

Fysikk og idrett

Margrethe Renstrøm og Reidun Renstrøm

Fysikk og idrett

Innføring i biomekanikk

CAPPELEN DAMM AKADEMISK

© CAPPELEN DAMM AS, Oslo, 2021

ISBN 978-82-02-72530-3

1. utgave, 2. versjon, 2023

E-utgaven baserer seg på 1. trykte utgave, 2. opplag Cappelen Damm 2023

Elektronisk tilrettelegging: [Bøk Oslo AS](#)

Omslagsdesign: Roy Søbstad

Omslagsfoto: Getty Images

Sats/design: [Bøk Oslo AS](#)

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med forlaget er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.

Boka har fått støtte fra Lærebokutvalget.

Forfatterne har fått stipend fra Det Faglitterære Fond, NFFO.

www.cda.no

akademisk@cappelendamm.no

Cappelen Damm AS er sertifisert iht. FSC®, PEFC og Miljøfyrtårn.



Symbol for bærekraftig skogbruk



Forord

Bevegelser vi erfarer eller observerer i dagliglivet og på idrettsbanen, er ofte kompliserte. Likevel vet vi at når en stuper bøyer armer og bein og fører dem inntil kroppen, da øker rotasjonsfarten. Og når en fotballspiller scorer fra hjørnet, har han klart å gi ballen riktig rotasjon. Forklaringene på hvorfor rotasjonsfarten til stuperen øker når armer og bein trekkes inn mot kroppen, eller hvorfor en ball som roterer i lufta, følger en annen bane enn uten rotasjon, finner vi i fysikkens teorier. Vårt mål med denne boka er å formidle disse teoriene på en måte som gjør leseren i stand til å forklare disse og mange andre bevegelser.

Ut fra fysikkens definisjoner på fart og akselerasjon, og Isaac Newtons lover for sammenhengen mellom kraft og akselerasjon, er det mulig å utlede likninger som forklarer alle bevegelser. Fysikkens vei til å beskrive bevegelser går altså via å løse likninger. Noen størrelser i fysikken, for eksempel kraft og fart, har retning og er såkalte vektorer. Slike størrelser følger ikke de vanlige regnereglene. Uten å kunne løse likninger og reglene for å regne med vektorer er det ikke mulig å bruke fysikk til å beskrive bevegelser. I stedet for å tone ned fysikkens avhengighet av matematikk har vi valgt å legge vekt på å formidle og anvende den matematikken som er nødvendig, slik at det blir mulig å tilegne seg den som et viktig verktøy.

Vi vet at fotballspillere som underholder oss med finter, presise pasninger og scoringer fra hjørnet, har øvd i utallige timer for å oppnå disse ferdighetene, ofte godt hjulpet av kunnskapsrike trenere. Det er den treningsvillige studenten som leser teksten flere ganger, tar egne notater, prøver å løse oppgavene og tester sin forståelse i samtaler og diskusjoner, som vil lykkes i å anvende fysikkens teorier til å forstå bevegelser. Det er også denne studenten vi håper boka *Fysikk og idrett* kan være en god trener for.

Vi vil takke førsteamanuensis Ola Eriksrud ved NIH som har gitt verdifulle innspill underveis i prosjektet. Takk også til førsteamanuensis Nils-Erik Bomark for de mange diskusjonene vi har hatt om hvordan ulike idrettsøvelser kan forstås ut fra fysikkens teorier. Vi skylder redaktør Morten Yngvar Olsen i Cappelen Damm Akademisk en stor takk for et godt samarbeid og for å holde bokprosjektet i sikker fremdrift. Vi takker også NFFO for støtte til dette bokprosjektet.

Innhold

Forord	5
 Kapittel 1	
Vektorregning – et nødvendig verktøy i biomekanikk	12
1.1 Å dekomponere en vektor	14
Tyngdekraftens og andre krefters komponenter	15
1.2 Trigonometri	19
Sinus og cosinus til en vinkel	21
Tangens	28
Inverse verdier til sin, cos og tan	29
1.3 Hvordan summere vektorer?	29
 Kapittel 2	
Fart, akselerasjon og Newtons lover del 1	42
2.1 Fart	44
Gjennomsnittsfart og konstant fart	47
2.2 Krefter og konstant fart – Newtons 1. lov	47
Newtons 1. lov	49
2.3 Tyngdekraften	50
Tiltrekningskraften fra jorda	51
Friksjonskraft og normalkraft	53
Friksjon gir utfordringer	54
Newton 1. lov og noen hverdagserfaringer	57
2.4 Akselerasjon	57
Akselerasjon når farten avtar	59
Akselerasjon når farten endrer retning langs samme linje	61
Akselerasjonen når farten etter et kraftstøt ikke er langs samme linje som før støtet	64
2.5 Kraft og akselerasjon – Newtons 2. lov	66
2.6 Newtons 3. lov	72

