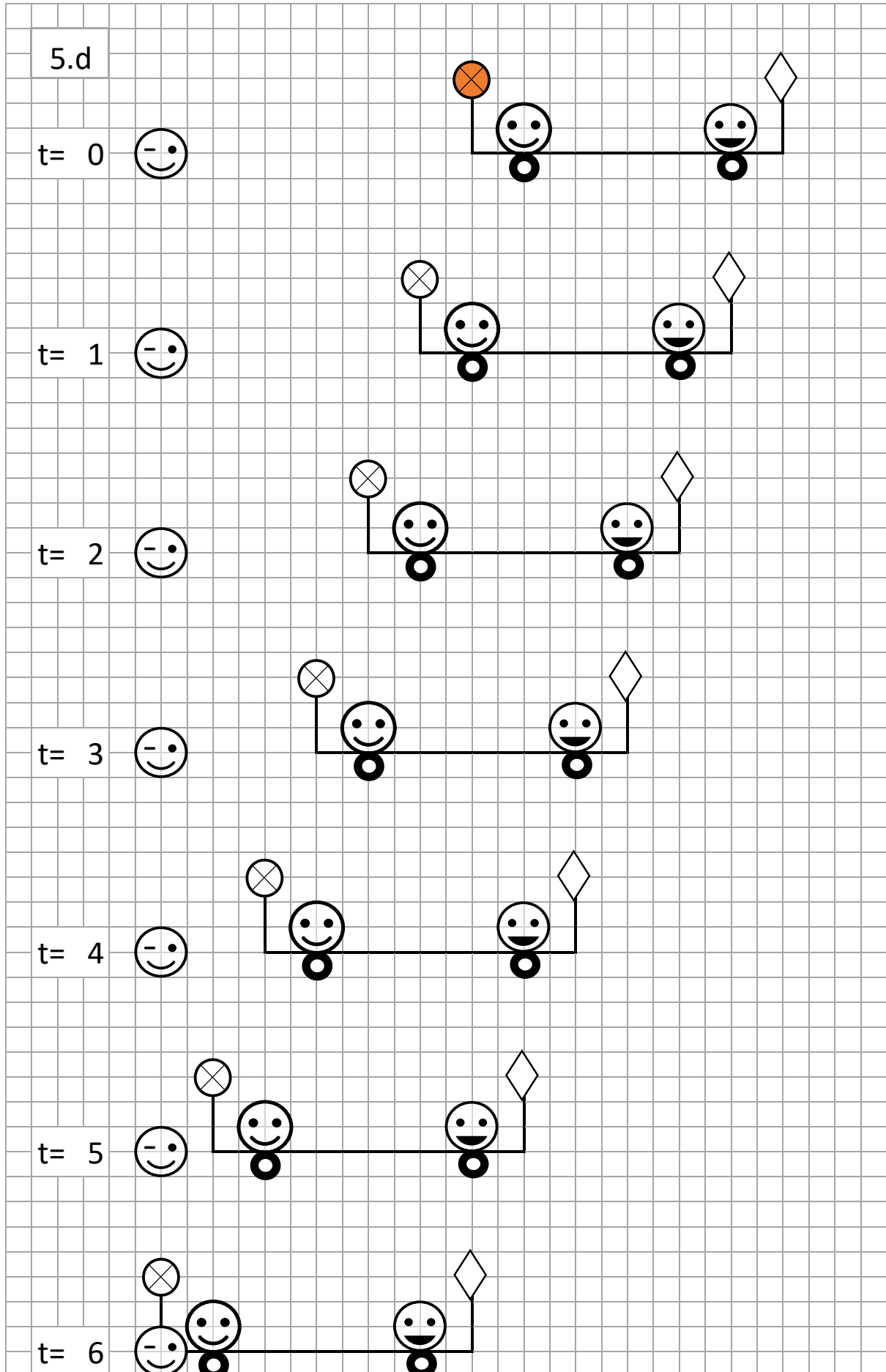














6. Wat zijn de gevolgen voor plaats en tijd van het lichtpostulaat?

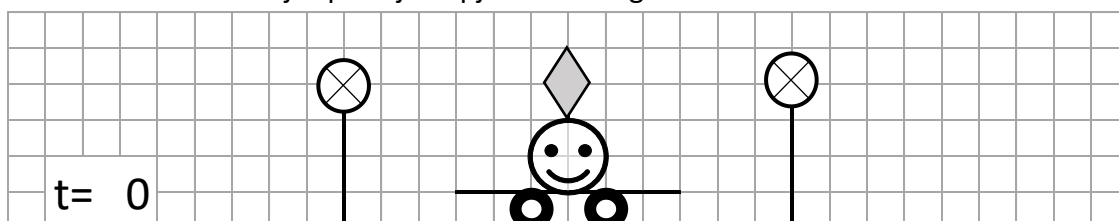
Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Wat zijn de gevolgen voor plaats en tijd van het lichtpostulaat?'. Aan het eind van deze les kan je het lichtpostulaat in nieuwe contexten toepassen en kan je de gevolgen van dit voortbewegingsmodel voor het type voorspelling dat je daarmee kan doen uitleggen.

Opdracht 6.1: Redeneeropdracht

In deze opdracht bestuderen we een onderzoeker met een meetinstrument. Het meetinstrument registreert het moment waarop twee lichtflitsen gelijktijdig binnen komen. Je gaat uitzoeken op welke momenten de lichtflitsen verzonden zijn. De lichtflitsen zijn afkomstig van twee lampen, die na het uitzenden van hun lichtflits weer uit gaan. De opdracht bestaat uit een losse vraag, twee diagrammen en een aantal vragen waarbij je reflecteert op de uitkomsten van de diagrammen.

Bij deze opdracht neem je de plaats van de onderzoeker in. Hieronder zie je een deel van het diagram weergegeven. De ruit bij de onderzoeker geeft het meetinstrument weer. Een grijze ruit geeft aan dat de lichtflitsen door het meetinstrument zijn geregistreerd. De lampen zijn weergegeven met de schakelsymbolen van een lampje. Licht heeft opnieuw een snelheid van drie hokjes per tijdstapje in het diagram.



1. Leg in je eigen woorden uit hoe licht zich voortbeweegt.

Gebruik voor deze opdracht diagram 6.a

2. De laatste tijdstap $t=0$ geeft aan dat twee lichtsignalen bij de sensor van de onderzoeker zijn aangekomen. Bepaal door in de diagram te tekenen op welke plaats en tijdstip de lampen zijn aangegaan volgens deze onderzoeker.

Gebruik voor deze opdracht diagram 6.b

3. We bekijken dezelfde situatie, maar nu vanuit een andere onderzoeker, die in deze opdracht als de sip kijkende smiley is weergegeven. Op welke plaats en tijdstip zijn de lampen volgens deze onderzoeker aangegaan?
4. Komen de twee onderzoekers tot hetzelfde antwoord?
5. Welke vraag roept dat bij je op?



Opdracht 6.2: Reflectie-opdracht

1. Wat is het gevolg van het lichtpostulaat voor de plaats en tijd die onderzoekers toekennen aan dezelfde gebeurtenissen?

