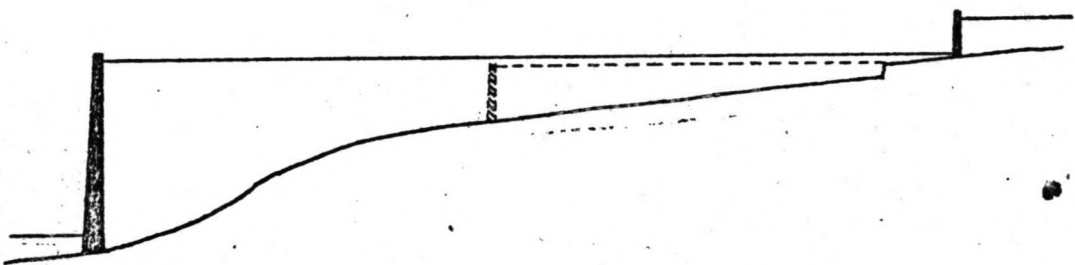


ONTWERP VAN EEN STUW IN DE NARMADA



VAKGROEP
WATERBOUWKUNDE
Afd. Civiele Techniek
TH Delft

DEELSTUDIE RISICO-ANALYSE



P. Meijers

Afstudeerverslag T.H. Delft,
afdeling der civiele techniek,
vakgroep waterbouwkunde.
Begeleider: ir. J.K. Vrijling

Voorwoord.

Dit verslag bevat de presentatie van een deelstudie die in het kader van mijn afstudeerwerk aan de T.H. Delft is uitgevoerd.

Deze deelstudie is een vervolg op de tijdens dit afstuderen uitgevoerde hoofdstudie waarin een ontwerp voor een stuw bij Harinphal (in India) gemaakt is. Deze stuw dient om over een gedeelte van de rivier de Narmada scheepvaart mogelijk te maken. In deze deelstudie wordt van dit riviergedeelte een risico-analyse gepresenteerd waarbij de topgebeurtenis is: "geen scheepvaart mogelijk".

In het eerste hoofdstuk wordt van de rivier en de bouw van de stuw de voor deze deelstudie relevante informatie verstrekt. Dit is uitgebreider en meer gemotiveerd in het verslag van de hoofdstudie te vinden.

Het tweede hoofdstuk bevat de eigenlijke risico-analyse. Hierin wordt nagegaan hoe de ongewenste topgebeurtenis kan optreden. Vanwege de overzichtelijkheid is de foutenboom in zijn geheel in een aparte paragraaf opgenomen.

In het derde hoofdstuk wordt globaal aangegeven hoe, uitgaande van de voorgaande analyse, de kansdichtheidsfunctie van het aantal dagen per jaar dat er geen scheepvaart mogelijk is bepaald kan worden.

In het vierde hoofdstuk worden enige maatregelen genoemd waardoor men de kans op falen kan verkleinen. Er wordt geen uitspraak gedaan over de vraag of het nemen van deze maatregelen economisch verantwoord is.

Delft, januari 1984

P. Meijers

Inhoudsopgave.

I	Inleiding	blz.	3
	I.1 Functie van de stuw	"	3
	I.2 Bouwwijze van de stuw bij Harinphal	"	5
II	Risico-analyse	"	8
	II.1 Algemeen	"	8
	II.2 Golfhoogte, stroomsnelheid en onderdoorvaart bruggen	"	11
	II.3 Waterstand te laag	"	14
	II.4 Vaarweg geblokkeerd	"	19
	II.5 De foutenboom	"	24
III	Bepaling totale kansdichtheidsfunctie	"	63
IV	Maatregelen ter verkleining van de faalkans	"	67
	Lijst van gebruikte symbolen	"	70

Bijlagen:

- Bijlage 1 : Afvoer bij Mortakka
- Bijlage 2 : Lengteprofiel Narmada tussen Sardar Sarovar en Maheshwar
- Bijlage 3 : Ligging Narmada tussen Sardar Sarovar en Maheshwar
- Bijlage 4 : Tekeningen stuw
- Bijlage 5 : Betekenis gebruikte symbolen foutenboom

I INLEIDING

I.1 FUNCTIE VAN DE STUW

In het midden van India, in de deelstaat Madhya Pradesh, ligt een kolenveld dat men tot ontwikkeling wil brengen. De geplande productie is $20 \cdot 10^6$ ton steenkool per jaar, eventueel uit te breiden tot $30 \cdot 10^6$ ton, en wel vanaf 1990 à 1995. Met deze steenkool wil men in de deelstaat Gujarat, aan de westkust van India, electriciteit opwekken.

Dit betekent dat de steenkool vervoerd moet worden. Een van de mogelijkheden die hiervoor overwogen wordt is vervoer per schip waarbij gedeeltelijk van de Narmada, een westwaarts stromende rivier, gebruik gemaakt kan worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van 4-baks duwconvoeien. De afmetingen van een bak zijn: 11,5 m. breed, 75 m. lang en geladen steken ze 3 m. diep. De afmetingen van een duwboot zijn: 22 m. lang, 11 m. breed, een diepgang van 2,70 m. en een hoogte boven de waterlijn van maximaal 7 m.

De Narmada is een typische regenrivier. In het natte seizoen, dat loopt van ongeveer 1 juli tot 1 november, zijn afvoergolven mogelijk van vele tienduizenden kubieke meters per seconde terwijl in het droge seizoen de afvoer tot ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{s}$ kan teruglopen. De piekafvoeren worden veroorzaakt door depressies die over het stroomgebied trekken. De reden dat de pieken zo hoog zijn is een combinatie van de volgende factoren:

- de depressies trekken van oost naar west over het stroomgebied dus in dezelfde richting als de rivier stroomt.
- de snelheid waarmee een depressie over het stroomgebied trekt ligt in dezelfde orde van grootte als die waarmee de afvoergolf door de rivier loopt.
- het stroomgebied is langgerekt, de zijrivieren zijn kort en brengen het regenwater dus vrij kort na de neerslag tot afvoer.
- de ondergrond bestaat uit vast gesteente, er is dus weinig berging van neerslag in de ondergrond.

Voor een indruk van het afvoerverloop wordt naar bijlage 1 verwezen. In zijn natuurlijke staat is de rivier onbevaarbaar door de lage waterstanden in het droge seizoen, de hoge stroomsnelheden in het natte seizoen en de aanwezigheid van watervallen en stroomversnellingen.

Op het moment bestaan er plannen, die gedeeltelijk ook al in uitvoering zijn, om in de rivier een groot aantal dammen te bouwen ten behoeve van irrigatie, waterkracht en hoogwaterbestrijding. Als deze plannen uitgevoerd zijn is er over grote delen van de rivier scheepvaart mogelijk. Met enige aanvullende werken kan dan de hele rivier bevaarbaar gemaakt worden.

Een van deze maatregelen betreft het bevaarbaar maken van het gedeelte Sardar Sarovar - Maheswhar. Van dit gedeelte zijn het lengteprofiel en de ligging in respectievelijk de bijlagen 2 en 3 gegeven.

Van dit riviertraject is het eerste gedeelte het gehele jaar bevaarbaar. Om het tweede gedeelte ook het hele jaar bevaarbaar te laten zijn is gekozen voor de bouw van een stuw bij Harinphal met een stuwpeil van 135⁺. Hiermee is tot aan Sahashra Dhara scheepvaart mogelijk. Om het gedeelte Sahashra Dhara - Maheshwar ook bevaarbaar te maken is gekozen voor de bouw van een extra stuw bij Sahashra Dhara of het verplaatsen van de dam bij Maheshwar naar deze plaats.

Door de bouw van de stuwdammen zal het regime van de rivier veranderen. Er bestaat nu de mogelijkheid om door topvervlakking de grootte van de piekafvoer te verminderen.

Verder zal een deel van de hoogwatergolven nu gebruikt worden om de reservoirs bovenstrooms te vullen. Hierdoor zal, met name in het begin van het natte seizoen, er bij Harinphal slechts sprake zijn van geringe hoogwatergolven.

De geplande minimumafvoer na voltooiing van het gehele project is 300 à 600 m³/s.

I.2 BOUWWIJZE VAN DE STUW BIJ HARINPHAL

De stuw bij Harinphal is ontworpen om een debiet van $80.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te kunnen laten passeren en bestaat uit vier delen. In het midden ligt een dubbele schutsluis t.b.v. de scheepvaart. Aan weerszijden van de sluis liggen in totaal twaalf beweegbare stuwopeningen om hoogwatergolven de gelegenheid te geven de stuw te passeren. Daarnaast bevindt zich aan beide zijden een vaste overlaat waarover ook een gedeelte van de afvoer kan afstromen zodat er met minder beweegbare schuiven volstaan kan worden. Als afsluiting van het gehele complex zijn daarnaast nog landhoofden nodig. Over het gehele stuwcomplex loopt een brug. Deze dient om de verschillende delen van de stuw bereikbaar te maken voor bedienend personeel en onderhoud en voor lokaal gebruik.

De beweegbare stuw bestaat uit twaalf hefschuiven met een hoogte van 21 m. en een breedte (dagmaat) van 40,3 m. Deze hefschuiven zijn uitgevoerd als glijschuiven waarbij de glijstrip van een PTFE glijlaag (met een wrijvingscoëfficiënt van $f = 0,04$) is voorzien.

Om de kracht die het bewegingswerk moet kunnen uitoefenen te beperken is deze van contragewichten voorzien. Het gewicht van de deur boven water is: $G = 6448 \text{ kN}$. en onder water: $G' = 5642 \text{ kN}$. Het gewicht van de contragewichten is: $G_c = 7254 \text{ kN}$. De kracht die het bewegingswerk moet kunnen uitoefenen is: $F_B = 1612 \text{ kN}$.

Voor de afmetingen van de pijler wordt naar bijlage 4 verwezen. De pijler is, om de kern te vergroten, aan de onderzijde voorzien van 4 m. brede en 2,5 m. dikke vleugels.

Tussen de pijlers bevindt zich een 1 m. dikke betonnen drempel die d.m.v. ankers aan de ondergrond is verankerd om oplichten ervan bij een onvolkomen afvoer situatie te voorkomen. Tussen deze drempel en de pijler (vleugels) bevindt zich een dwarskrachtverbinding bestaande uit nokken die het wel mogelijk maken dat de drempel en pijler in verticale richting onafhankelijk van elkaar kunnen bewegen maar niet in horizontale richting. Door deze nokken levert de drempel een bijdrage aan de weerstand tegen het afglijden van de pijler.

De pijler zelf staat op een drempel van stortsteen (gebroken basalt). Deze drempel is waterdicht gemaakt door een waterdichte bekleding op de bovenstroomse zijde ervan die in de ondergrond wordt doorgezet

tot de vaste rotsgrond.

Aan de benedenstroomse zijde is de bekleding paraboolvormig t.b.v. de stroomgeleiding bij een volkomen afvoer situatie. Deze kan met name tijdens het heffen van de schuiven optreden.

Benedenstrooms van de stuw ligt een woelbak bestaande uit een horizontale plaat. Door een beheerst hefprogramma is het mogelijk om de schuiven in 24 uur te heffen (de tijd die hiervoor naar verwachting beschikbaar is) zonder dat de watersprong van de woelbak afloopt. Dit houdt wel in dat de schuiven geleidelijk geheven moeten worden.

Schiet om de een of andere reden de watersprong van de woelbak dan kan aan het einde ervan een erosiekuil ontstaan. Dit kan tot gevolg hebben dat een deel van de woelbak afbreekt waardoor een proces van terugschrijdende erosie in gang wordt gezet.

In de pijler zijn nissen opgenomen voor het plaatsen van een noodkering (schotbalken). De plaats van deze noodkering is zodanig dat de balken vanaf de brug geplaatst kunnen worden maar ook, indien dat om de een of andere reden niet mogelijk is, m.b.v. een drijvende bok.

Voor het plaatsen van de noodkering is gekozen voor gebruik van mobiele kranen. De plaatsingsprocedure is dat de schotbalken één voor één op een speciaal geconstrueerde wagen aangevoerd worden naar de af te sluiten opening. Daar wordt de balk door twee mobiele kranen, aan elke zijde één, opgetild en in de nis van de noodkering neefgelaten. Bij het verwijderen van de noodkering geschiedt het bovenomschreven proces in omgekeerde volgorde.

Voor het onder water aan- en afkoppelen van de schotbalken is een speciaal koppelingsstuk nodig.

De schotbalken wegen per stuk 80 ton.

Tussen de pijler, betonnen drempel en bovenstroomse bekleding van de drempel bevindt zich een voegstrip die ervoor moet zorgen dat deze delen waterdicht met elkaar verbonden zijn.

Een gedeelte van het jaar zal de waterstand in het stuwmeer hoger zijn dan het stuwpeil van de stuw bij Harinphal. In deze situatie is de stuw niet nodig en kan de scheepvaart door twee hiervoor aangepaste stuwopeningen de stuw passeren.

Tussen het stuwpeil en de maximum waterstand in het stuwmeer is enige ruimte aanwezig. Hierdoor kunnen kleine afvoergolven (tot $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$) zonder schade te veroorzaken de gesloten stuw passeren.

Voor grotere afvoergolven moet de stuw geopend worden. Er is een waarschuwingssysteem opgezet waardoor er naar verwachting 24 uur beschikbaar is voor het openen van de stuw.

Als na de passage van de hoogwatergolf de waterstand in het stuwmeer lager dan het stuwpeil zou zijn moet de stuw, om daarna scheepvaart mogelijk te laten zijn, op een zodanig moment gesloten worden dat de staart van de hoogwatergolf voldoende is om in ieder geval het gedeelte achter Harinphal tot het stuwpeil te vullen.

Doordat de instroming in het stuwmeer bovenstrooms van Harinphal plaatsvindt (nl. bij Maheshwar) en de onttrekking benedenstrooms (nl. bij Sardar Sarovar) zal de waterstand bovenstrooms van de stuw nooit lager zijn dan die benedenstrooms ervan.

De overlaat is in totaal ongeveer 1050 m. lang en bestaat uit een 3 m. hoge betonnen muur op een dam van stortsteen. De muur heeft de vorm van een omgekeerde T, de ontwerphoogte van de kruin is 137,1⁺. De muur dient tevens als funderingsplaat voor de brugpijlers die de brug, die over de overlaat loopt, ondersteunen.

De bovenstroomse zijde van de dam is van een waterdichte bekleding voorzien. De benedenstroomse zijde van de dam is van een stroombestendige bekleding voorzien opdat het water dat langs dit talud afstroomt geen stenen meeneemt.

Aan de voet van de dam ligt, aan de benedenstroomse zijde, een soort verzamelgeul die het over de overlaat afstromende water naar de rivier voert zonder dat er ontgrondingen optreden.

In bijlage 4 is een dwarsdoorsnede over de kruin van de overlaat getekend.