2.7 Trykk	75
Trykksår på kroppen	76

Kapittel 3

Newtons lover del 2	80
3.1 Tyngdekraft og normalkraft	82
3.2 Vertikal sats	85
Vertikal sats uten svikt	86
Vertikal sats med svikt	89
Fallhopp	90
3.3 Newtons 2. lov på en annen form	93
Stup vs. mageplask	96
Utstyr designet for å øke tiden	97
Normalkraft og statisk friksjon i et løpesteg	99
3.4 Luftmotstand til glede og besvær	102
Luftmotstand til besvær	103
Luftmotstand til både besvær og glede	106

Kapittel 4

Kraftmoment og likevekt	114
4.1 Kraftmoment	116
En krafts moment om en akse	117
Pedalkraftmoment	122
4.2 Likevekt	123
4.3 Tyngdepunkt	138
4.4 Balanse og ubalanse	142
Støtteflate	142
Uten ubalanse, heller ingen bevegelse	146

Kapittel 5

Likninger som beskriver bevegelser	154
5.1 Bevegelser med konstant akselerasjon	156
Bevegelseslikninger for konstant akselerasjon	159
5.2 Horisontal og vertikal fart i fritt fall	164
Fosbury flop	173

Kapittel 6

Rotasjon, tregghetsmoment og spinn	178
6.1 Vinkelforflytning	180

6.2 Vinkelfart og fart	182
Vinkelfartens retning	184
Sammenhengen mellom vinkelfart og fart	186
Hvorfor har sykler gir?	191
6.3 Vinkelakselerasjon og akselerasjon	192
Sammenhengen mellom vinkelakselerasjon og akselerasjon	193
6.4 Treghetsmoment og Newtons 2. lov for rotasjon	194
Treghetsmoment om en akse	195
Parallellakse-teoremet	196
6.5 Spinn og Newtons 1. lov for rotasjon	204
Spinn	205
6.6 Rotasjoner i fritt fall har konstant spinn	211
Delspinn	213

Kapittel 7

Arbeid og energi	222
7.1 Arbeid og kinetisk energi	224
Friksjonskraftens arbeid	227
Tyngdekraftens arbeid	228
Loven om arbeid og kinetisk energi (arbeid-energiloven)	228
Arbeid og potensiell energi	237
Effekt	238
7.2 Elastisk fjærkraft og arbeid	239
Fjærkraft og Hookes lov	240
Hvordan måle fjærkonstanten	242
Strain	243
Parallellkoblede fjærer	245
Fjærkraftens arbeid	246
Elastisk potensiell energi	247
Trampolinehopping	247
Katapulteffekten	251
7.3 Elastisk strikk	252
7.4 Elastiske sener og muskelkraft	256
Akillessenens fjærkonstant	258
Musklers kraft og fart	260
Samspillet mellom musklene og akillessen i løpesteg	261
Samspillet mellom musklene og akillessen i vrsthopp	263

Kapittel 8

Sentripetalkraft	268
8.1 Sentripetalakselerasjon	271
Akselerasjonen inn mot sirkelens sentrum – sentripetalakselerasjonen	272
8.2 Sentripetalkraft	274
Vertikale sirkelbaner	276
Horisontale sirkelbaner	281
Doserte svinger	287

Kapittel 9

Trykk i luft og vann	292
9.1 Massetetthet	294
9.2 Egenskaper til stoffer i gass-, væske- og fast form	297
9.3 Atmosfærens tetthet og trykk	298
Tetthet	298
Trykk	298
9.4 Hvorfor fly flyter og baller skrur	301
Sidespinn: «Bend it like Beckham»	306
9.4 Trykk i vann og oppdrift	308
Oppdrift	310

Stikkordregister	317
-------------------------------	-----

Fasit	320
--------------------	-----



KAPITTEL 1

Vektorregning – et nødvendig verktøy i biomekanikk



Når vi sitter på en sykkel utfor en bakke, øker farten nedover. Jo brattere bakken er, desto større er fartsøkningen. Det er ikke mulig å endre fart i en retning uten å bli påvirket av en kraft i samme retning. Syklisten blir altså påvirket av en kraft som har retning nedover langs bakken. Det er *tyngdekraften* som er årsaken til at farten øker i utforbakker. Men tyngdekraften har retning vertikalt nedover. Hvordan kan en kraft som har retning vertikalt nedover, være årsaken til at farten øker langs utforbakken?