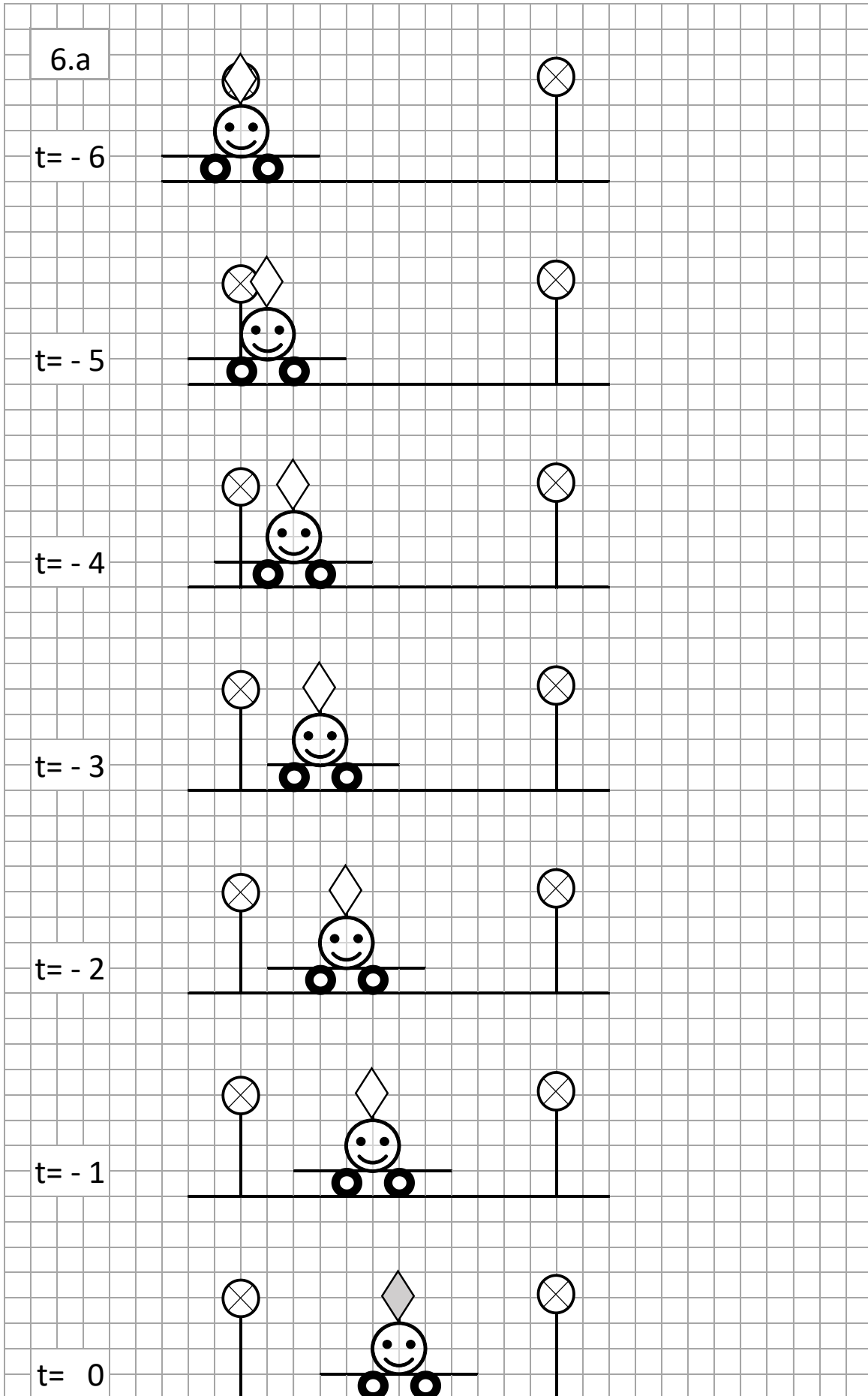
Opdracht 6.3: Verwerkingsopdracht

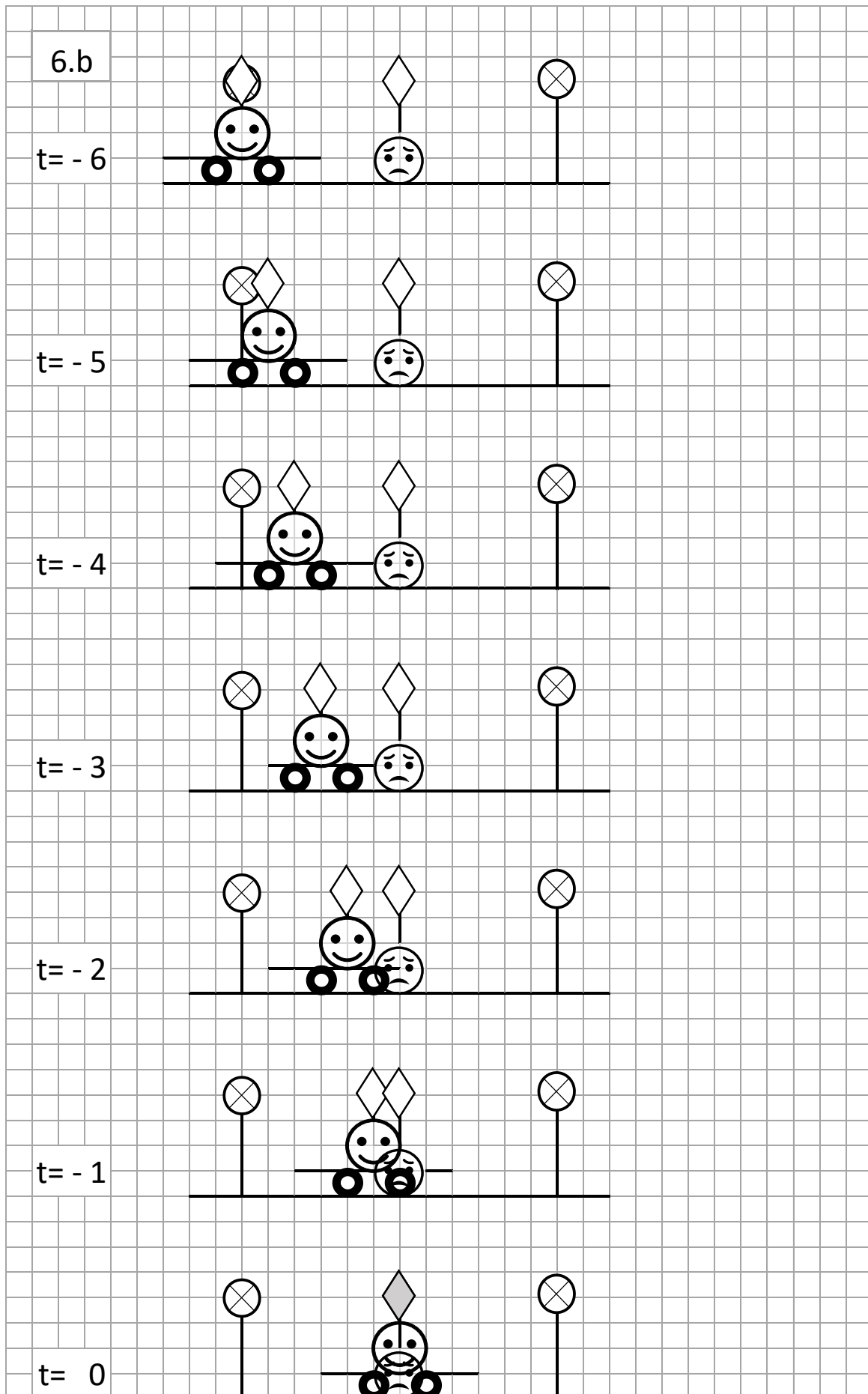
Gebruik bij deze opdracht diagram 6.c t/m 6.g

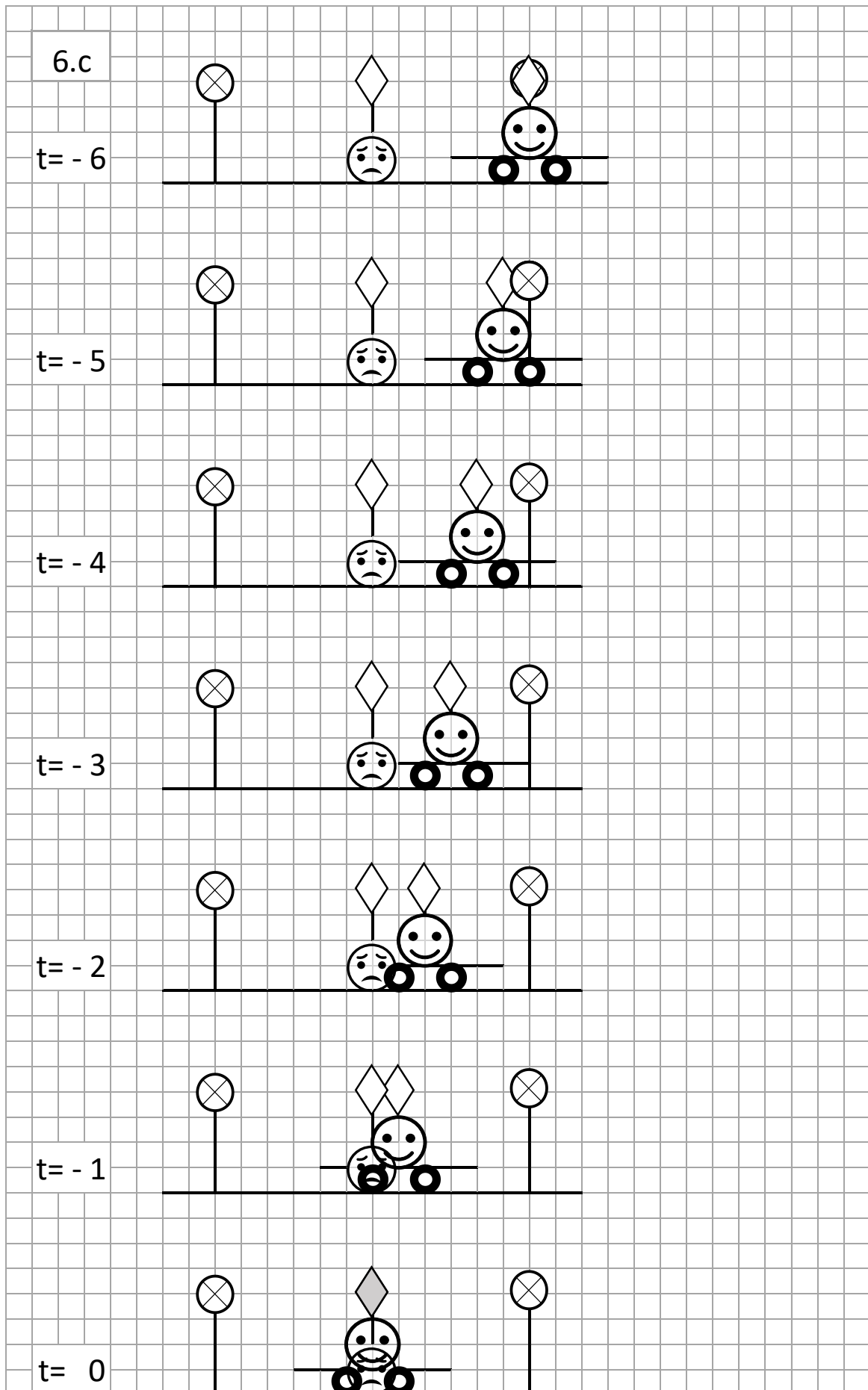
Extra oefening met lichtpostulaat. De laatste tijdstap $t=0$ geeft aan dat twee lichtsignalen bij de sensor van de onderzoeker zijn aangekomen. Bepaal door in de diagram te tekenen op welke plaats en tijdstip de lampen zijn aangegaan volgens deze onderzoeker. Herhaal deze opdracht voor de andere onderzoeker.