De landhoofden dienen ter afsluiting van het complex. Ze zijn elk ongeveer 100 m. lang en opgebouwd uit stortsteen.

II RISICO-ANALYSE

II.1 ALGEMEEN

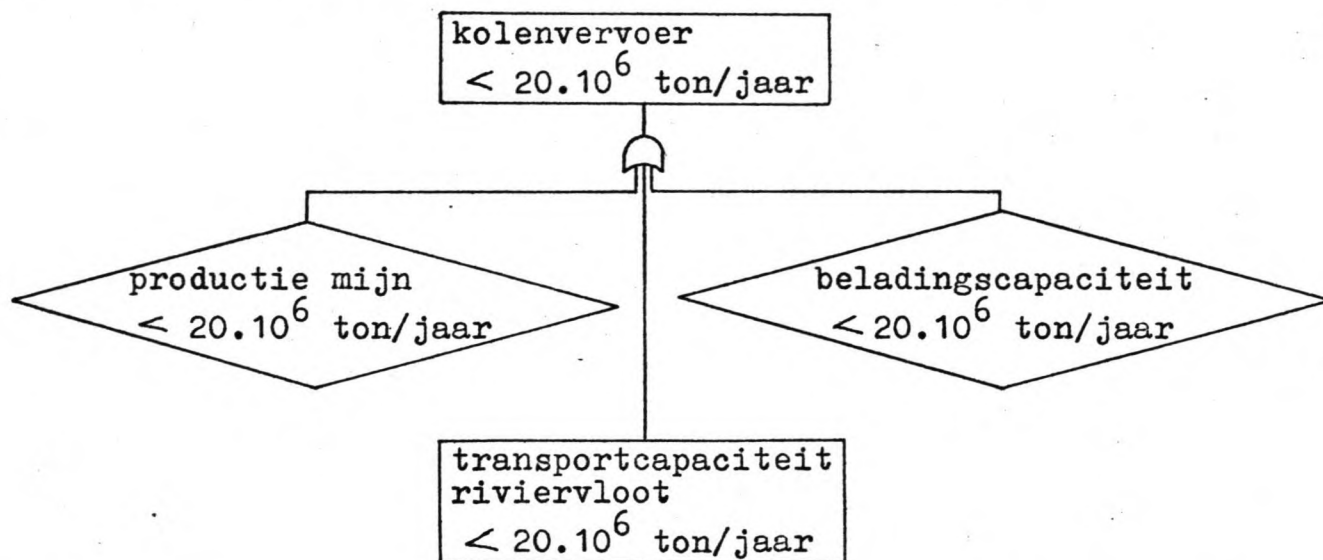
Voordat met de risico-analyse begonnen kan worden moet eerst de meest ongewenste gebeurtenis (de "topgebeurtenis") bepaald worden. In het vorige hoofdstuk is al vermeld dat de rivier bevaarbaar gemaakt moet worden om $20 \cdot 10^6$ ton steenkool per jaar te kunnen vervoeren. Indien het niet lukt om deze hoeveelheid steenkool te vervoeren is de consequentie dat de elektrische centrales in Gujarat stil komen te liggen (met alle gevolgen voor de industrie vandien) of dat de steenkool op een andere manier (vrachtwagens, trein) vervoerd moet worden (maar deze alternatieve aanvoerwegen zijn niet berekend op een vergroting van de hoeveelheid vervoer) of dat er van elders steenkool aangevoerd moet worden.

Gezien het doel van het bevaarbaar maken van de rivier moet de topgebeurtenis dus zijn dat er in een jaar minder dan $20 \cdot 10^6$ ton steenkool vervoerd wordt.

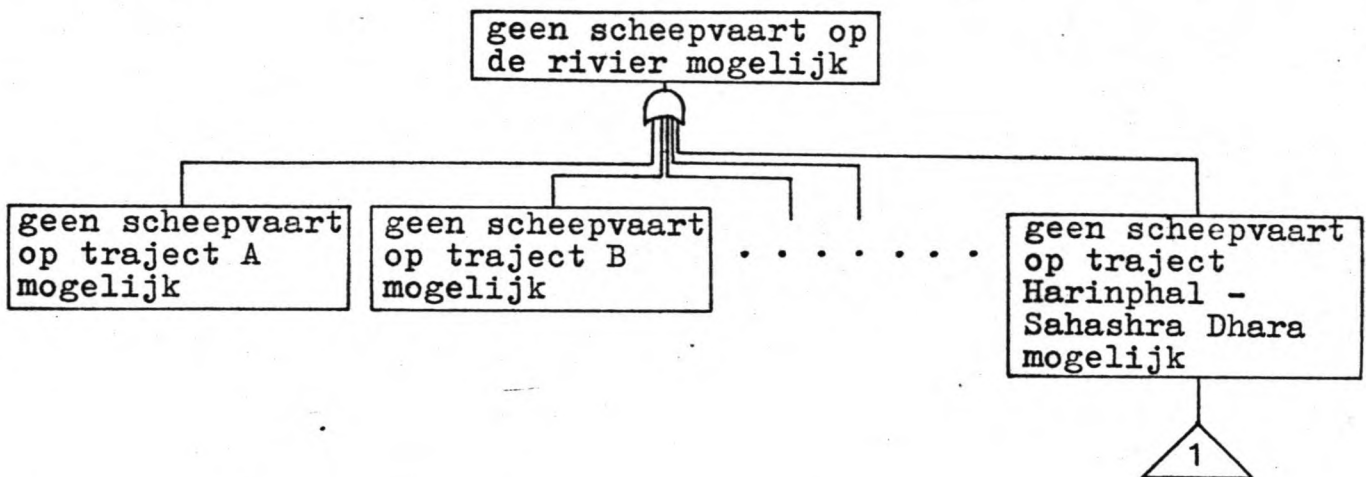
Het vervoer kan minder zijn dan $20 \cdot 10^6$ ton als:

- de kolenmijn niet voldoende produceert.
- de beladingscapaciteit per jaar te gering is. Deze is gelijk aan de overslagcapaciteit per dag maal het aantal dagen dat de rivier bevaarbaar is.
- de transportcapaciteit van de riviervloot te gering is. Deze wordt bepaald door het aantal beschikbare schepen, het laadvermogen, de frequentie van varen en het aantal dagen dat de rivier bevaarbaar is.

De foutenboom van het geheel ziet er als volgt uit:



Een belangrijke oorzaak van te weinig kolenvervoer is als het aantal dagen per jaar dat de rivier bevaarbaar is te gering wordt. Op de rivier is geen scheepvaart mogelijk als op één riviertraject geen scheepvaart mogelijk is. De foutenboom hiervan ziet er als volgt uit:



Tussen de verschillende takken is een correlatie aanwezig die in het droge seizoen klein en in het natte seizoen groot zal zijn omdat een hoogwatergolf door alle riviertrajecten loopt.

Eén van de trajecten waarop scheepvaart mogelijk moet zijn is het gedeelte Harinphal - Sahashra Dhara. Voor dit gedeelte zal in de rest van dit verslag een analyse gemaakt worden waarom er geen scheepvaart mogelijk is.

De scheepvaart kan onmogelijk worden door één van de volgende oorzaken:

- de golfhoogte is te hoog
- de stroomsnelheid is te hoog
- de waterstand is te hoog, m.a.w. de scheepvaart kan de bruggen over de rivier niet passeren
- de waterstand is te laag
- de vaarweg is geblokkeerd.

Dit wordt weergegeven in de foutenboom op blz. 24. In de volgende paragrafen wordt deze boom verder uitgewerkt.

Er wordt echter nu al opgemerkt dat voor verschillende oorzaken de tijd van het jaar van belang is dus nat of droog seizoen.

Verder is ook van belang of de waterstand benedenstrooms van de stuw (h_2) lager of hoger is dan het stuwpeil (135^+). In het eerste geval is de stuw wel, in het tweede geval niet nodig.

Het jaar is dus in vier verschillende periodes te verdelen:

- nat seizoen, $h_2 < 135^+$
- nat seizoen, $h_2 > 135^+$
- droog seizoen, $h_2 < 135^+$
- droog seizoen, $h_2 > 135^+$

II.2 GOLFHOOGTE, STROOMSNELHEID EN ONDERDOORVAART BRUGGEN

De golfhoogte wordt bepaald door de windsnelheid en de strijklengte. De laatste is weer afhankelijk van de windrichting en de waterstand. Als er ergens op het traject de golven te hoog zijn komt de scheepvaart stil te liggen. Hierbij is niet de maximum golfhoogte in het stuwmeer van belang maar die in de vaargeul. Voor de strijklengte moet dan ook de strijklengte van de oever tot het midden van de vaargeul genomen worden.

De strijklengte zal van plaats tot plaats variëren en toenemen naarmate de waterstand toeneemt. De waterstand zelf zal t.g.v. verhang en windopzet variëren langs de rivier.

Om de kans te kunnen bepalen dat de golfhoogte een bepaalde grenswaarde overschrijdt is het nodig om voor iedere waterstandssituatie en windrichting de kansdichtheidsfunctie van de maximum strijklengte te weten.

De stroomsnelheid wordt bepaald door het debiet en het doorstroomprofiel. De laatste is afhankelijk van de waterstand en dus ook van het debiet (verhang). Het verband hiertussen moet bekend zijn, dit is het beste te doen door uit het debiet de waterstand te bepalen.

In dit verband is de maximum stroomsnelheid van belang. Deze treedt op waar het doorstroomprofiel minimaal is. Dit kan in principe overal langs de rivier zijn, het meest waarschijnlijke is echter dat het bij Sahashra Dhara optreedt. Hoe sterker het verhang, hoe groter de kans dat het meer stroomafwaarts optreedt.

Om de kans te kunnen bepalen dat de stroomsnelheid te groot wordt moet voor iedere waterstandssituatie (waterstand en verhang) de kansdichtheidsfunctie van het minimum doorstroomprofiel bekend zijn.

Een schip kan niet onder een brug door als het verschil tussen onderkant brug en de waterstand minder is dan de hoogte van een duwboot.

De hoogte van de duwboten is in principe ook een stochastische grootheid. Naarmate het verschil tussen onderkant brug en de waterstand afneemt zullen meer schepen de brug niet kunnen passeren.

Voor een stremming van de vaarweg is niet het hoogste schip maatgevend, men kan stellen dat er pas sprake is van een stremming als een aanzienlijk deel van de scheepvaart (bijvoorbeeld 50 %) één of meer bruggen over de rivier niet kan passeren.

De hoogte van de onderkant van een brug wordt bepaald door:

- ontwerphoogte
- bouwfouten zoals een verkeerde hoogtebepaling (verkeerd peilmerk en/of een foutieve meting) e.d.
- zetting; deze zal in de loop der tijd toenemen. Als uitgangspunt bij de berekening kan men de voorspelde zetting na een bepaald aantal jaren nemen.

Gezien het feit dat de ondergrond rotsachtig is zal in dit geval de zetting waarschijnlijk verwaarloosbaar zijn.

- doorbuiging door eigen gewicht en nuttige belasting; deze zal in de grootte-orde van enige centimeters en dus van ondergeschikt belang zijn.

In dit geval is het ongunstig als de waterstand hoog wordt. Hoge waterstanden treden in het natte seizoen, als hoogwatergolven door de rivier lopen, op.

Hierbij is het verval over de stuw bij Harinphal van belang. Deze wordt weer bepaald door het aantal geopende openingen wat weer bepaald wordt door het aantal openingen dat men wil openen en het aantal openingen dat geopend kan worden.

Er moet hierbij onderscheid gemaakt worden tussen de situatie $h_2 < 135^+$ en $h_2 > 135^+$. In het eerste geval is de stuw nodig voor de waterkering zodat het openen aan een bepaalde tijd gebonden is en er dus weinig of geen tijd is voor reparatie. In het tweede geval is de stuw niet nodig, alle schuiven kunnen dan geheven zijn waardoor er wel tijd beschikbaar is voor reparatie.

Een paar oorzaken hebben tot gevolg dat er geen enkele schuif geheven kan worden. Deze zijn: geen electriciteit beschikbaar, geen personeel beschikbaar of nalatigheid.

Een opening kan door verschillende oorzaken niet geopend worden. Deze zijn in de foutenbomen op blz. 24 t/m 28 aangegeven.

Twee oorzaken verdienen nog een nadere toelichting.

De eerste is de nooddam. Als een stuwpijler om de een of andere reden bezwijkt (hierop wordt in II.3 nader ingegaan) moet, om de pijler te kunnen herstellen eerst een bouwput gemaakt worden. Dit

betekent dat rond de bezweken pijler een dam aangelegd moet worden. Deze dam heeft tevens als taak om de waterkerende functie van het bezweken gedeelte van de stuw over te nemen. Er zijn hierbij meerdere openingen afgesloten.

Ook het onderdeel "contragewicht kan niet zakken" zal toegelicht worden. Als bij het begin heffen de kracht in de hijskabels van de schuif zo groot wordt dat ze breken zal het contragewicht naar beneden vallen. Als hierbij het contragewicht scheef valt komt het onder het contragewicht van de naastliggende schuif. Deze kan daarna niet meer zakken tenzij het contragewicht recht gezet is.

II.3 WATERSTAND TE LAAG

Als de waterstand te laag wordt komt de scheepvaart stil te liggen. Indien dit in het droge seizoen gebeurt is er voor een lange periode geen scheepvaart mogelijk. Zolang de waterstand benedenstrooms van de stuw hoger is dan het stuwpeil zal deze situatie niet optreden.

Door verschillende oorzaken kan de waterstand te laag zijn of worden.

Eén ervan is dat er in het natte seizoen achter Harinphal te weinig water wordt opgezet. Nu is in normale omstandigheden de waterstand in het reservoir aan het einde van het natte seizoen 140⁺ dus boven het stuwpeil. Dit kan dus alleen gebeuren als er achter Sardar Sarovar te weinig water wordt opgezet en tevens als er daarbij achter Harinphal ook te weinig water is geborgen d.w.z. bij de laatste hoogwatergolf is de stuw niet op een zodanig tijdstip gesloten dat de rest van de hoogwatergolf voldoende is om het gedeelte achter Harinphal tot het stuwpeil te vullen.

Achter Sardar Sarovar kan te weinig water zijn opgezet als de instroming klein is of als er te veel water geloosd wordt (algemeen: het verschil tussen in- en uitstroming gedurende de natte periode is te klein) of als de stuw bij Sardar Sarovar faalt.

Een ^{andere} andere mogelijkheid is dat de onttrekking bij Sardar Sarovar zo groot is dat er een watertekort dreigt (dus de onttrekking is groter dan de geborgen hoeveelheid water). De beheerder kan dan besluiten om de hoeveelheid water die achter de stuw bij Harinphal geborgen is ook voor irrigatie doeleinden te gebruiken.