Tyngdekraften er en fysisk størrelse som både har verdi og retning – den er en såkalt *vektor*. Andre eksempler på fysiske størrelser som er vektorer, er fart og akselerasjon. Det betyr at vi må kjenne både verdien og retningen til kraften på et legeme for å kunne beregne konsekvensene av den. Det er for eksempel ikke bare utgangsfartens verdi som har betydning for hvor langt ei kule beveger seg før den lander, men også fartens retning. Når en tennisball treffer nettet, skyldes det oftest ikke at kraften den fikk fra racketen, var for liten, men at retningen til kraften var feil.

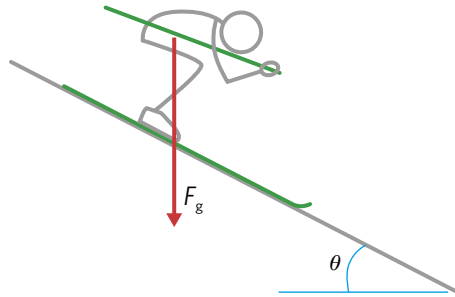
For å beregne hvor stor del av tyngdekraften som virker nedover bakken på syklisten, må vi beregne *komponenten* av kraften langs bakken. Å bestemme komponenten av en vektor i en bestemt retning, kalles å dekomponere den. Det er ikke mulig å bruke fysikkens teorier til å beskrive bevegelser uten å kunne dekomponere vektorer, beregne verdien til komponenten og summere vektorer. Vi har derfor valgt å dedisere hele det første kapittelet i denne boka til å presentere og anvende reglene for regning med vektorer i en rekke eksempler.

1.1 Å dekomponere en vektor

Retningen til en vektor blir symbolisert med ei pil der pilspissen peker i samme retning som vektoren. Tyngdekraften kan derfor symboliseres med ei pil som peker vertikalt nedover. Tyngdekraften på utforkjøderen i den bratte utforbakken i figur 1.1 a) blir i b) vist med ei rød pil som peker vertikalt nedover. Siden virkningen av tyngdekraften på et legeme er som om den angrep i dets tyngdepunkt, tegner vi kraftpilen fra et punkt omtrent midt i skiløperen i figur 1.1 b). Symbolet for tyngdekraften er her F_g , der F står for *force* og g for gravitasjon, som er et annet ord for tyngdekraft.



a)



b)

Figur 1.1 I a) ser vi en utforkjører øke farten nedover en bratt bakke. Hans tyngdekraft har retning vertikalt nedover, slik som vist i b). Vinkelen θ mellom horisontal retning og bakkens retning er helningsvinkelen.

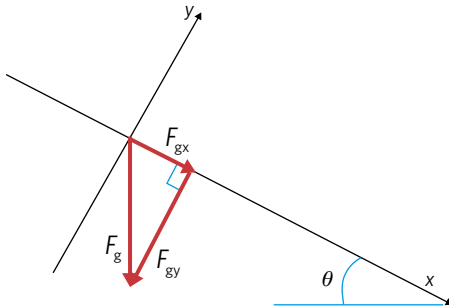
Vinkelen mellom bakken og horisontal retning har vi gitt symbolet θ (gresk bokstav theta) i figuren. Det er vanlig å bruke greske bokstaver for vinkler. Siden vinkelen mellom bakkens retning og horisontal retning kalles bakkens *helningsvinkel*, er altså θ denne bakkens helningsvinkel.

Selv om utforkjørerens tyngdekraft peker vertikalt nedover, er det den kraften som er årsaken til at farten øker nedover. Det er fordi tyngdekraften har en *komponent* langs bakken. Dersom verdien til tyngdekraften er kjent og vinkelen θ er oppgitt, kan vi beregne verdien til komponenten langs bakken.

Men før vi utfører beregninger, vil vi vise hvordan vi teknisk dekomponerer tyngdekraften langs og vinkelrett på bakken.

Tyngdekraftens og andre krefters komponenter

Vi merker oss at tyngdekraften på utforkjøreren i figur 1.1 har en annen retning enn den retningen han beveger seg i. For å kunne avgjøre tyngdekraftens betydning for farten langs bakken, må vi bestemme tyngdekraftens komponent i den retningen. Metoden vi bruker for å bestemme denne komponenten, er illustrert i figur 1.2.