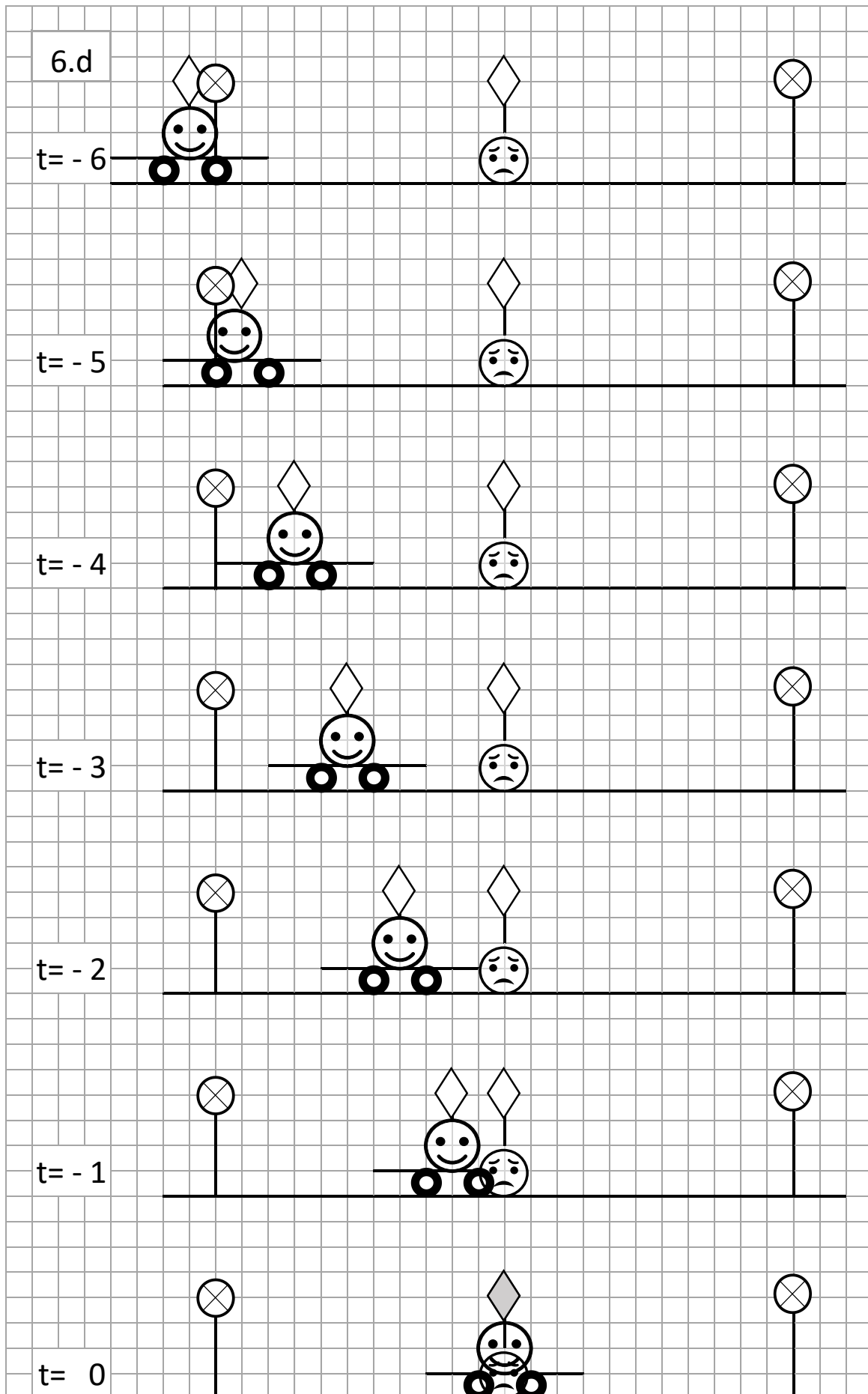
Opdracht 6.4: Beantwoorden lesvraag

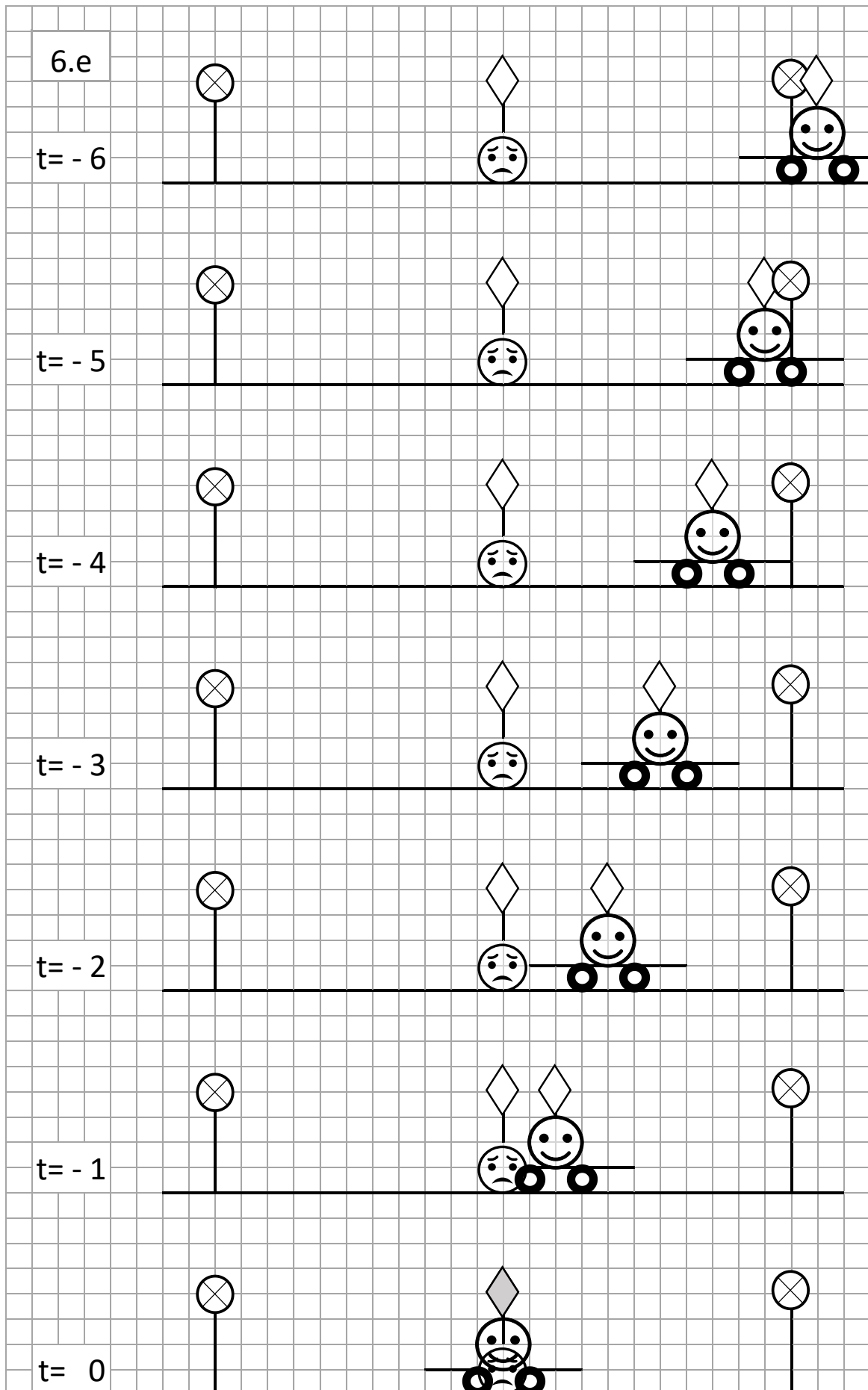
1. Geef een antwoord op de lesvraag: Wat zijn de gevolgen voor plaats en tijd van het lichtpostulaat?