Een derde mogelijkheid is dat de waterbalans van het riviergedeelte gemiddeld negatief is. Hierdoor zal in de loop der tijd de waterspiegel dalen. De waterbalans bestaat uit een groot aantal factoren waarvoor naar hoofdstuk III verwezen wordt.

Tot slot wordt de waterstand te laag als de stuw faalt. Dit kan doordat er een stuwopening of sluiskolk open staat, doordat de stuw te laag is of doordat een deel van de dam waar de overlaat op staat bezwaken is.

De stuw is te laag als de bovenkant van de schuif of als de overlaat te laag is. Aangezien de kruin van de overlaat hoger ontworpen is dan die van de schuif treedt het laatste op als de muur op de overlaat bezwijkt en de kruin van de dam te laag ligt.

In de natte tijd is de waterstand te laag als deze aan het begin van het natte seizoen te laag is (dus in het voorgaande droge seizoen te laag is geworden) en de gesommeerde rivierafvoer nog niet voldoende is om het water tot het stuwpeil op te zetten. De waterstand wordt ook te laag als de stuw voor een hoogwatergolf geopend is (dit is het geval als er een afvoer van meer dan $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$ voorspeld wordt) en de opening daarna niet op tijd gesloten is (dus dat de stuw ten onrechte open staat) of als de stuw faalt.

Op blz. 229 t/m 44 zijn de bomen voor de situatie "waterstand te laag" zowel voor het droge als het natte seizoen vermeld. Ter aanvulling daarop volgen hier nog enige opmerkingen.

Als in het natte seizoen een schuif bezwijkt kan de stuw in het droge seizoen nog wel werken mits er op tijd een noodkering wordt geplaatst. Bezwijken van de schuif zal optreden als de belasting (horizontale waterdruk, golven, aanvaring door een schip, e.d.) groter is dan de sterkte (treksterkte, druksterkte, weerstand tegen plooi en knik, e.d.). De sterkte is afhankelijk van: ontwerp, uitvoering (gebruik maken van de juiste plaatdiktes e.d.), roestvorming, vermoeiing en de sterkte van de verbindingen.

De schuif kan, nadat hij geopend is, niet gesloten worden door menselijk falen (men laat na om de schuif te sluiten) of door onvermogen d.w.z. een technische storing. Technische storingen zijn:

- de tandwielen zitten vast; de kans hierop is niet zo groot want de schuif is ook omhoog gekomen. Wel is het mogelijk dat de wrijving in de lagers van de tandwielen te groot is. Dit betekent in feite dat het bewegingswerk te licht is.
- het bewegingswerk is te licht; de schuif is lichter dan het contragewicht, bovendien moet bij sluiten onder verval ook nog wrijving overwonnen worden. Een mogelijkheid tot provisorisch herstel is om het contragewicht lichter te maken.
- de motor is kapot; deze kan gerepareerd of vervangen worden bijvoorbeeld door een motor te "lenen" van een andere schuif.
- er is geen electriciteit; d.w.z. er is een (langdurige) stroomstoring en er is geen eigen opwekking doordat het aggraat kapot is of er aan het gebruik daarvan niet gedacht is.
- de schuif loopt klem door bijvoorbeeld vuil in de schuifnis.

Als $h_2 < 135^+$ is moet het sluiten snel gebeuren. Er is dan weinig of geen tijd voor reparatie. Als $h_2 > 135^+$ is moet de schuif gesloten

zijn voordat in het droge seizoen de waterstand onder 135⁺ zakt. Dit betekent dat er tijd voor reparatie is.

De stuwpijler kan op de volgende manieren bezwijken:

- de pijler glijdt weg d.w.z.

$$\sum F_h > f \cdot \sum F_v$$

(hierin is f de wrijvingscoëfficiënt tussen de pijler en de ondergrond)

- de pijler kantelt in de damasrichting d.w.z.

$$\frac{\sum M_x}{\sum F_v} > \frac{1}{2} \cdot B$$

(hierin is B de breedte van de pijlervoet)

- de pijler kantelt in de stroomrichting d.w.z.

$$\frac{\sum M_y}{\sum F_v} > \frac{1}{2} \cdot L$$

(hierin is L de lengte van de pijlervoet)

- de stenen drempel bezwijkt.

De belasting op de pijler wordt bepaald door de waterstanden aan de boven- en benedenstroomse zijde van de stuw, de golfbelasting, het gewicht van de verschillende onderdelen en voor beide zijden van de pijler of de schuif gesloten, de noodkering geplaatst of de opening geopend is.

Bepaalde onderdelen van de stuw kunnen bezwijken. Dit hoeft op zich niet tot bezwijken van de pijler te leiden maar vergroot wel de kans er op. Hierbij valt te denken aan:

- als de dwarskrachtverbinding tussen drempel en vleugel of als de verbinding tussen vleugel en pijlervoet bezwijkt neemt de weerstand tegen glijden af.
- als de waterdichte bekleding op de stenen drempel of de voegstrip faalt zal, als er een verval over de stuw staat, de waterdruk tegen de onderkant van de pijler toenemen waardoor $\sum F_v$ afneemt en $\sum M_y$ toeneemt.
- als de ankerkabels waarmee de drempel aan de ondergrond verankert is bezwijken door overbelasting of doorroesten neemt de weerstand tegen glijden ook af. Tevens zal nu de drempel opgelicht kunnen worden.

Een sluiskolk staat open als zowel de boven- als de benedendeur niet gesloten kan worden en er ook geen mogelijkheid is om in de

kolk een noodkering aan te brengen.

Er kan hier uitgegaan worden van het feit dat er in de kolk geen voorzieningen voor een noodkering aanwezig zijn omdat de twee sluisdeuren zelf al een dubbele kering vormen. Tevens zijn de deuren niet bedoeld om in stromend water te bewegen.

Een deur kan om de volgende redenen niet gesloten worden:

- de deur is bezweken t.g.v. een aanvaring
- de deur is bezweken door de waterdruk
- de aandrijving van de deur ging kapot toen deze open stond
- nadat de deur geopend is ontstaat er een stroming door de sluis-kolk omdat de andere deur open gaat.

Het falen van de stuw kan op 7 manieren geschieden die hierna beschreven worden. Voor de foutenboom wordt naar blz. 41 verwezen.

stysteem 1:

In de natte tijd bezwijkt eerst de bovendeur en daarna de beneden-deur zo deze dicht is. Als dit niet het geval is treedt falen op door te vergeten de deur op tijd dicht te doen.

stysteem 2:

Tijdens het schutten van een schip schiet deze te ver door, botst tegen de andere deur waarna deze vervolgens bezwijkt.

stysteem 3:

De bovendeur staat open en de benedendeur gaat open.

De bovendeur staat in de volgende gevallen open:

- bij het schutten van een schip
- de deur kan niet dicht doordat, toen de deur open stond, het aandrijfmechanisme kapot ging en het nog niet hersteld is of doordat er in de kolk een schip gezonken is dat nog niet gelicht is.
- de deur is kapot en nog niet hersteld; de deur kan kapot gaan door bezwijken door waterdruk of doordat de deur is aangevaren vanaf de rivier (aanvaring vanuit de sluis-kolk is alleen mogelijk als de benedendeur al open staat. Als deze voor het schutten open staat is er sprake van systeem 2, anders van systeem 4a).

De benedendeur gaat open:

- als de deur bezwijkt
- door een bedieningsfout: de deur wordt per ongeluk geopend

- door een aanvaring vanaf de rivier
- door een aanvaring vanuit de sluiskolk; dit kan gebeuren als een schip per ongeluk de kolk in vaart of bij het schutten. In het laatste geval is er sprake van systeem 2 hetgeen elders behandeld is en daarom hier weggelaten wordt. Als een schip per ongeluk de sluiskolk in vaart staat de bovendeur niet open om een schip te schutten maar omdat deze kapot is of niet dicht kan. Deze mogelijkheid wordt daarom apart als systeem 4 beschouwd.

systeem 1a, 3a en 4a:

Deze zijn gelijk aan respectievelijk de systemen 1, 3 en 4, behalve dat de plaats van boven- en benedendeur verwisseld is. De bijbehorende foutenbomen 16a, 18a en 19a zijn dus gelijk aan respectievelijk de foutenbomen 16, 18 en 19 waarbij de plaats van boven- en benedendeur verwisseld is.

II.4 VAARWEG GEBLOKKEERD

De vaarweg kan door verschillende oorzaken geblokkeerd zijn zoals:

- de scheepvaart kan de stuw bij Harinphal niet passeren
- van één van de bruggen over de rivier is de hoofdoverspanning ingestort en deze is niet opgeruimd
- de vaarweg is van zichzelf te smal of wordt te smal doordat er een schip aan de grond of in de oever loopt, doordat er een schip zinkt of doordat er een landafschuiving optreedt waarbij een grote massa grond het rivierdal inschuift.

Een en ander is in de foutenbomen op blz. 45 t/m 54 verder uitgewerkt. Hierna worden nog enige aanvullende opmerkingen gemaakt.

De scheepvaart kan de stuw bij Harinphal door de sluis en, als $h_2 > 135^+$ is, ook door een doorvaartopening passeren. Voor de tak "stremming bij Harinphal" moeten dus twee situaties onderscheiden worden:

- $h_2 < 135^+$: als het goed is zitten de doorvaartopeningen in de stuw dicht, de scheepvaart moet nu van de sluis gebruik maken.
- $h_2 > 135^+$: de scheepvaart kan de stuw nu door de doorvaartopeningen passeren. Zijn deze geblokkeerd dan kan altijd nog van de (aan beide zijden openstaande) sluis gebruik gemaakt worden.

Dit levert de foutenbomen op respectievelijk blz. 46 e.v. en 50 blz. op.

Een schip zit aan de grond als het in het meer of minder verre verleden aan de grond is gelopen (dit kan alleen als er die dag scheepvaart op de rivier aanwezig was, dus geen stremming van de scheepvaart door andere oorzaken) en als het schip sindsdien niet gelicht is of door een stijging van de waterspiegel vanzelf vlot gekomen is.

Als daarna de resulterende vaargeul te smal is, is er sprake van een blokkade.

Een schip loopt aan de grond als op minstens één plaats onder het schip de waterdiepte (verschil tussen waterstand en bodemligging) minder is dan de diepgang van het schip.

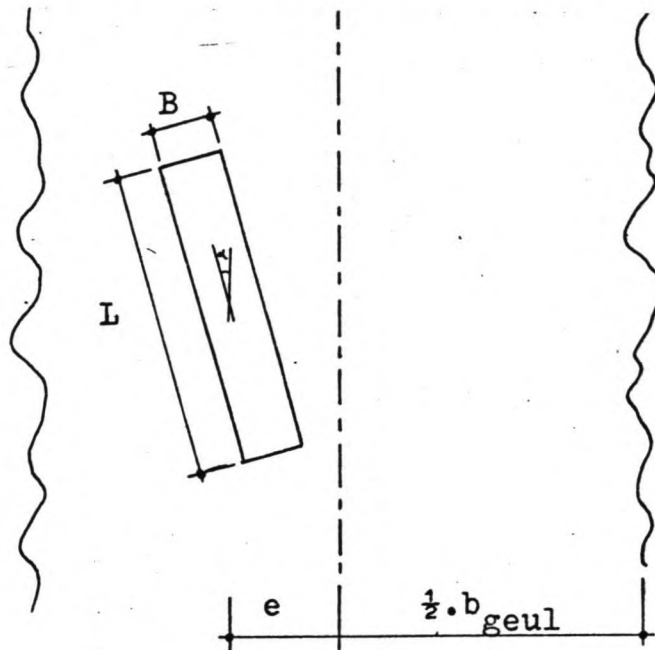
De bodemligging wordt beïnvloed door aanzanding, uitschuring, onderhoudsbaggerwerk en de aanwezigheid van zandbanken en rots-

pieken.

De diepgang van een schip wordt bepaald door het eigen gewicht, de belading en de verdeling daarvan. De diepgang kan niet meer zijn dan het verschil tussen kiel en boord omdat bij een grotere diepgang water over de rand zal stromen en de bak daardoor zal zinken.

Een duwconvooi is ruwweg te schematiseren tot een rechthoekig schip met een lengte (L) van ongeveer 172 m. en een breedte (B) van ongeveer 23 m. De plaats van een schip is te beschrijven door een afstand e tussen de as van de vaargeul en het middelpunt van het schip en een hoek α tussen de as van de vaargeul en die van het schip.

Als een schip aan de grond loopt is de breedte van de resterende vaargeul:



$$b = \frac{1}{2} \cdot b_{\text{geul}} + e - \left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} \cdot B \cdot \cos \alpha \right)$$

Als dit minder is dan een bepaalde grenswaarde (b_{min}) is er sprake van een blokkade. In de foutenboom op blz. 52 is het voorgaande weergegeven.

Hieruit is de kans dat er een blokkade is af te leiden. Deze is één minus de kans dat er geen blokkade is.

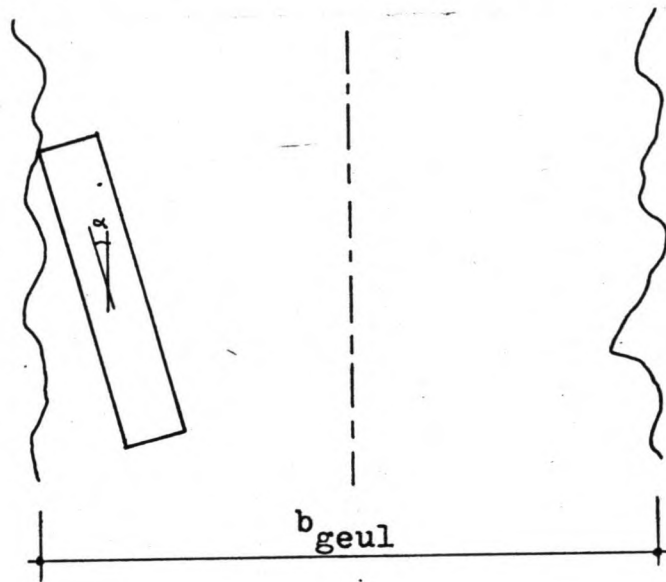
Er is geen blokkade als er op alle voorgaande dagen (inclusief heden) geen schip aan de grond loopt dat er nu nog zit. De kans is rechtstreeks uit de boom af te leiden:

$$\begin{aligned} P(\text{blokkade}) &= 1 - P(\text{geen blokkade}) \\ &= 1 - \prod \left\{ 1 - P(\text{scheepvaart}) \cdot P(\text{aan grond}) \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot (1 - P(\text{gelicht})) \cdot (1 - P(\text{vlot})) \cdot P(\text{te smal}) \right\} \end{aligned}$$

Voor P(aan grond) is de diepte van de vaargeul op de betreffende dag van belang, de breedte van de vaargeul op die dag bepaald e en α . Voor P(vlot) is de hoogste waterstand tussen de beschouwde dag en heden van belang, voor de breedte van de vaargeul is de waterstand heden van belang.