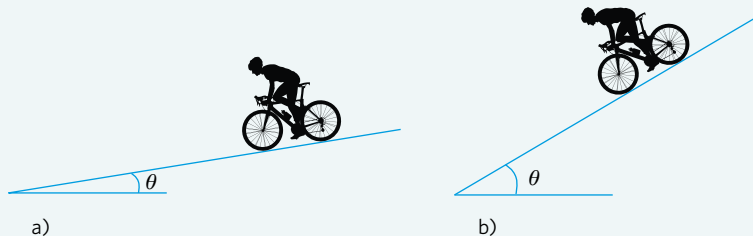
Figur 1.2 Utforbakken er i dette diagrammet erstattet av en x -akse. y -aksen har retning vinkelrett på bakken. Tyngdekraften F_g har retning vertikalt nedover. F_{gx} er tyngdekraftens komponent langs bakken og F_{gy} er tyngdekraftens komponent vinkelrett på bakken.

I figur 1.2 er tyngdekraften F_g tegnet ut fra origo i et koordinatsystem der x -aksen har samme retning som bakken og y -aksen står vinkelrett på bakken. For å bestemme hvor stor komponent tyngdekraften har i x - og y -retning, lar vi pila F_g være hypotenusen i en rettvinklet trekant der den ene kateten er langs x -aksen og den andre er langs y -aksen. Kateten langs x -aksen har symbolet F_{gx} , og kateten langs y -aksen har symbolet F_{gy} .

Oppgave 1.1

Syklistene i de to figurene 1.3 a) og b) sitter i ro og ruller med økende fart nedover bakken.

- Tegn tyngdekraften og dens komponenter langs og vinkelrett på bakken.
- Hva er den iøynefallende forskjellen mellom tyngdekraftens komponent langs bakken i de to tilfellene, og hva skyldes denne forskjellen?



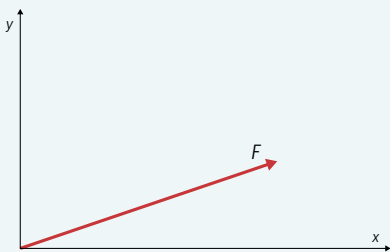
Figur 1.3 a og b.

Oppgave 1.2

Figur 1.4 a) viser en sprinter som skyver foten bakover på startblokka ved å rette ut ankel-, kne- og hoftelddet. Kraften blokka påvirker foten med fremover, er like stor, og er i figuren gitt symbolet F . Det er denne kraften som er årsaken til at han oppnår fart horisontalt, langs banen. I figur 1.4 b) er kraften tegnet i et koordinatsystem der x -aksen har horisontal retning og y -aksen har vertikal retning. Tegn kraften F sin komponent i x - og y -retning, F_x og F_y .



a)

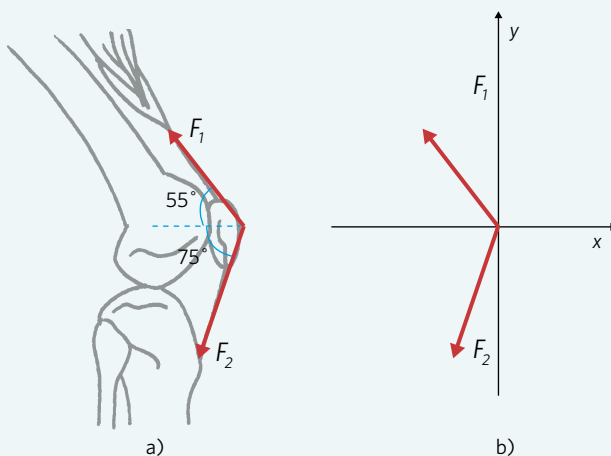


b)

Figur 1.4 a og b.

Oppgave 1.3

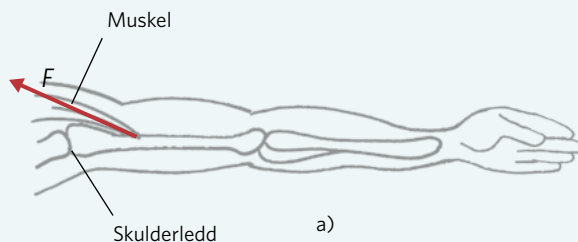
Figur 1.5 a) viser en strukket quadriceps-sene som er koblet til muskelgruppen quadriceps og skinnebenet når kneleddet er bøyd. Senen påvirker kne-skåla med en kraft F skrått oppover og en kraft skrått nedover, henholdsvis F_1 og F_2 i figur 1.5 b). I figuren er de to kreftene tegnet i et koordinatsystem der x -aksen har horisontal retning og y -aksen har vertikal retning. Tegn de to kreftenes komponenter i x - og y -retning.