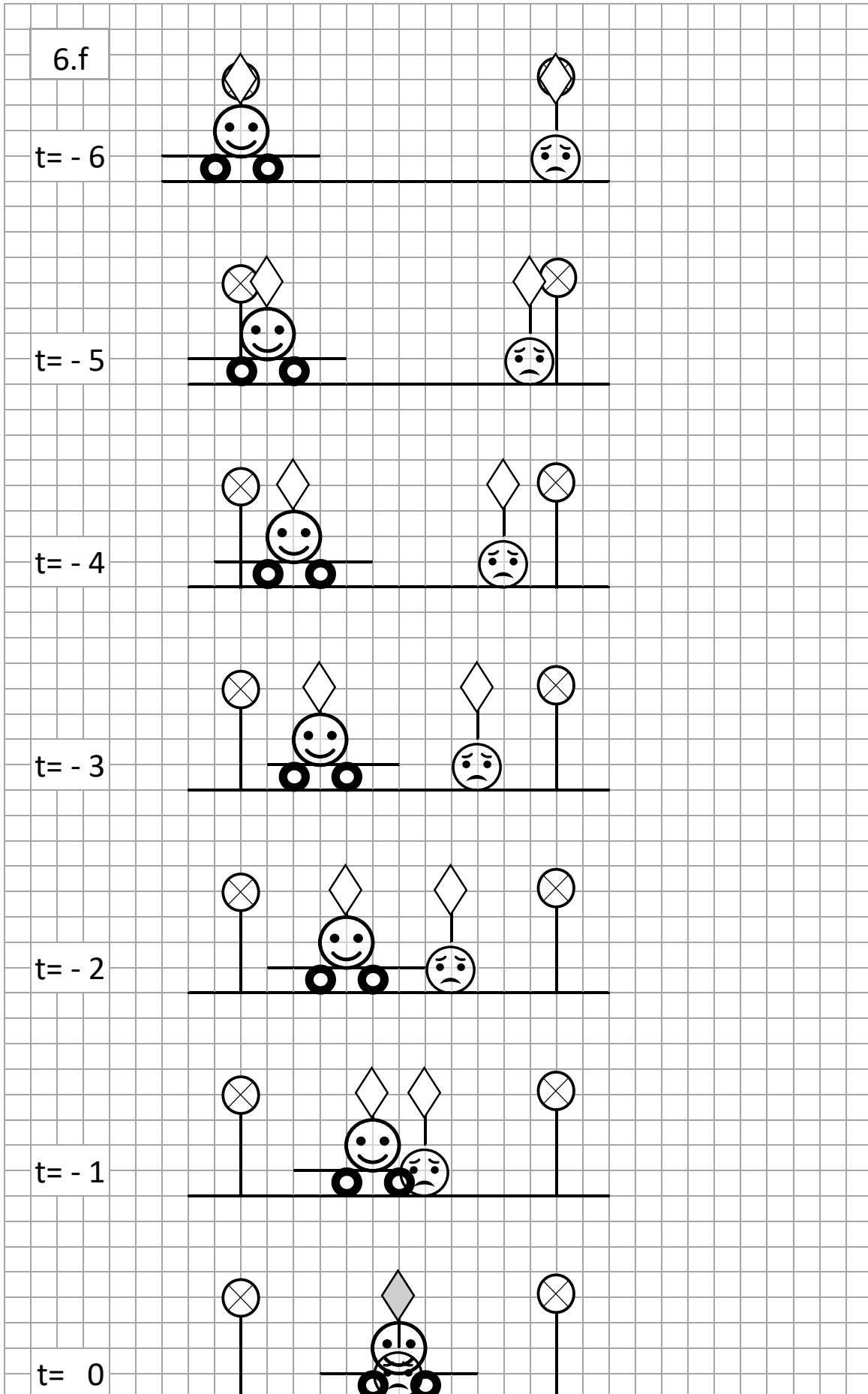


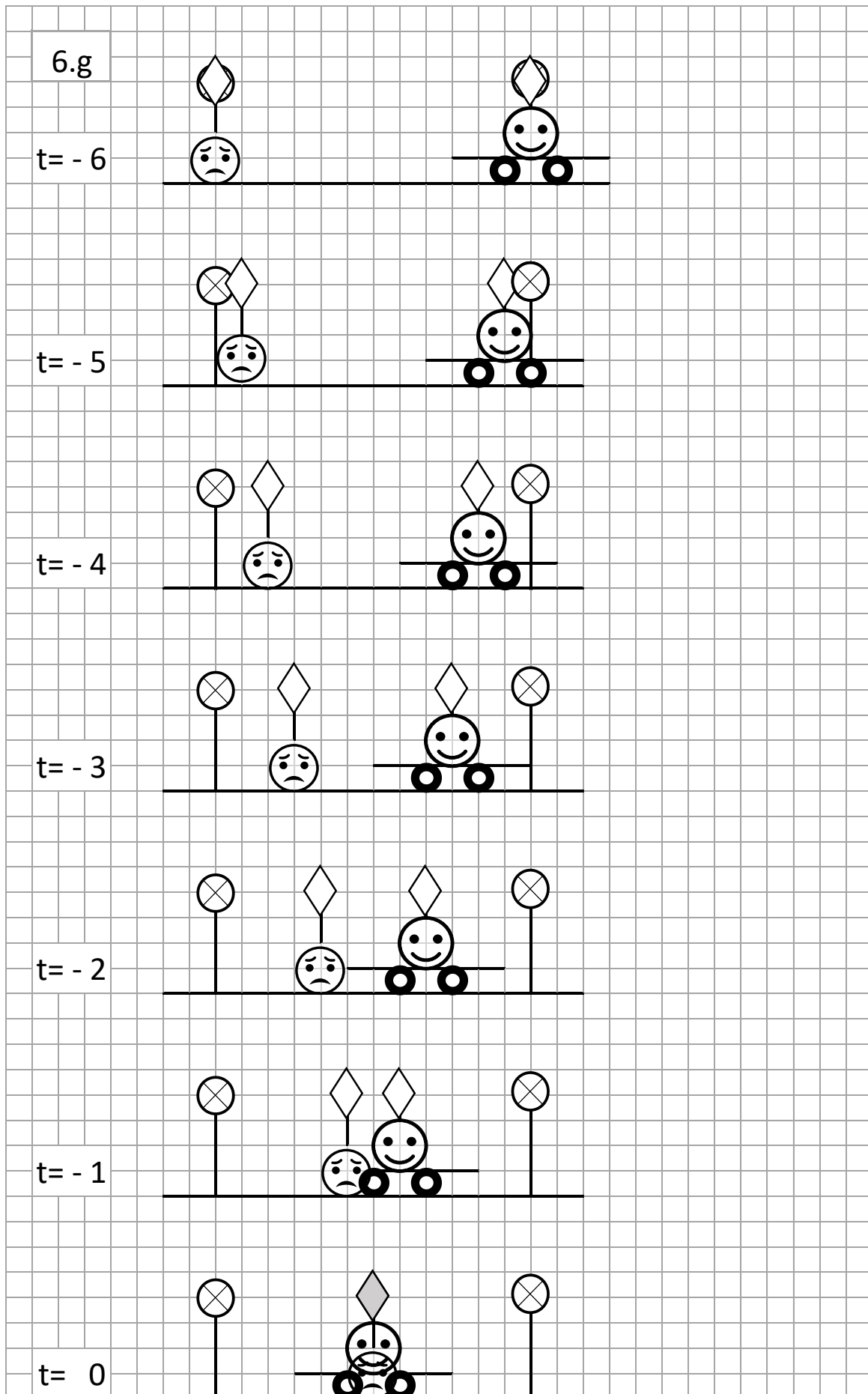














7. Wat is er aan de hand met tijdsduur?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Wat is er aan de hand met tijdsduur?'. Aan het eind van deze les kan je uitleggen wat de gevolgen van het lichtpostulaat voor de tijdsduur tussen twee gebeurtenissen zijn. Je kan uitleggen hoe die tijdsduur beïnvloed wordt door de relatieve snelheid tussen twee onderzoekers.

Opdracht 7.1: Redeneeropdracht

Gebruik voor deze opdracht diagrammen 7.a, 7.b en de (x,y)-diagrammen die zijn opgenomen na diagram 7.d.