Een schip komt in de oever terecht als het teveel uit het midden van de rivier vaart. Dit kan, net als bij "schip aan de grond" alleen gebeuren als er scheepvaart aanwezig is.

Volgens dezelfde benadering als hiervoor is een uitdrukking voor de resterende vaargeulbreedte op te stellen.



$$b = b_{geul} - (L \cdot \sin \alpha + B \cdot \cos \alpha)$$

Een schip kan teveel uit het midden van de rivier varen door onoplettendheid, uitwijken voor een tegenligger, slechte bebakening e.d. maar ook door een mechanisch defect.

Als de stuurinrichting en/of de motor defect zijn is te verwachten dat het duwconvooi ergens in de oever loopt tenzij het anker uitgegooid wordt. In dat geval is het schip een soortgelijk obstakel als een schip dat aan de grond gelopen is zij het dat de plaats gedeeltelijk door menselijk ingrijpen te beïnvloeden is.

Voor de foutenboom, die op blz. 53 getekend is, en de kans op de ongewenste gebeurtenis geldt hetzelfde als bij "schip aan de grond".

Bij "schip aan de grond" en "schip in de oever" bestaat de mogelijkheid om de grootte van het obstakel te beperken door bakken en/of duwboot los te koppelen. Hierdoor verminderen L en B van het obstakel en verandert e .

Een schip zinkt als het gewicht groter is dan de verplaatste hoeveelheid water. Het gewicht bestaat uit:

- eigen gewicht
- belading
- neerslag (regen) die in de bak terecht komt
- buiswater
- overslaande golven; de hoeveelheid is afhankelijk van de golfhoogte en het vrijboord
- stroming over de rand; dit gebeurt als de rand ergens onder de waterspiegel verdwijnt, zo gauw dit gebeurt is de bak gedoemd om te zinken doordat hij steeds zwaarder wordt, het is evenwel nog mogelijk om de bak naar de kant te duwen
- lekkage; deze ontstaat door:
 - lekkende lasnaad: geen spectaculaire instroming maar langzaam zinken, er is gelegenheid om de bak naar de oever te duwen
 - explosie in de machinekamer van de duwboot waardoor een gat in de romp geslagen wordt
 - aanvaring waardoor een gat in de scheepswand ontstaat
 - rotspiek waarop de bodem stuk gereten wordt, in feite is dit een vorm van aan de grond lopen.

Als de som van de eerste twee factoren al zinken tot gevolg heeft betekent dit dat de bak al bij de kolenterminal zinkt en dus niet in het beschouwde riviergedeelte tot zinken komt.

Als er lekkage ontstaat door een explosie, aanvaring of rotspiek zal er sprake zijn van een plotselinge grote instroming, de boot zal dus min of meer plotseling zinken.

Bij de andere oorzaken gaat het zinken langzaam. Hierdoor kan het op tijd opgemerkt worden. Dit betekent dat geprobeerd kan worden om het schip door pompen drijvend te houden en als dit niet lukt kan geprobeerd worden om het schip op een zodanige plaats nabij de oever aan de grond te zetten dat de rest van de scheepvaart er geen hinder van heeft.

Als een bak of duwboot dreigt te zinken kan, door het tijdig kappen van de kabels met de andere bakken en/of de duwboot, voorkomen worden dat het gehele convooi zinkt en dus de grootte van het obstakel verkleind worden.

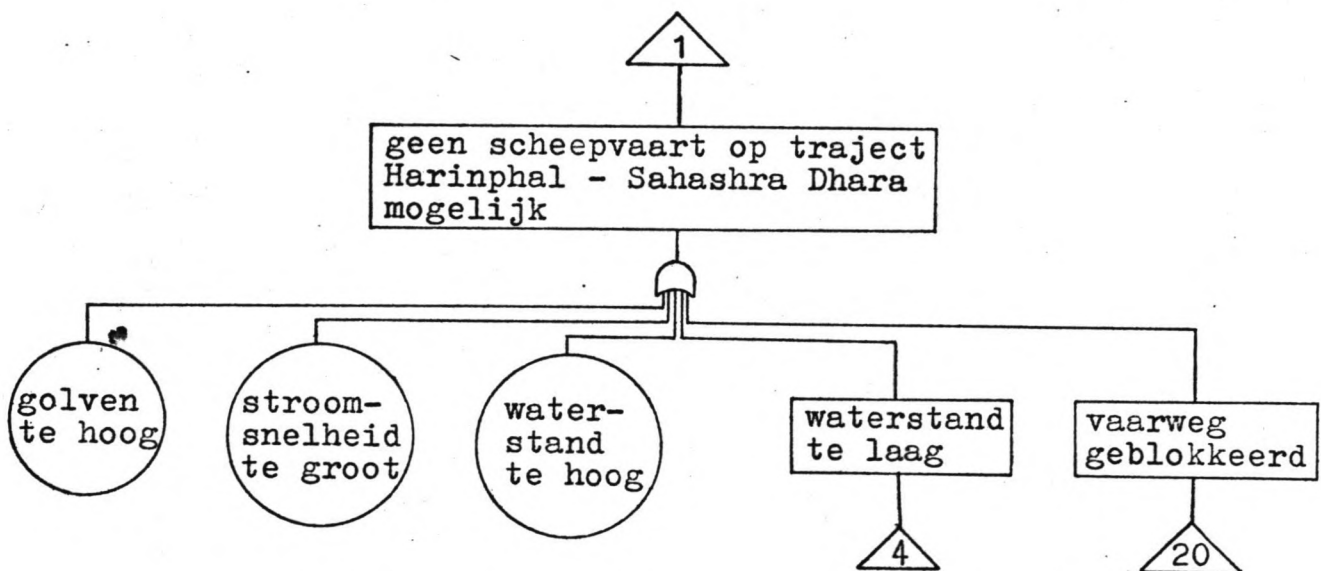
Afhankelijk van de waterdiepte kan, als (een deel van) een duwconvooi gezonken is, de scheepvaart hier al dan niet overheen varen. Er zijn daarbij drie situaties te onderscheiden:

- boven de gezonken duwboot is nog voldoende water, in dat geval vormt het convooi geen obstakel
- boven de gezonken duwbakken is te weinig water om scheepvaart er over heen mogelijk te maken
- een tussengebied waarin alleen de duwboot een obstakel vormt.

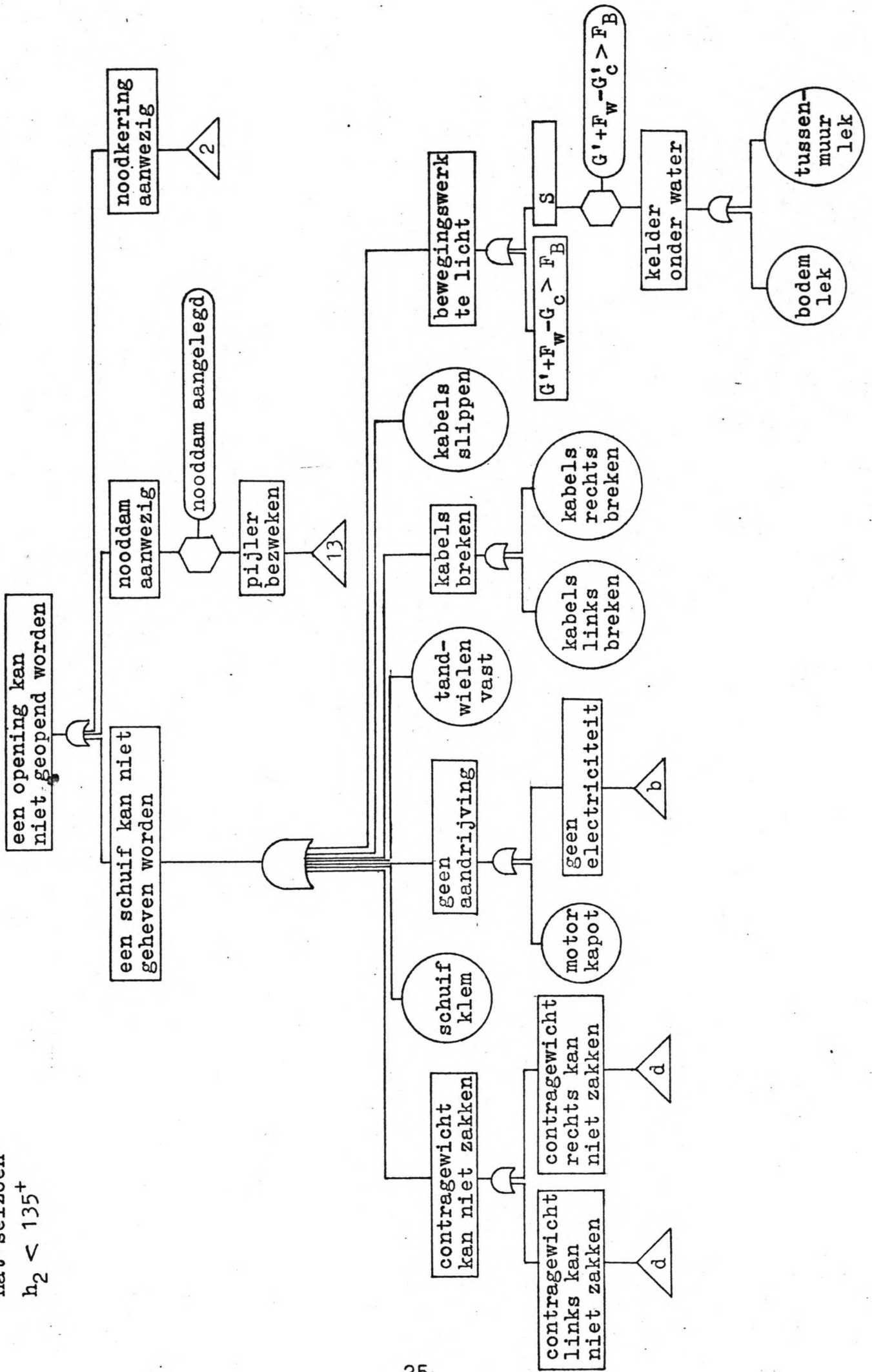
II.5 DE FOUTENBOOM

In deze paragraaf wordt de foutenboom, die in de voorgaande paragrafen al is toegelicht, vermeld. De takken met een letter als verwijssymbool zijn in alfabetische volgorde na de takken met een cijfer als verwijssymbool opgenomen.

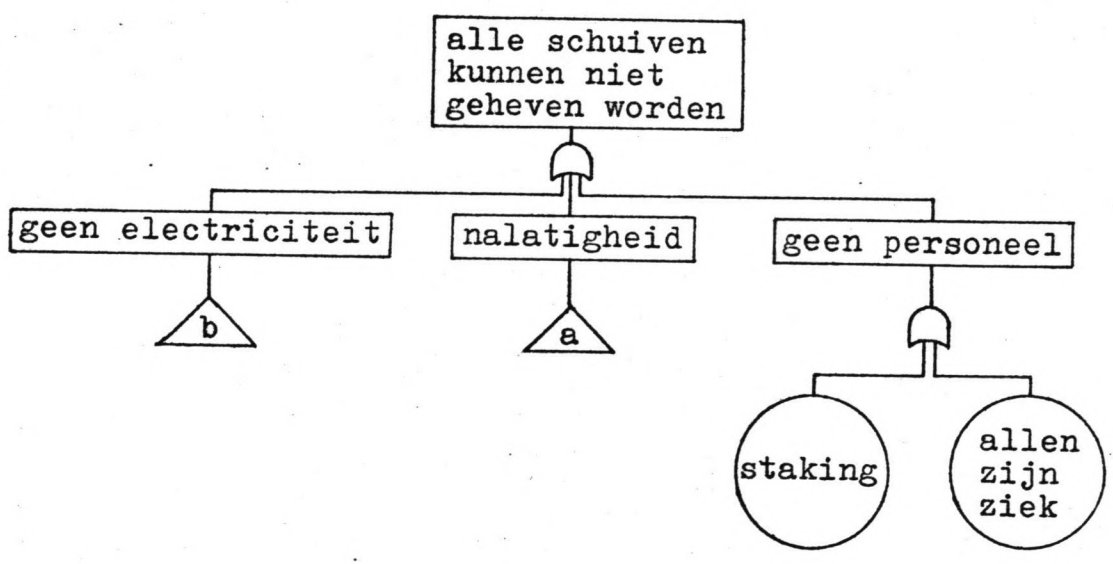
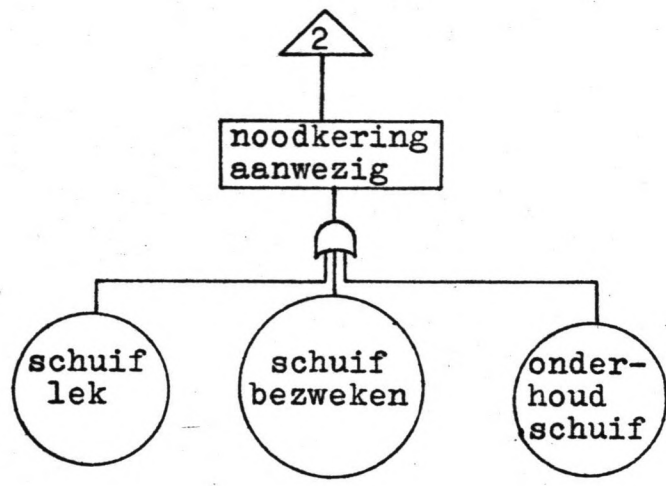
Twee takken (4 en 21) zijn dubbel aanwezig vanwege het verschil in situatie in het droge en natte seizoen, respectievelijk als de waterstand benedenstrooms van de stuw hoger of lager dan het stuwpeil is.