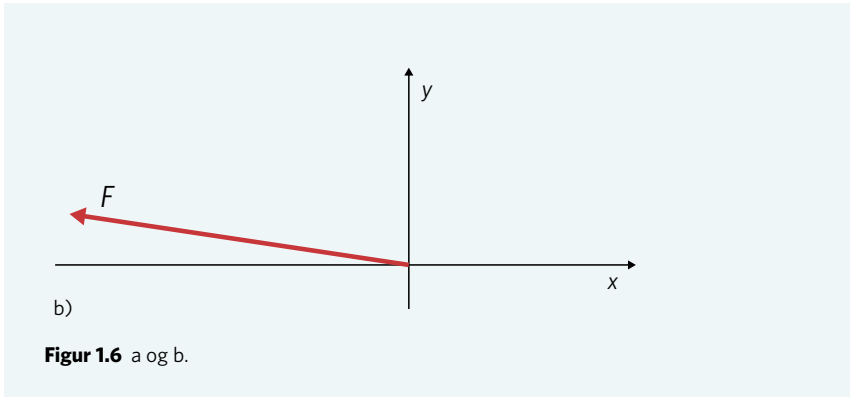


Figur 1.5 a og b.

Oppgave 1.4

Kraften F fra deltamuskelen på overarmsknokkelen er avgjørende for at armen kan holdes horisontalt, slik figur 1.6 a) viser. Kraften er tegnet i et koordinatsystem, slik figur 1.6 b) viser, der x -aksen har horisontal retning og y -aksen har vertikal retning. Tegn inn kraftens horisontale og vertikale komponent.



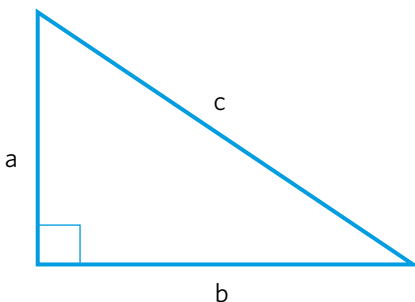


QR-koden gir tilgang til en video som viser hvordan oppgavene 1.1–1.4 løses.



1.2 Trigonometri

Vi har nå vist hvordan vi bestemmer komponenter til krefter i andre retninger enn den retningen de har. Verdien til tyngdekraftens komponent langs en utforbakke er bestemt av bakkens helningsvinkel. Jo større helningsvinkelen er, desto større er kraftens komponent langs bakken og desto mindre er kraftens komponent vinkelrett på bakken. Det stemmer overens med våre erfaringer. Det gjenstår nå å vise hvordan vi kan beregne verdien til kreftenes komponenter. Matematikken vi anvender, kalles *trigonometri*, som handler om å beregne ukjente sider eller vinkler i en rettvinklet trekant. I den rettvinklede trekanten i figur 1.7 har den ene kateten lengde a og den andre har lengde b . Trekantens hypotenus har lengde c .



Figur 1.7 Trekanten er rettvinklet fordi vinkelen mellom de to katetene er 90° .

Pytagoras' setning gir at sammenhengen mellom disse lengdene er:

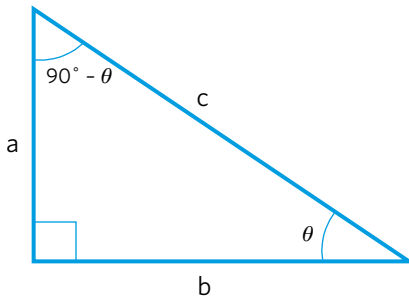
$$c^2 = a^2 + b^2$$

Dersom $a = 3$ m, $b = 4$ m er lengden til hypotenusen:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(3 \text{ m})^2 + (4 \text{ m})^2} = 5 \text{ m}$$

Vi kan altså beregne lengdene til sidene i en rettvinklet trekant uten at vinklene er kjent. Men, dersom alle vinklene er oppgitt, kan vi beregne lengden til to ukjente sider i trekanten. Vinklene til trekanten i figur 1.8 er 90° , θ og $90^\circ - \theta$. For alle trekanter som har disse vinklene er forholdene $\frac{a}{c}$, $\frac{b}{c}$ og $\frac{a}{b}$ de samme. Når vinklene i en rettvinklet trekant er oppgitt, kjenner vi altså disse forholdene.

Katetene i trekanten omtales som motstående eller hosliggende i forhold til en vinkel. For eksempel er kateten a motstående til vinkelen θ , mens kateten b er hosliggende til samme vinkel.



Figur 1.8 Trekanten er rettvinklet, og vinklene er θ , $90^\circ - \theta$ og 90° .