We bekijken een set spiegels waar een lichtflits tussen op en neer kaatst. De lichtflits wordt op $t=0$ uitgezonden door de lamp. Twee onderzoekers bekijken het proces. Een van de onderzoekers (A) heeft geen snelheid ten opzichte van de spiegels, voor de andere onderzoeker (B) bewegen de spiegels van hem af.

Diagram 7.a is weergegeven vanuit de onderzoeker (A) die stilstaat ten opzichte van de spiegels.

1. Teken het pad van het licht voor onderzoeker A in diagram 7.a.
2. Hoe lang duurt het eenmaal op en neer kaatsen van het licht volgens onderzoeker A?
3. Teken het traject van het licht volgens onderzoeker A in de (x,y)-grafiek.

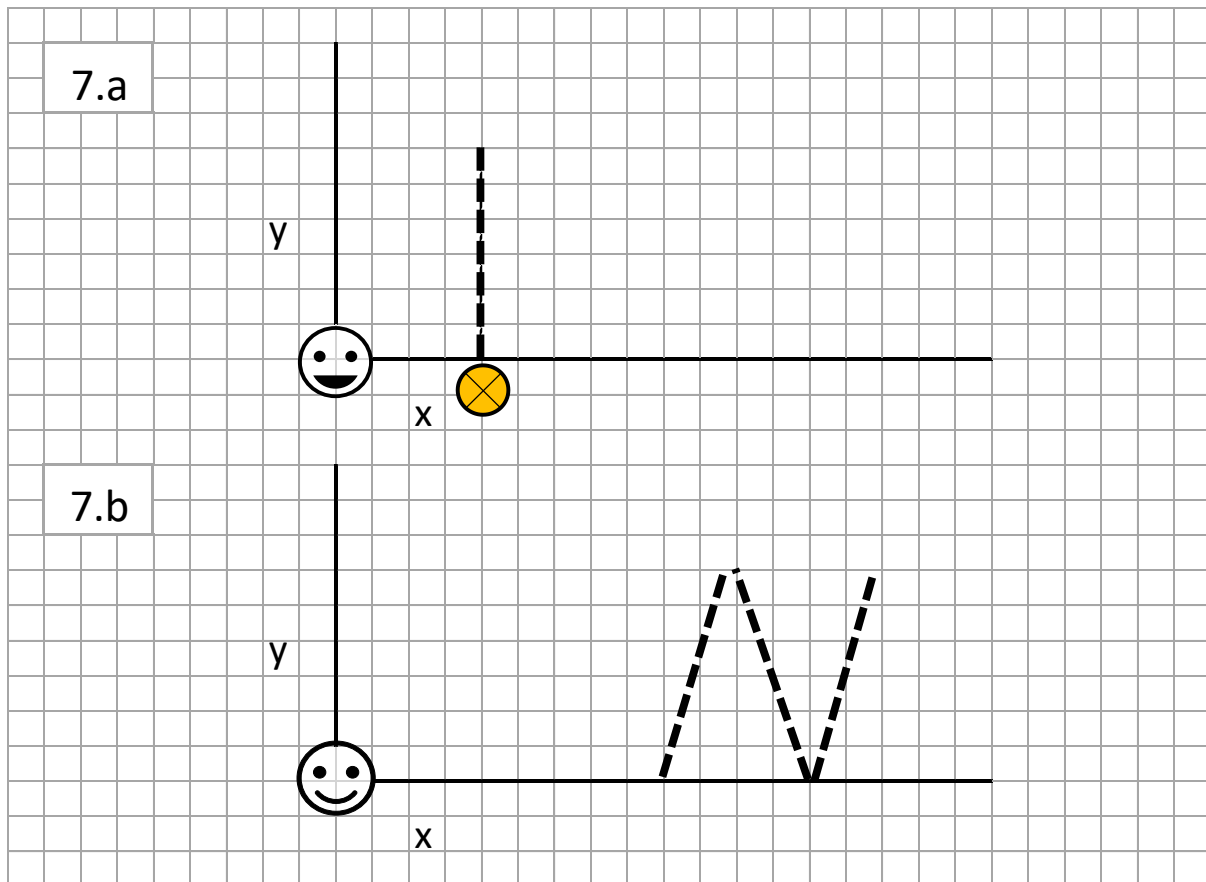
Diagram 7.b is weergegeven vanuit de onderzoeker (B) die naar bewegende spiegels kijkt.

4. Bepaal het pad van het licht voor onderzoeker B in diagram 7.b.
5. Teken het traject van het licht volgens onderzoeker B in de (x,y)-grafiek.

Opdracht 7.2: Reflectieopdracht

In het gedachte-experiment uit opdracht 7.1 gaat het om de tijdsduur tussen twee gebeurtenissen: het uitzenden van een lichtflits door een lampje (gebeurtenis 1) en dat de lichtflits weer bij de onderste spiegel is (gebeurtenis 2). In de figuur op de volgende pagina staat de route weergegeven die het licht ten opzichte van onderzoeker A en B heeft afgelegd.

1. Hoe groot is de tijdsduur tussen de twee gebeurtenissen volgens onderzoeker A (7.a)?
2. Meet onderzoeker B (7.b) dezelfde tijdsduur? Leg uit waarom wel/niet en wat het eventuele verschil is met onderzoeker A.
3. Wat verandert er als de onderlinge snelheid tussen onderzoeker A en B toeneemt? Leg je antwoord uit.
4. Wat verandert er als de onderlinge snelheid in grootte gelijk blijft, maar wel de andere kant op gaat? Leg je antwoord uit.



Opdracht 7.3: Redeneeropdracht 2

Gebruik voor deze opdracht diagrammen 7.c, 7.d en de (x,y) -diagrammen.

We hebben dezelfde opzet als Opdracht 7.1. Alleen zijn nu de rollen van de onderzoekers omgedraaid. Onderzoeker B heeft geen snelheid ten opzichte van de spiegels, terwijl de spiegels volgens onderzoeker A wel een snelheid hebben.

Diagram 7.c is weergegeven vanuit de onderzoeker (B) die stilstaat ten opzichte van de spiegels.

1. Teken het pad van het licht voor onderzoeker B in diagram 7.c.
2. Hoe lang duurt het eenmaal op en neer kaatsen van het licht volgens onderzoeker B?
3. Teken het traject van het licht volgens onderzoeker B in de (x,y) -grafiek.

Diagram 7.d is weergegeven vanuit de onderzoeker (A) die naar bewegende spiegels kijkt.

4. Bepaal het pad van het licht voor onderzoeker A in diagram 7.d.
5. Teken het traject van het licht volgens onderzoeker A in de (x,y) -grafiek.
6. Hoe lang duurt het eenmaal op en neer kaatsen van het licht volgens onderzoeker A?