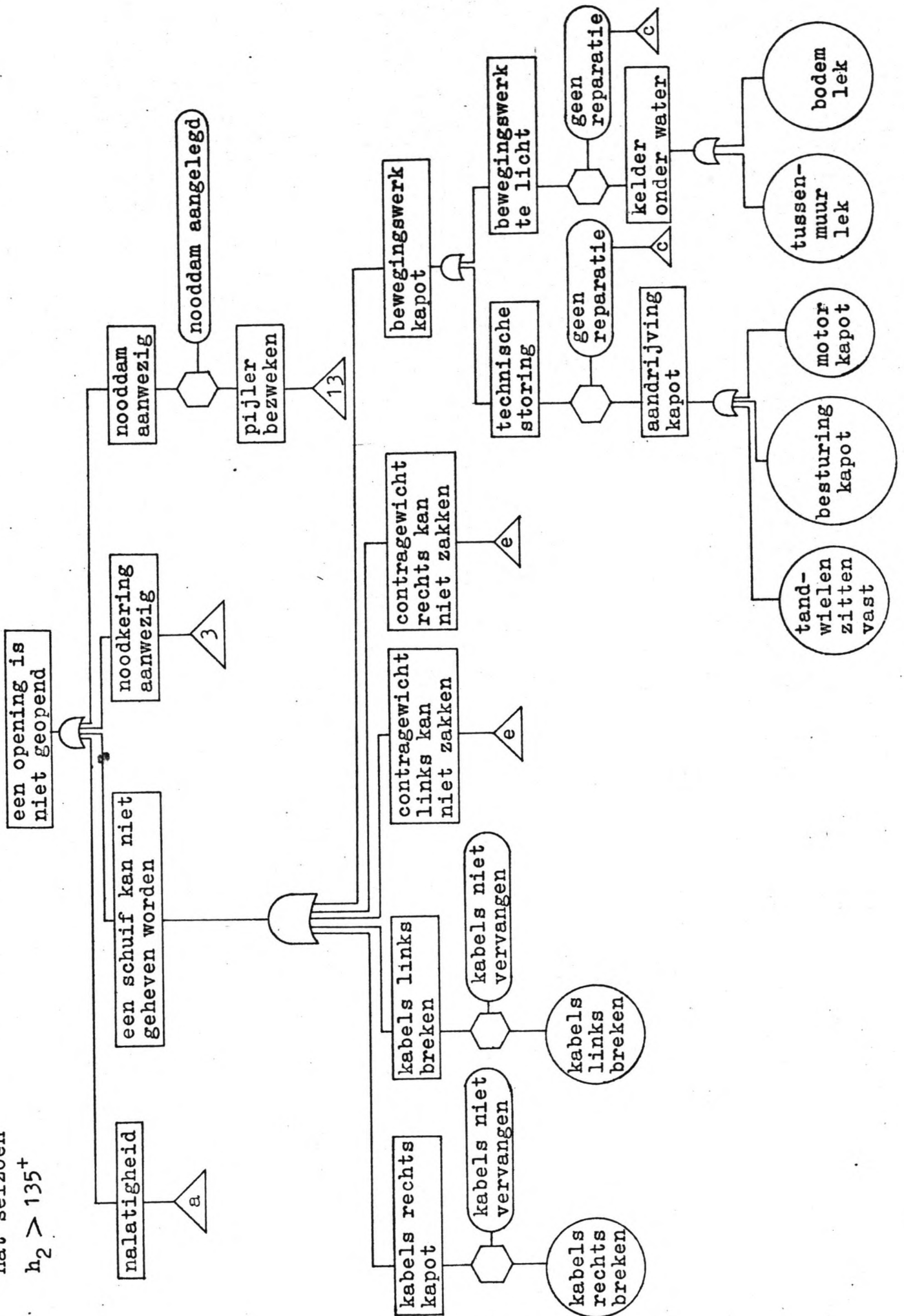
nat seizoen
 $h_2 < 135^+$



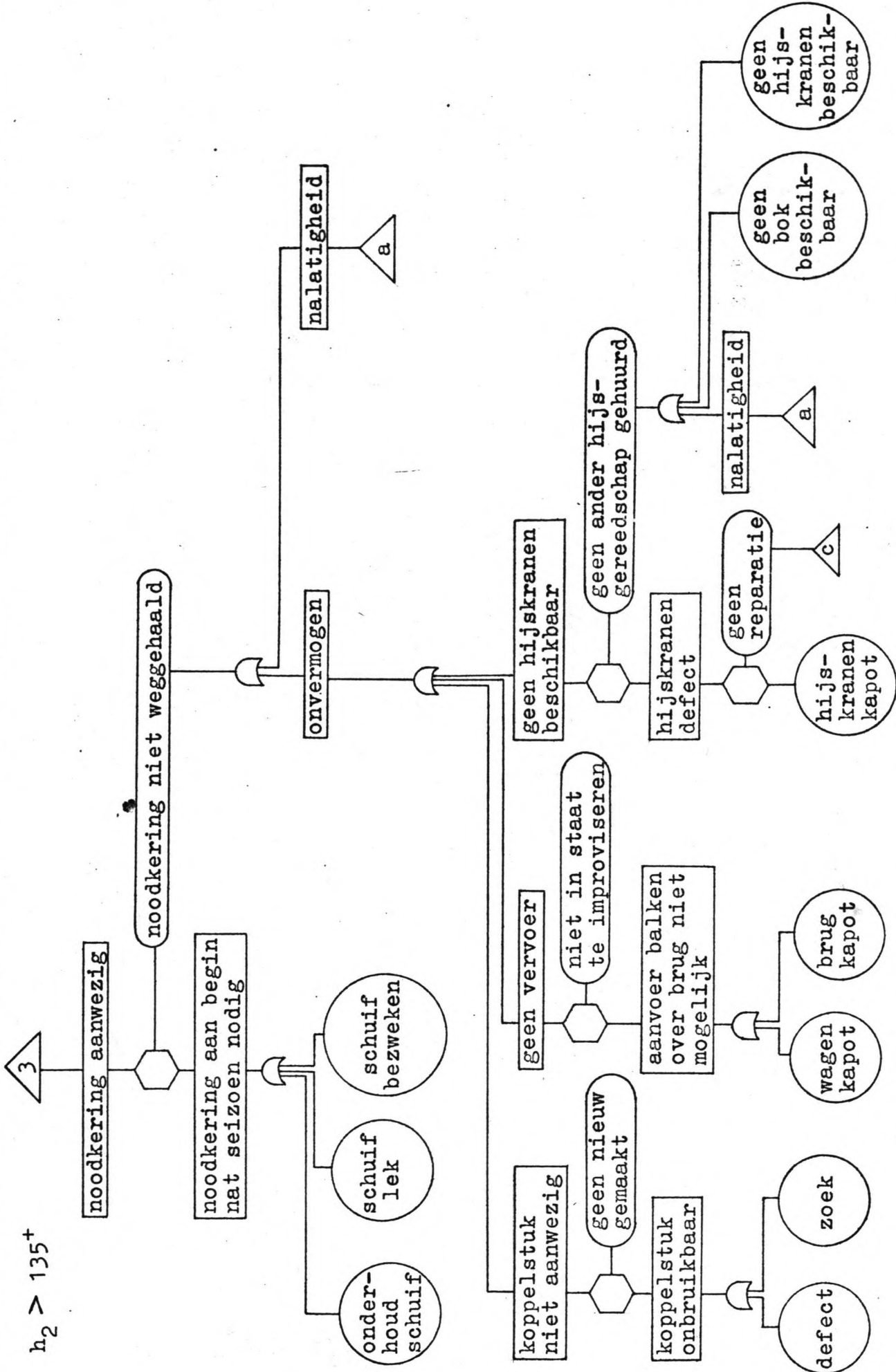
$h_2 < 135^+$



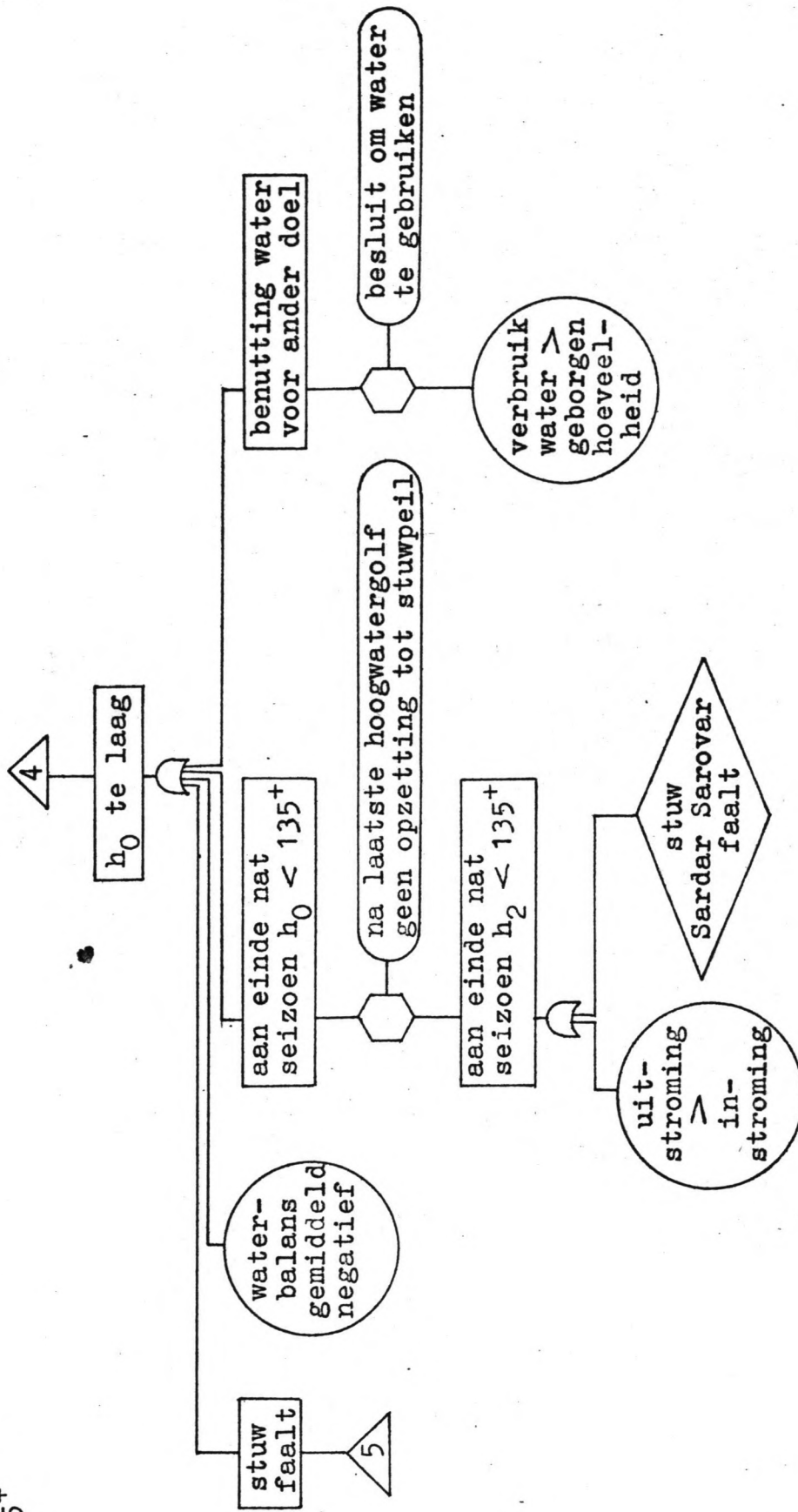
nat seizoen
 $h_2 > 135^+$



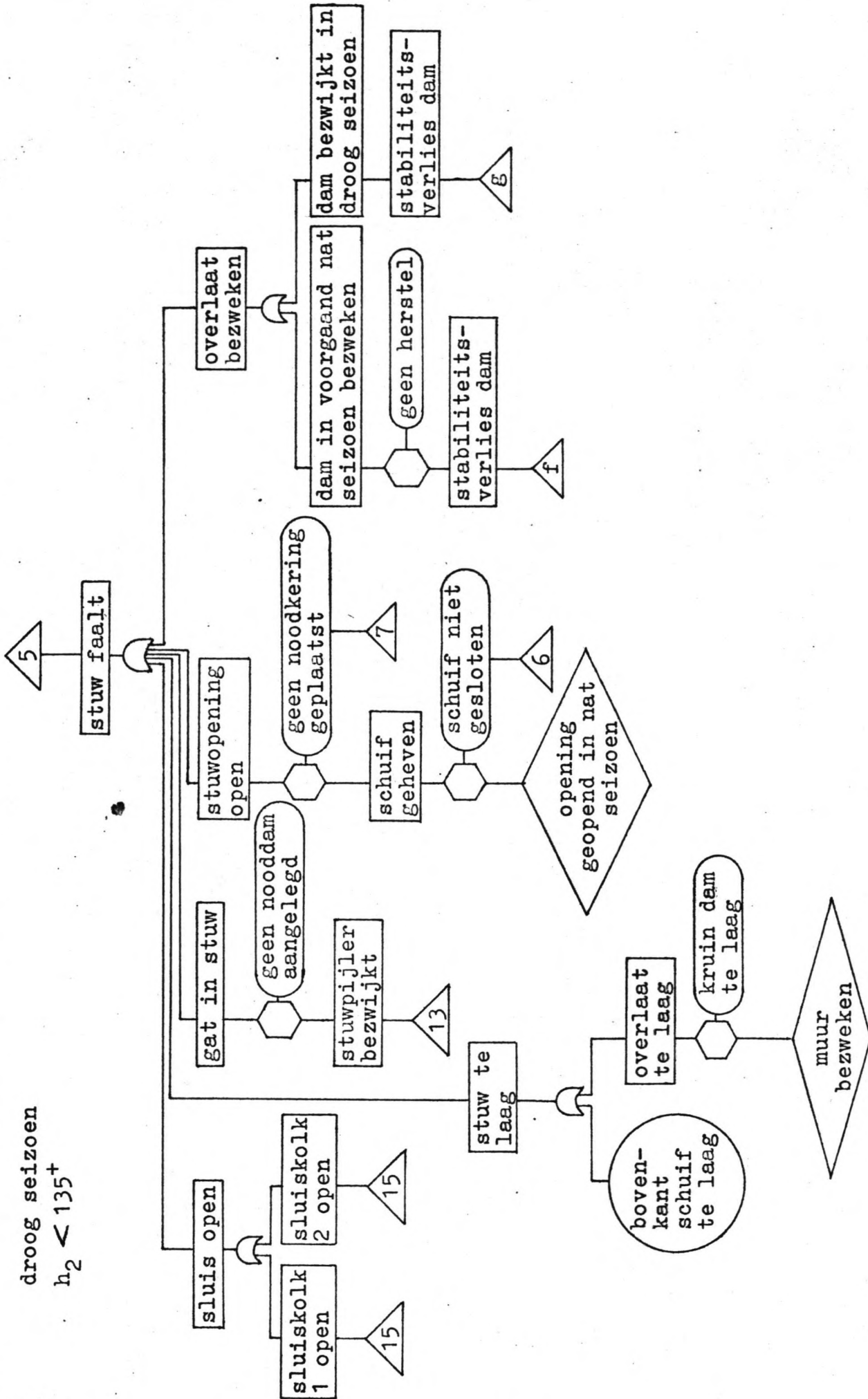
$h_2 > 135^+$



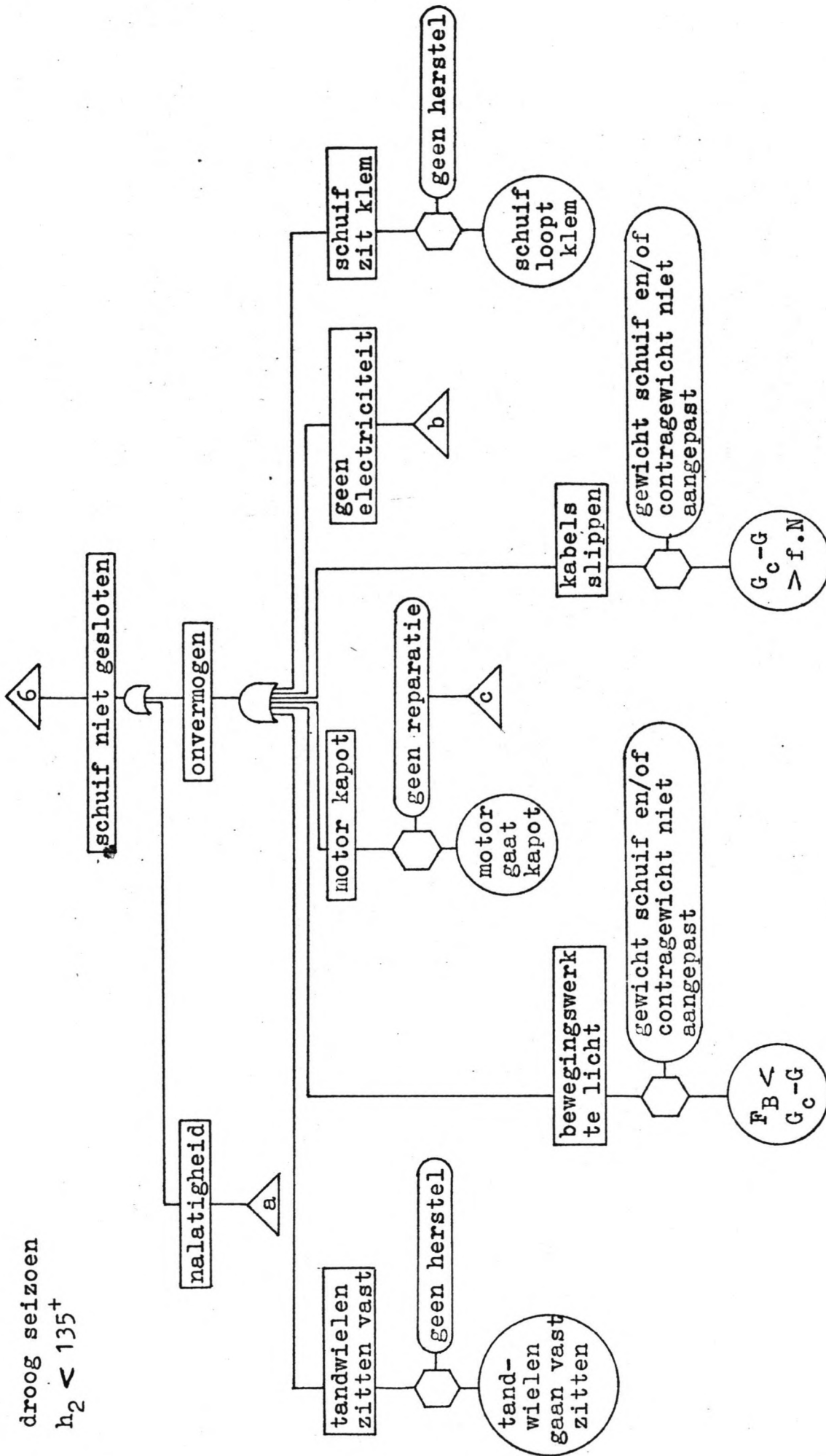