Opdracht 7.4: Reflectieopdracht 2

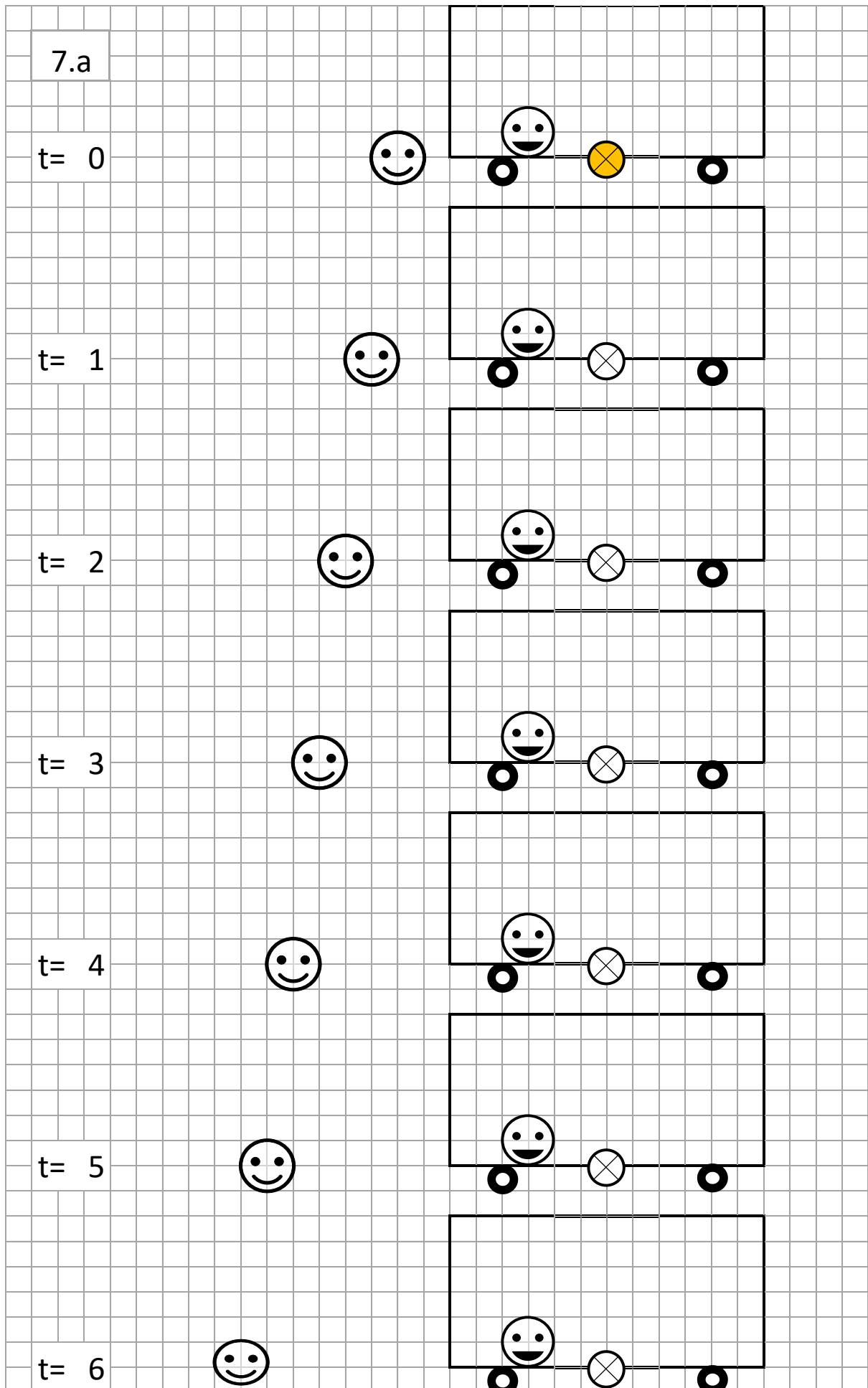
1. Hoe veranderen de verhoudingen van de tijdsduur als de relatieve snelheid tussen A en B verandert (toeneemt, afneemt)?
2. Hoe veranderen de verhoudingen van de tijdsduur als het karretje de andere kant op rijdt?

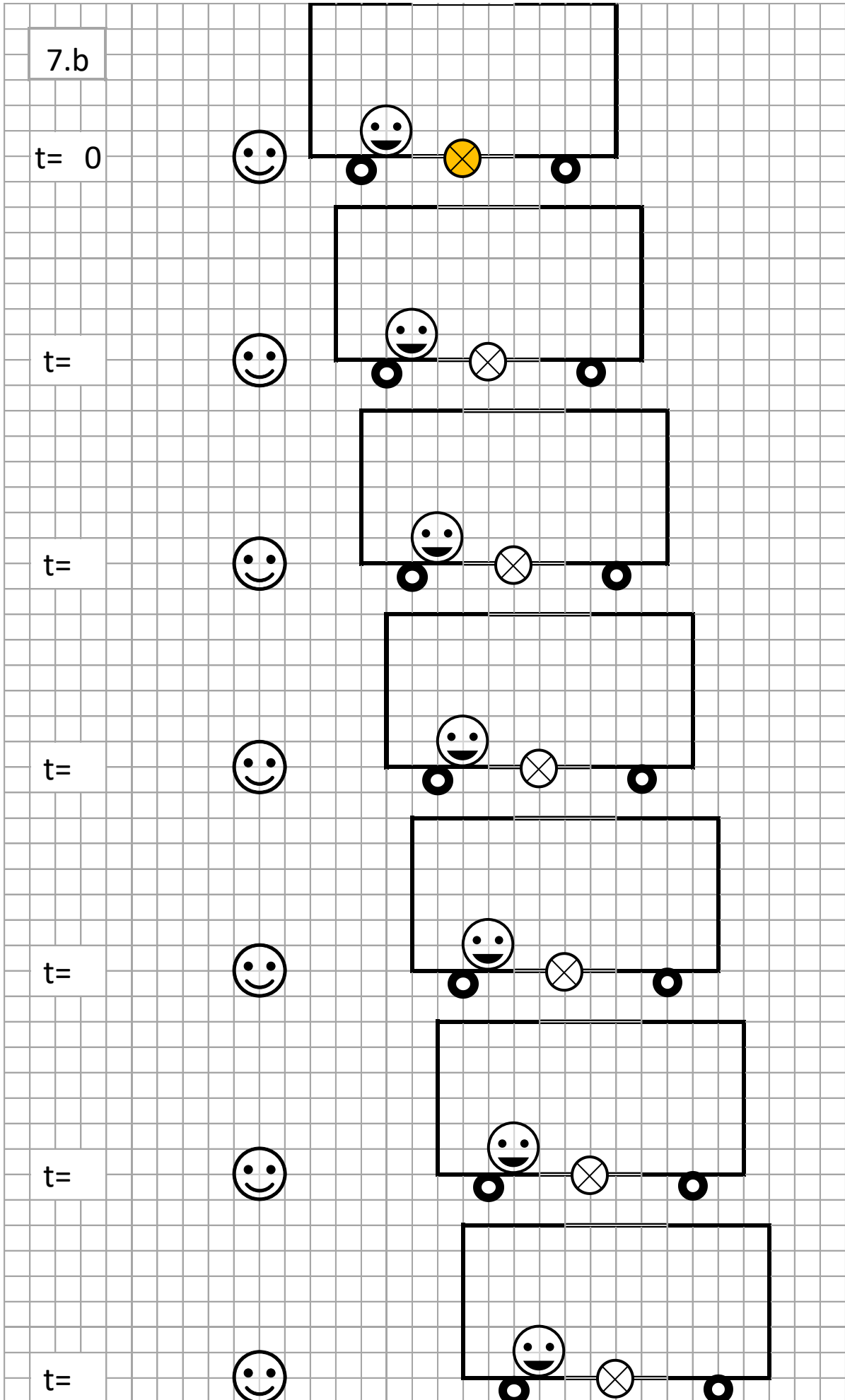
Opdracht 7.5: Samenvatting

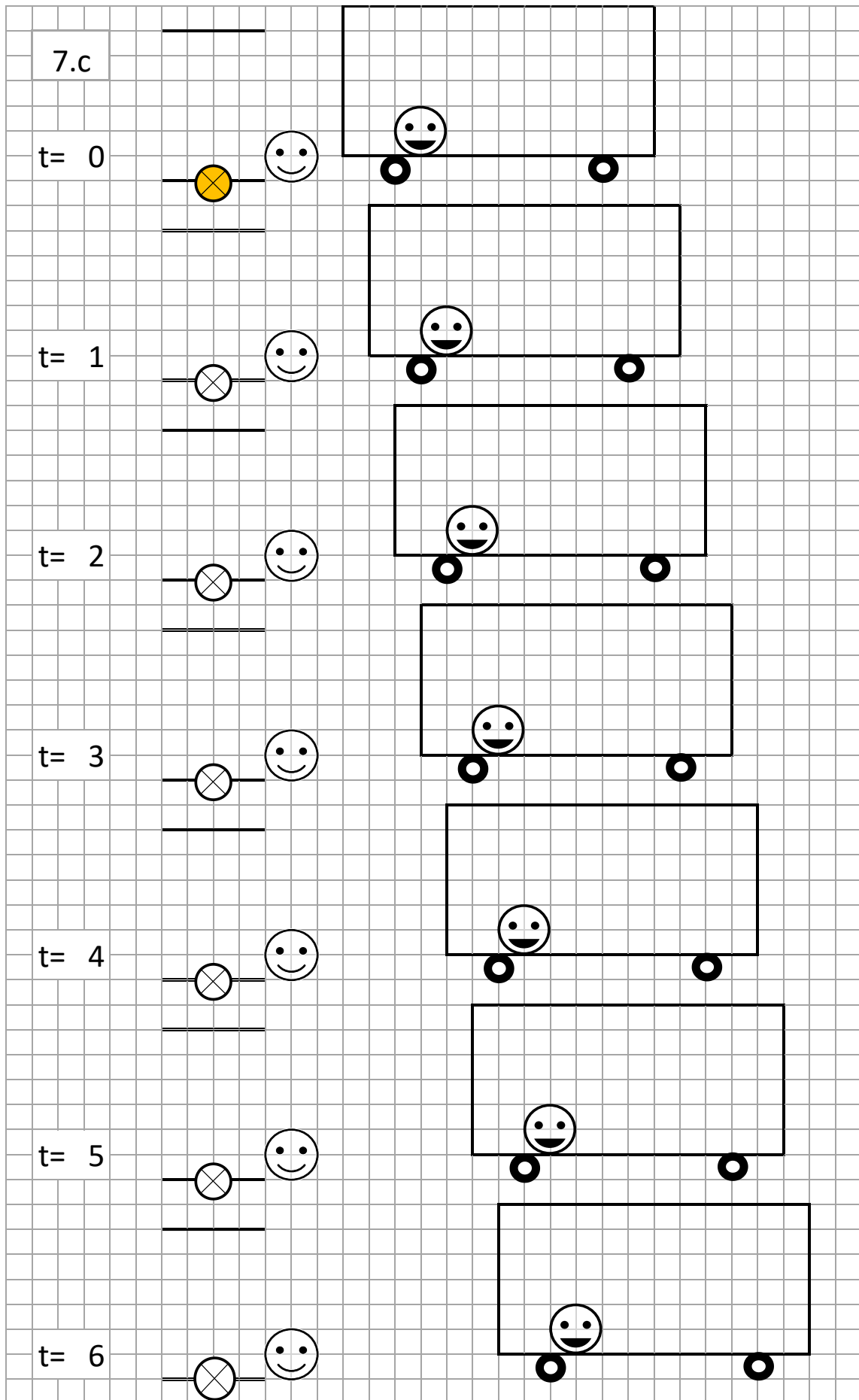
1. Wat hebben onderzoeker A in 7.a en 7.b en onderzoeker B in 7.c en 7.d met elkaar gemeen?
2. Wat hebben onderzoeker B in 7.a en 7.b en onderzoeker B in 7.c en 7.d met elkaar gemeen?
3. Hoe kunnen we in het algemeen de onderzoeker beschrijven die het kleinste tijdinterval meet?
4. Hoe kunnen we in het algemeen de onderzoeker beschrijven die een groter tijdinterval meet?
5. Hoe kun je voorspellen welke onderzoeker het kleinste tijdinterval zal meten?

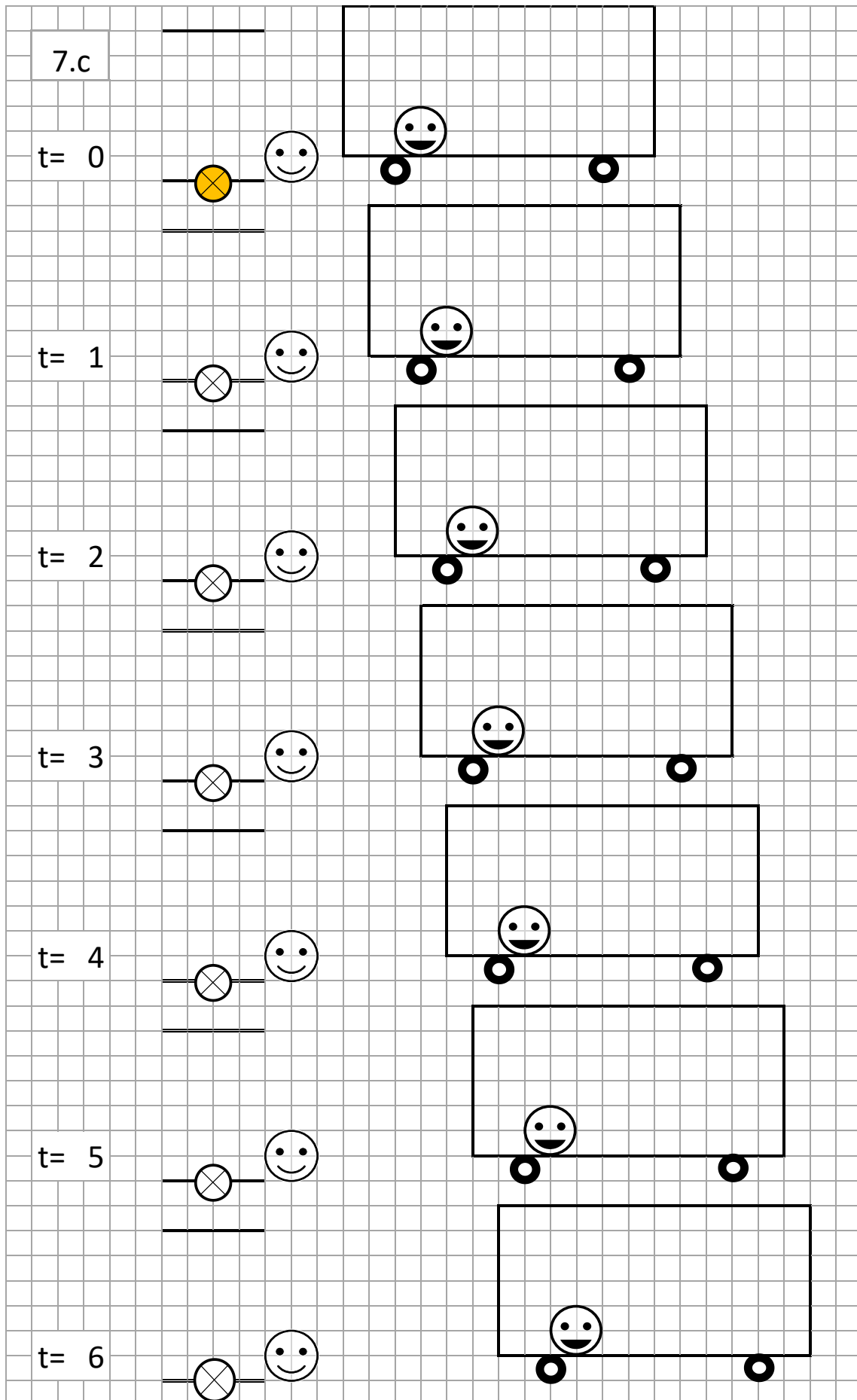
Opdracht 7.6: Beantwoorden lesvraag

1. Geef een antwoord op de lesvraag: Wat is er aan de hand met tijdsduur?



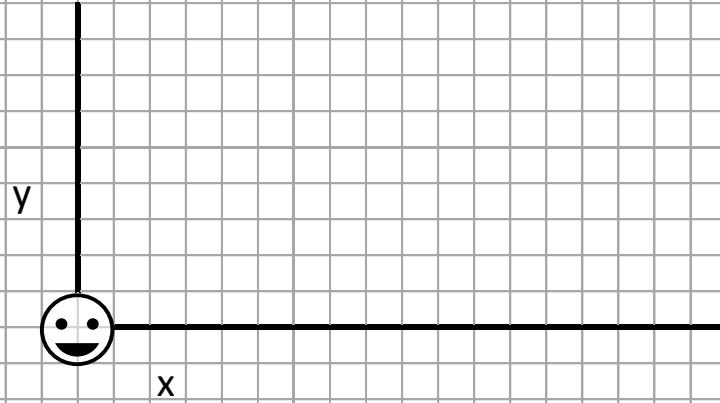




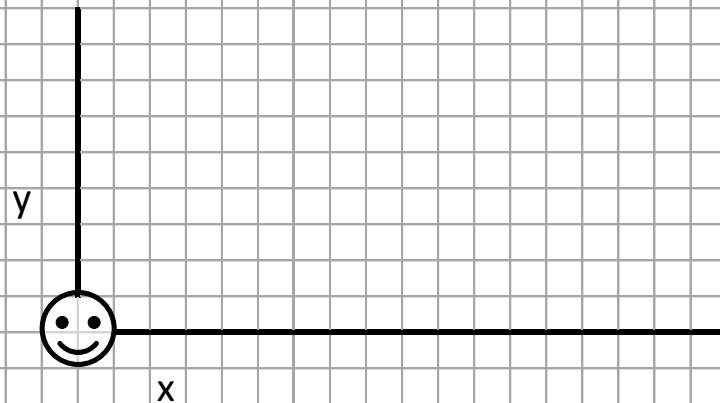


x,y-diagrammen

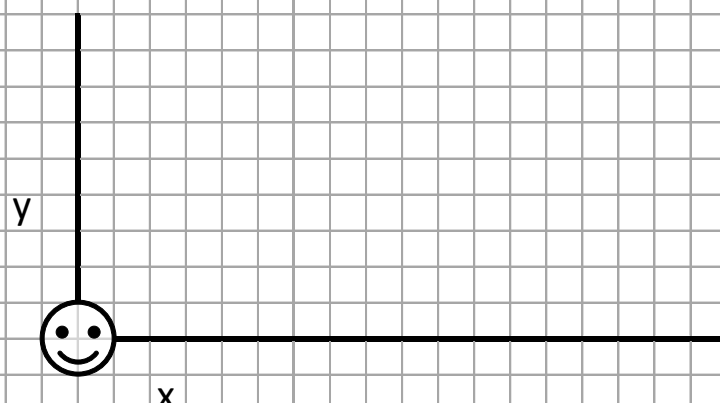
7.a



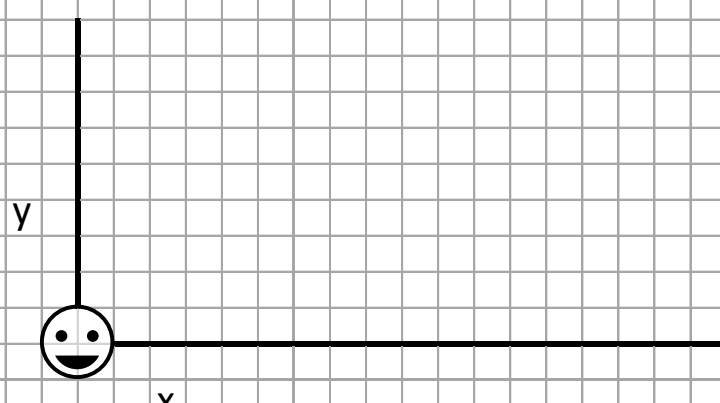
7.b



7.c



7.d





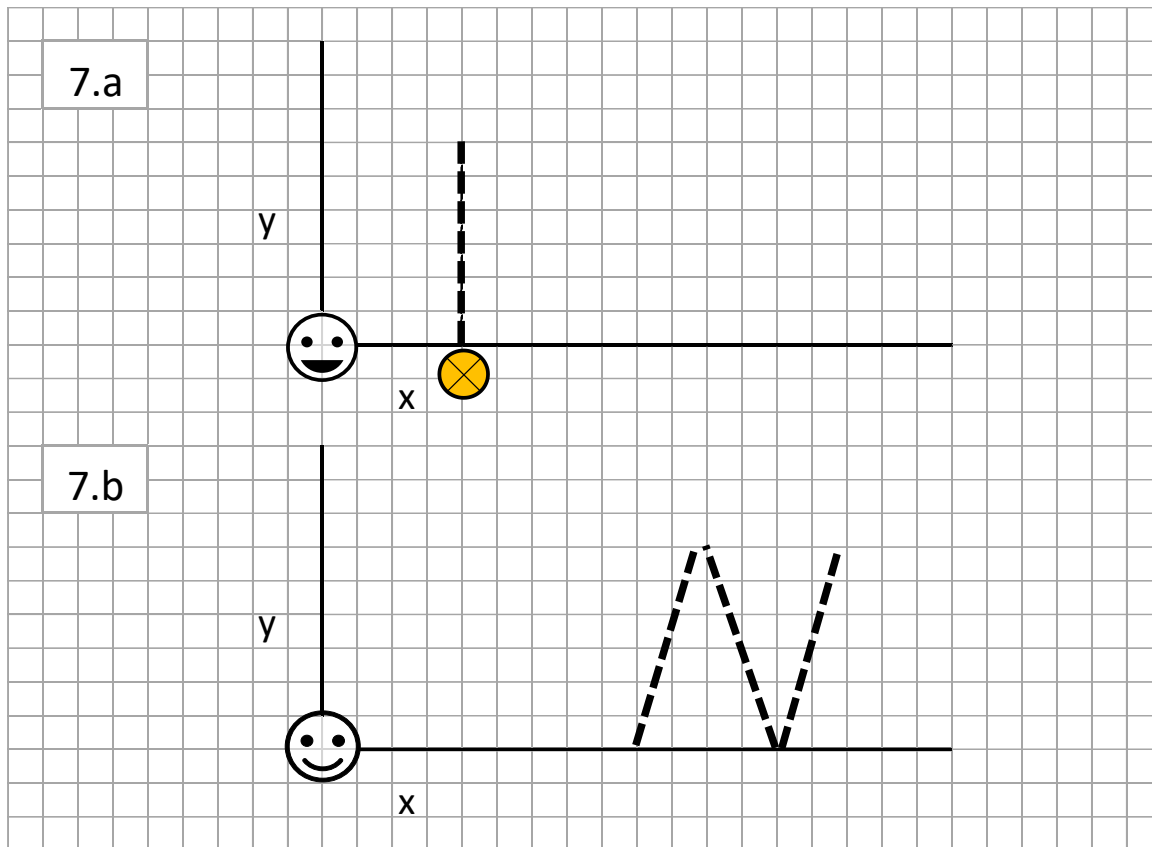
8. Met welke formule kunnen we de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 1 uitdrukken in de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 2?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Kunnen we het tijdsinterval tussen twee gebeurtenissen voor een onderzoeker die naar een bewegend proces kijkt, uitdrukken in het tijdsinterval tussen dezelfde twee gebeurtenissen voor een onderzoeker die naar dit proces kijkt terwijl het stilstaat?'. Aan het eind van deze les kan je de formule afleiden waarmee tijdsintervallen tussen twee gebeurtenissen ten opzichte van verschillende onderzoekers in elkaar omgerekend worden. Daarnaast weet je hoe je deze formule moet toepassen en kan je daar berekeningen mee doen.

Opdracht 8.1: Redeneeropdracht

In onderstaande figuur is het traject weergegeven dat het licht aflegt tussen de twee spiegels volgens onderzoeker A (7.a) en onderzoeker B (7.b).



Het licht heeft in deze diagrammen opnieuw een snelheid van 3 hokjes per tijdstapje.

1. Bereken de tijd die het licht volgens onderzoeker A nodig heeft om 1 keer op en neer te kaatsen.
2. Bereken de tijd die het licht volgens onderzoeker B nodig heeft om 1 keer op en neer te kaatsen.



Opdracht 8.2: Redeneeropdracht

Δt_e is het tijdsinterval tussen twee gebeurtenissen (G1 en G2) die ten opzichte van de onderzoeker dezelfde positie hebben.

Δt_b is het tijdsinterval tussen (dezelfde) twee gebeurtenissen die ten opzichte van de onderzoeker niet dezelfde positie hebben.

1. Vind een formule waarin je Δt_b uitdrukt in Δt_e , van de volgende vorm: $\Delta t_b = iets \cdot \Delta t_e$

Opdracht 8.3: Reflectieopdracht

1. Voldoet de gevonden formule aan deze voorwaarden?
2. Wat betekent dit voor de tijdsduur van een proces?

Opdracht 8.4: Verwerkingsopdracht

Geef bij onderstaande beschrijvingen steeds aan welke onderzoeker een tijdsinterval in het eigen stelsel van het proces bepaalt en welke onderzoeker naar een bewegend proces kijkt.