droog seizoen
 $h_2 < 135^+$



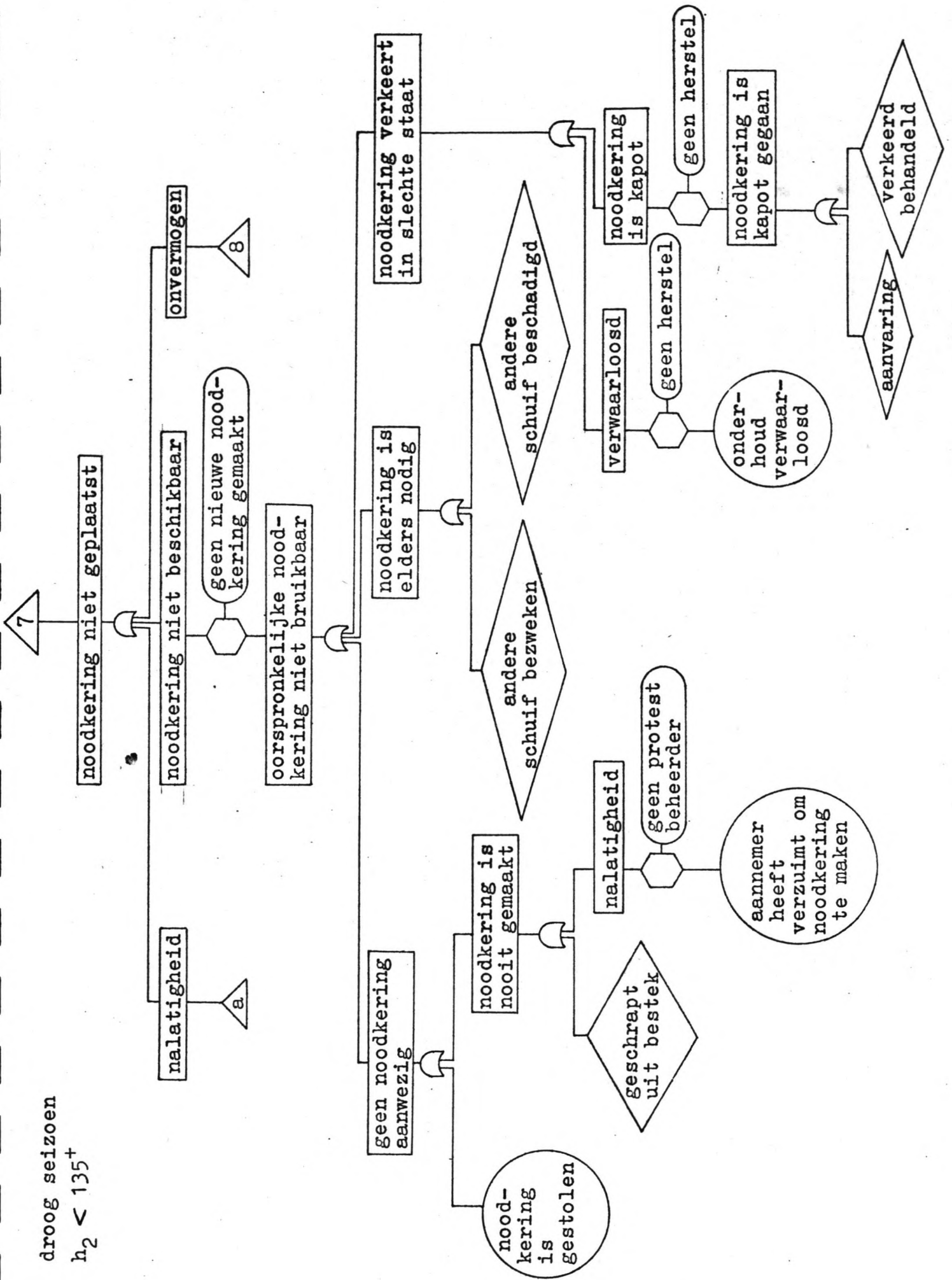
droog seizoen
 $h_2 < 135^+$



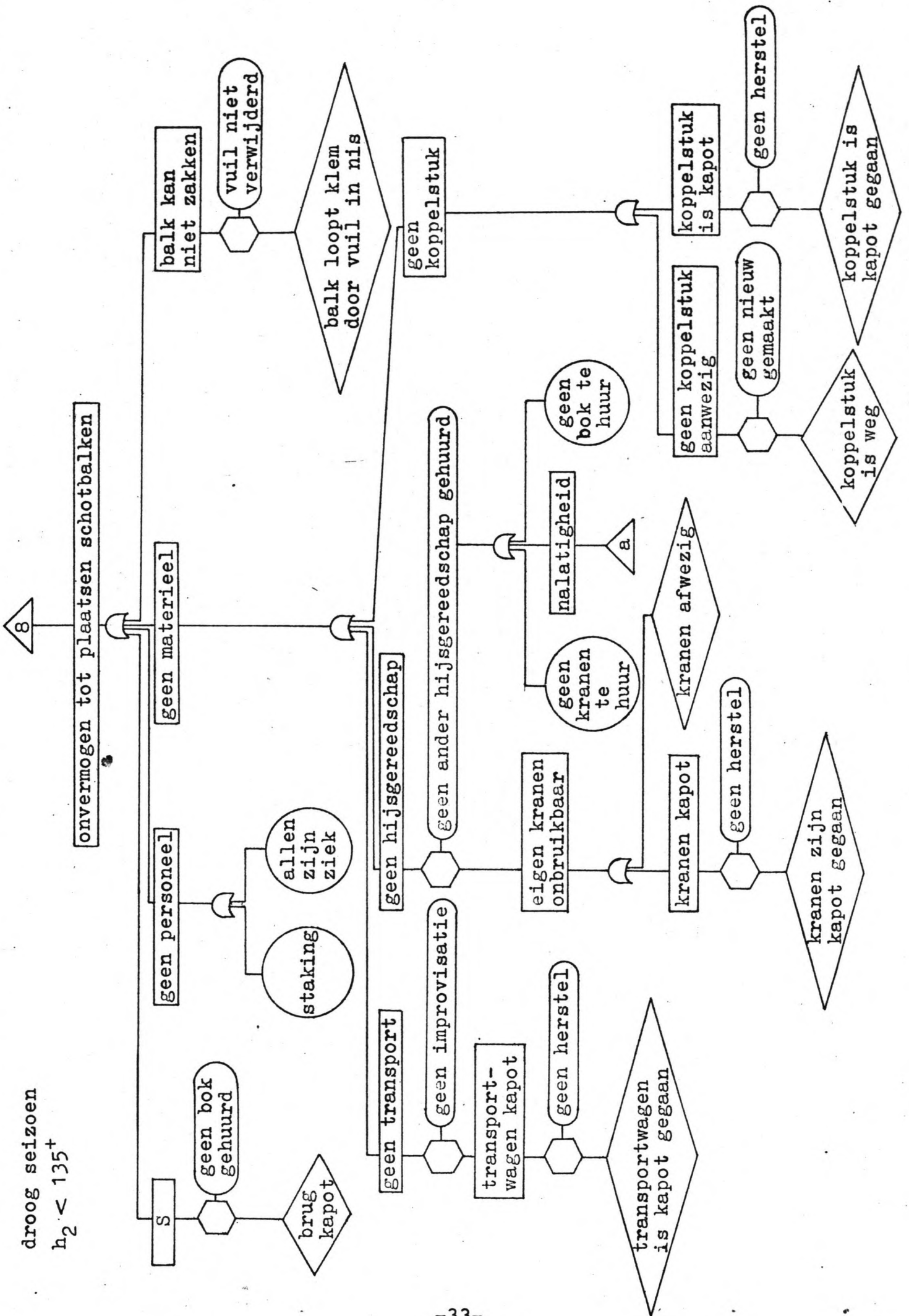
droog seizoen
 $h_2 < 135^+$



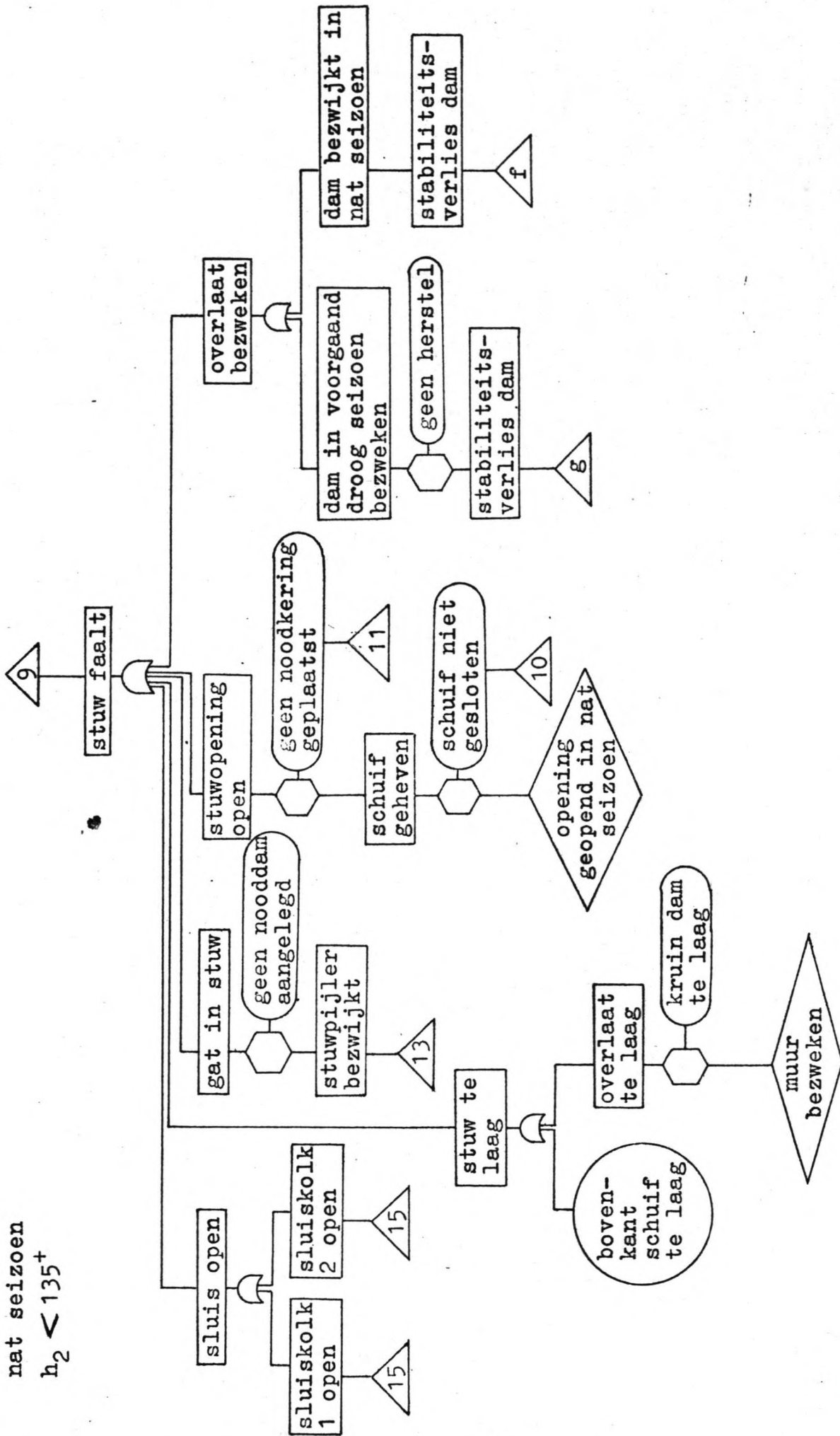
droog seizoen
 $h_2 < 135^+$



droog seizoen
 $h_2 < 135^+$



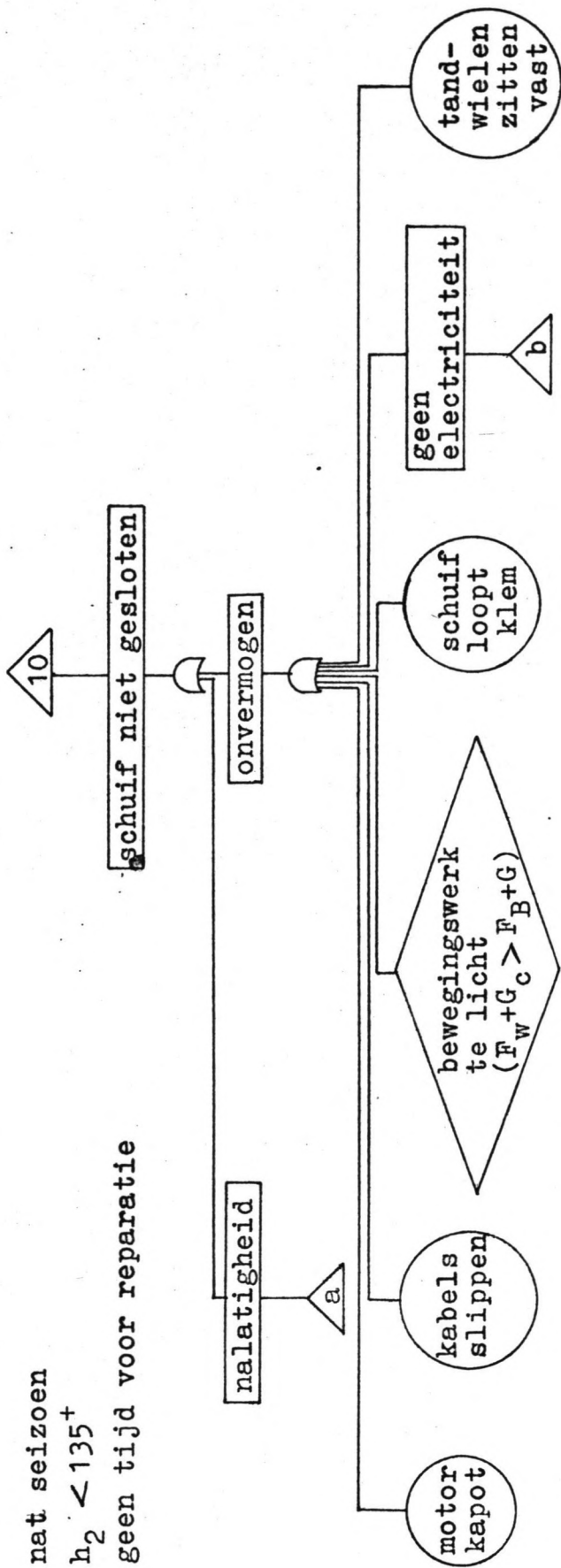
nat seizoen
 $h_2 < 135^+$



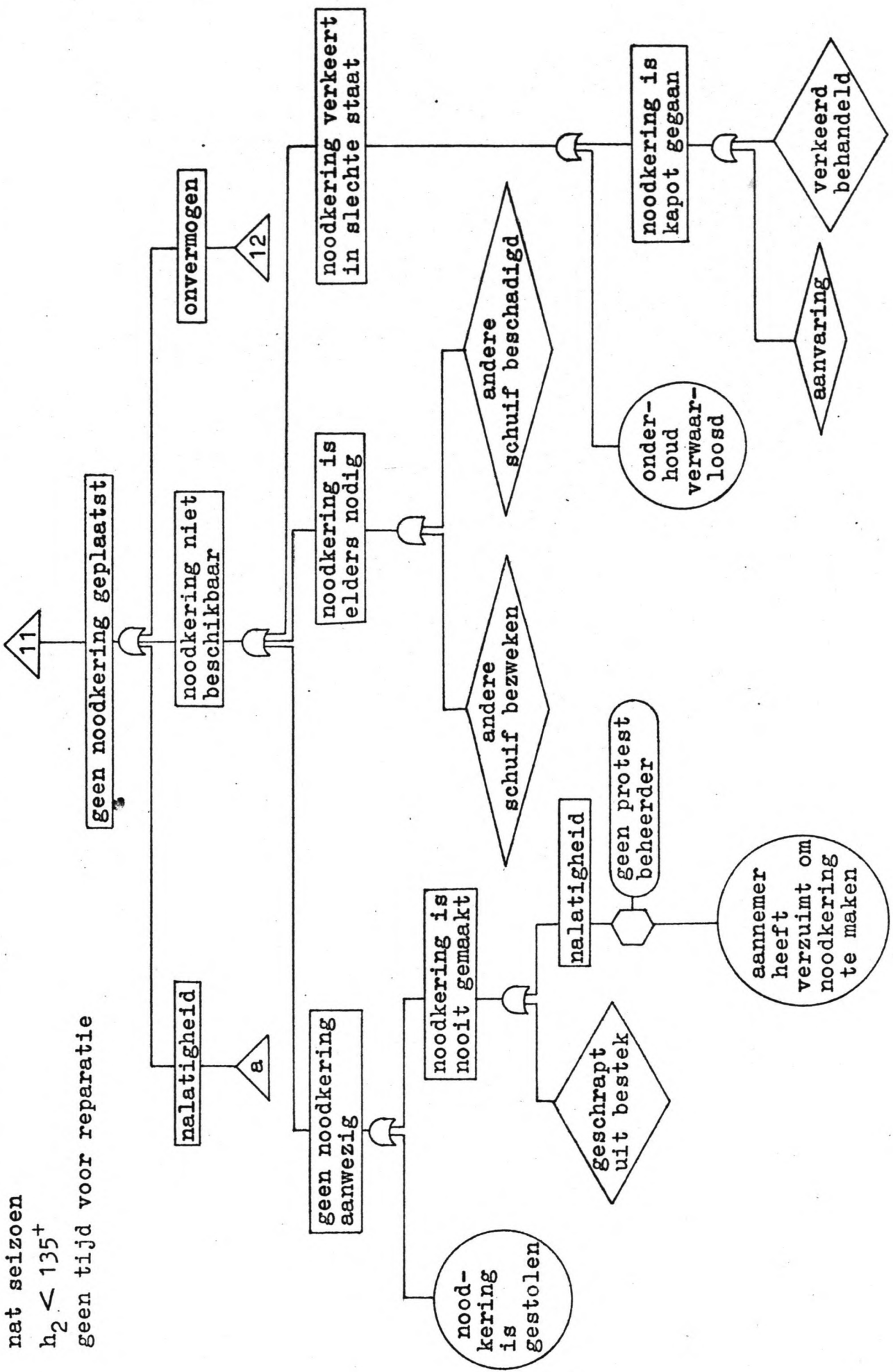
nat seizoen

$h_2 < 135^+$

geen tijd voor reparatie



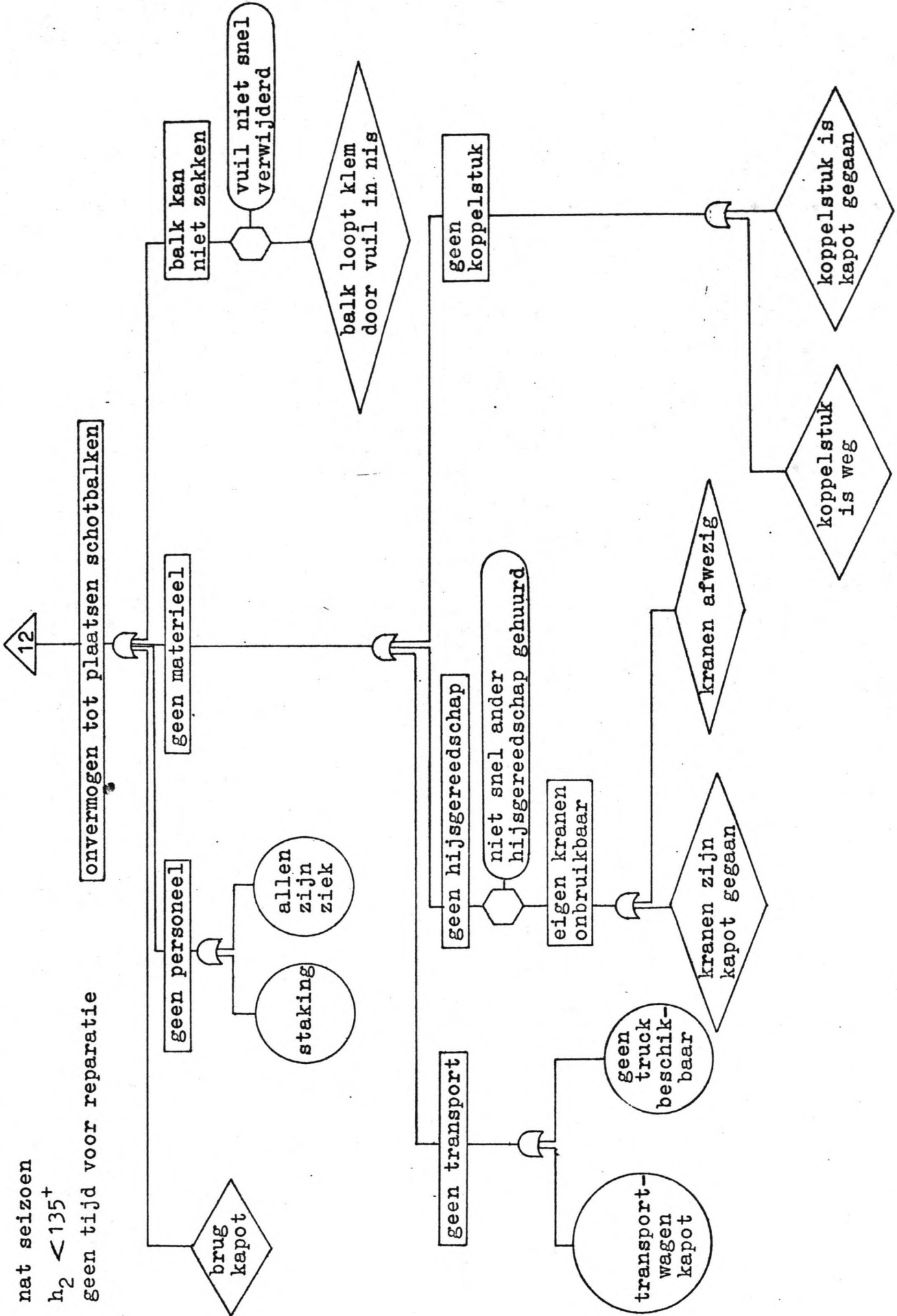
nat seizoen
 $h_2 < 135^+$
geen tijd voor reparatie