1. Hilde bestuurt in een ruimteschip. Charles houdt de wacht in een ruimtestation. Charles stuurt Hilde een lichtflits en een tijdje later nog een. Wat is de tijdsduur tussen het verzenden van de twee lichtflitsen?
2. In een supersnel ($0,3 \cdot c$) rijdende trein gooit Lisa een balletje op dat ze vervolgens weer opvangt. Klaas ziet dit vanaf het perron met lede ogen aan. Wat is het tijdsinterval tussen het opgooien en weer vangen van het balletje?
3. Een kosmisch muon wordt gevormd in de bovenste regionen van onze dampkring. Op het aardoppervlak wordt het muon vervolgens gedetecteerd. Wat is de tijdsduur tussen het ontstaan en het detecteren van het muon?

Opdracht 8.5: Verwerkingsopdracht

Deze opdracht gaat verder op de situaties beschreven in opdracht 8.2. In onderstaande opdrachten is steeds voor één onderzoeker gegeven welk tijdsinterval wordt gemeten. Bereken het tijdsinterval voor de andere onderzoeker.

1. Hilde ziet Charles met een snelheid van $0,59 \cdot c$ aan zich voorbij trekken. Hilde compenseert voor de tijd dat de lichtflitsen naar haar onderweg zijn en concludeert dat Charles de flitsen met een tussenpoos van 4,00 seconde moet hebben verzonden. Welke tijdsduur zal Charles meten?
2. Lisa zegt dat het balletje 1,3 seconde onderweg is. Wat zegt Klaas?
3. Kosmische muonen bewegen met een snelheid van $0,997 \cdot c$ door de dampkring. Normaal gesproken vervalt een muon na $2,10 \mu\text{s}$. Hoe lang zit er volgens een onderzoeker op aarde maximaal tussen het ontstaan van een muon en het detecteren daarvan?
4. Hoeveel meter dampkring kan het muon passeren in zijn eigen stelsel?
5. Hoe groot is de afstand die een muon volgens een onderzoeker op aarde aflegt?



Opdracht 8.6: Beantwoorden lesvraag

1. Geef een antwoord op de lesvraag: Met welke formule kunnen we de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 1 uitdrukken in de tijdsduur ten opzichte van onderzoeker 2?



9. Wat betekent dit allemaal voor metingen in de natuurkunde?

Doel

In deze les gaan we op zoek naar het antwoord op de lesvraag 'Kan je nog bepalen of je beweegt?'. Aan het eind van deze les kan je de vaardigheden die je in de afgelopen lessen hebt geleerd toepassen om na te denken over de lesvraag.

Opdracht 9.1: Beantwoorden lesvraag

1. Geef een antwoord op de lesvraag: Wat betekent dit allemaal voor metingen in de natuurkunde?