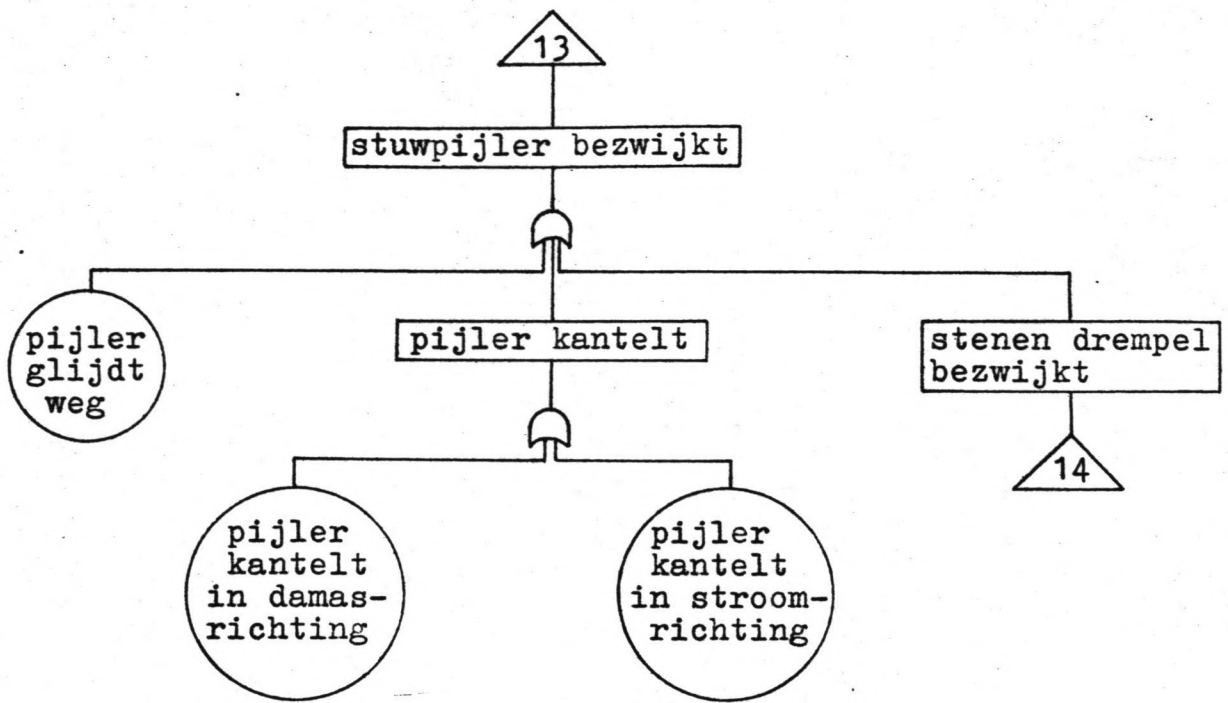


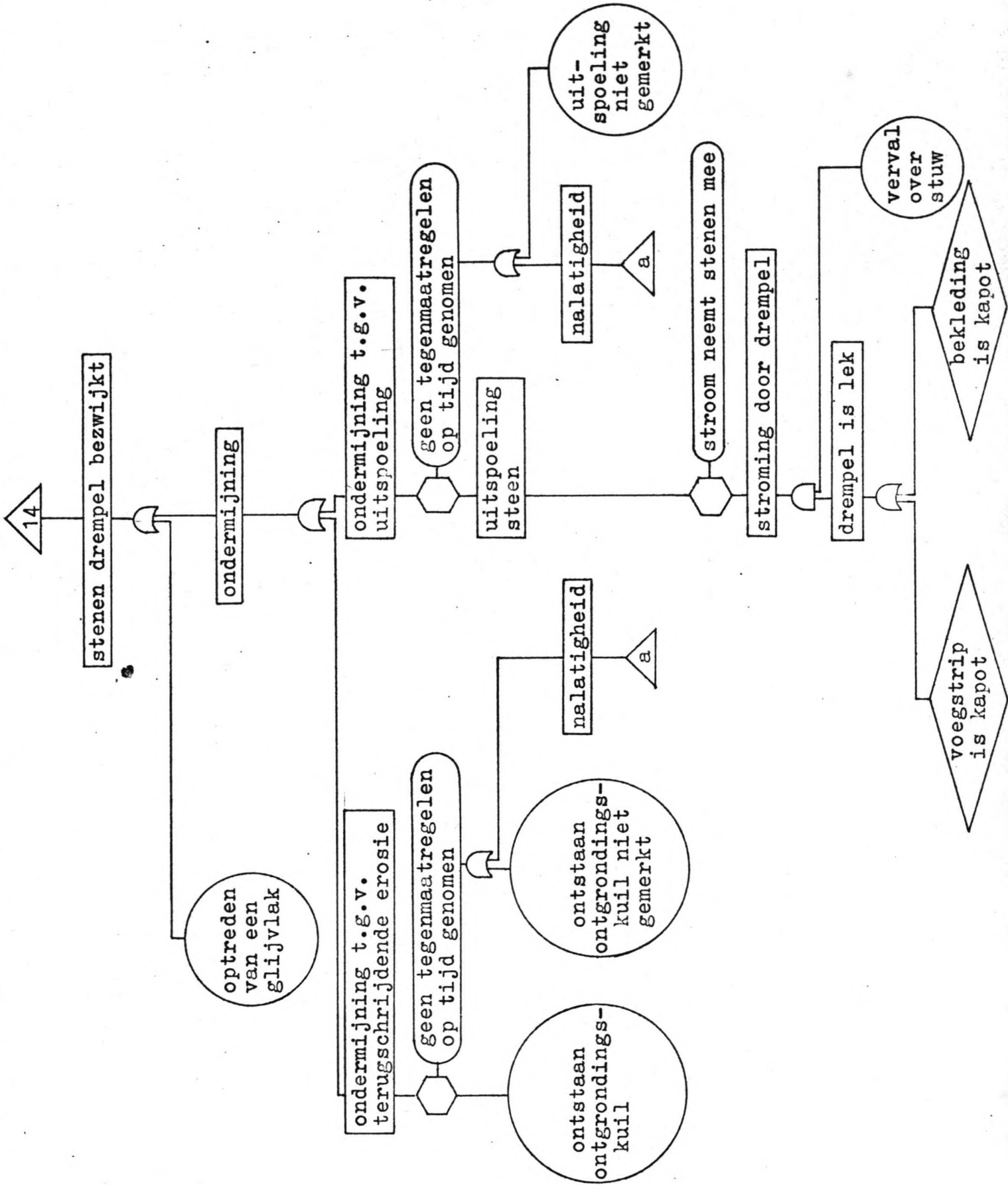
nat seizoen

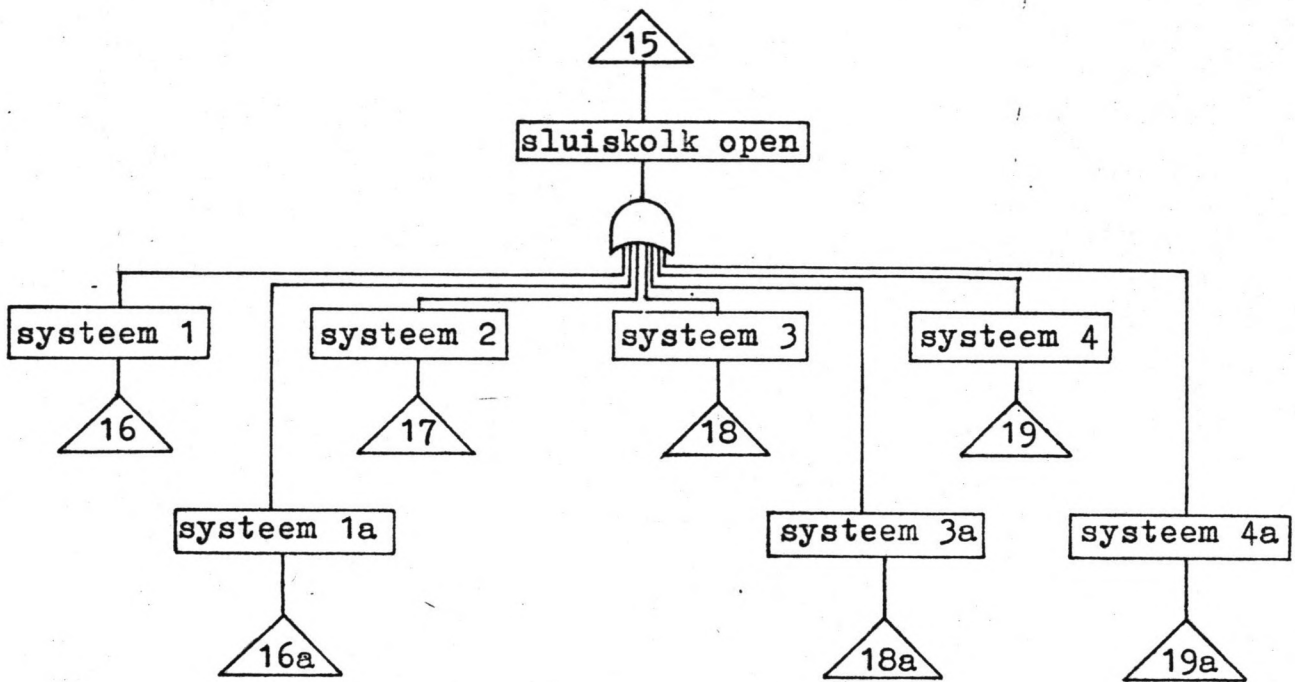
$h_2 < 135^+$

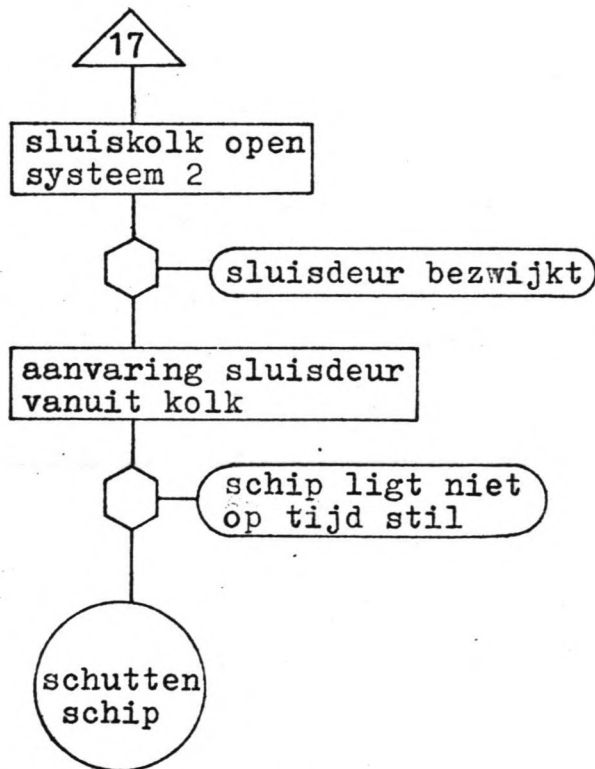
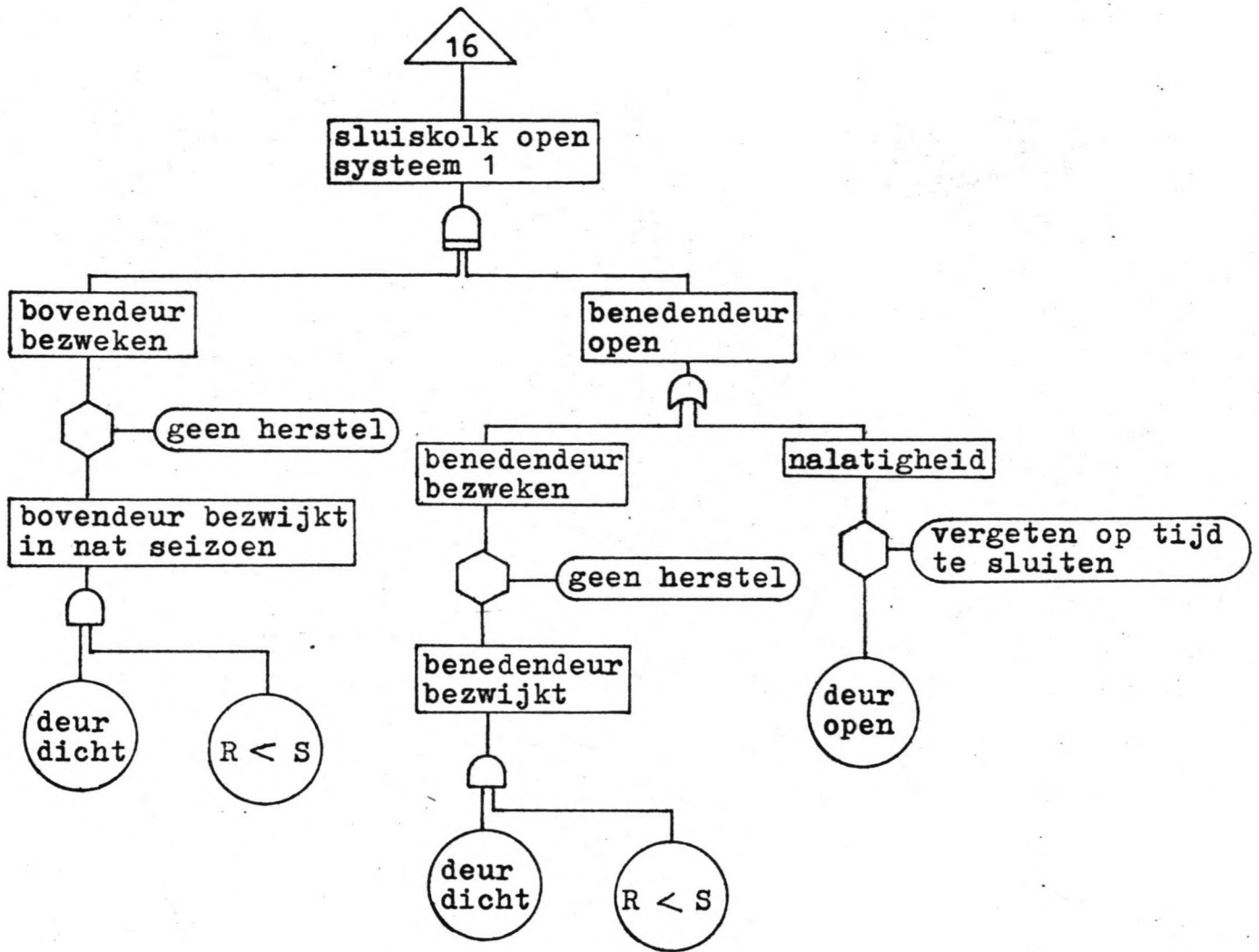
geen tijd voor reparatie





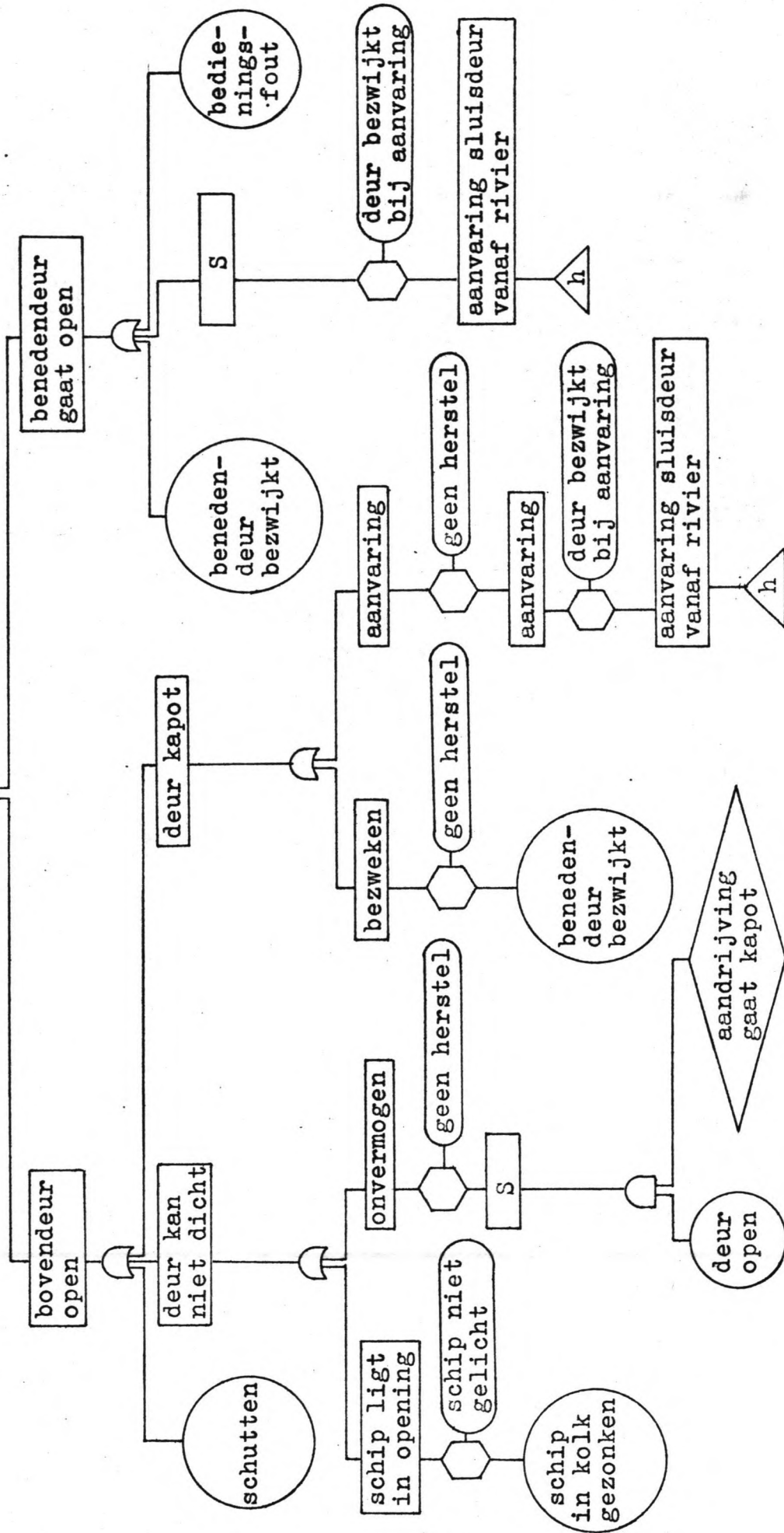


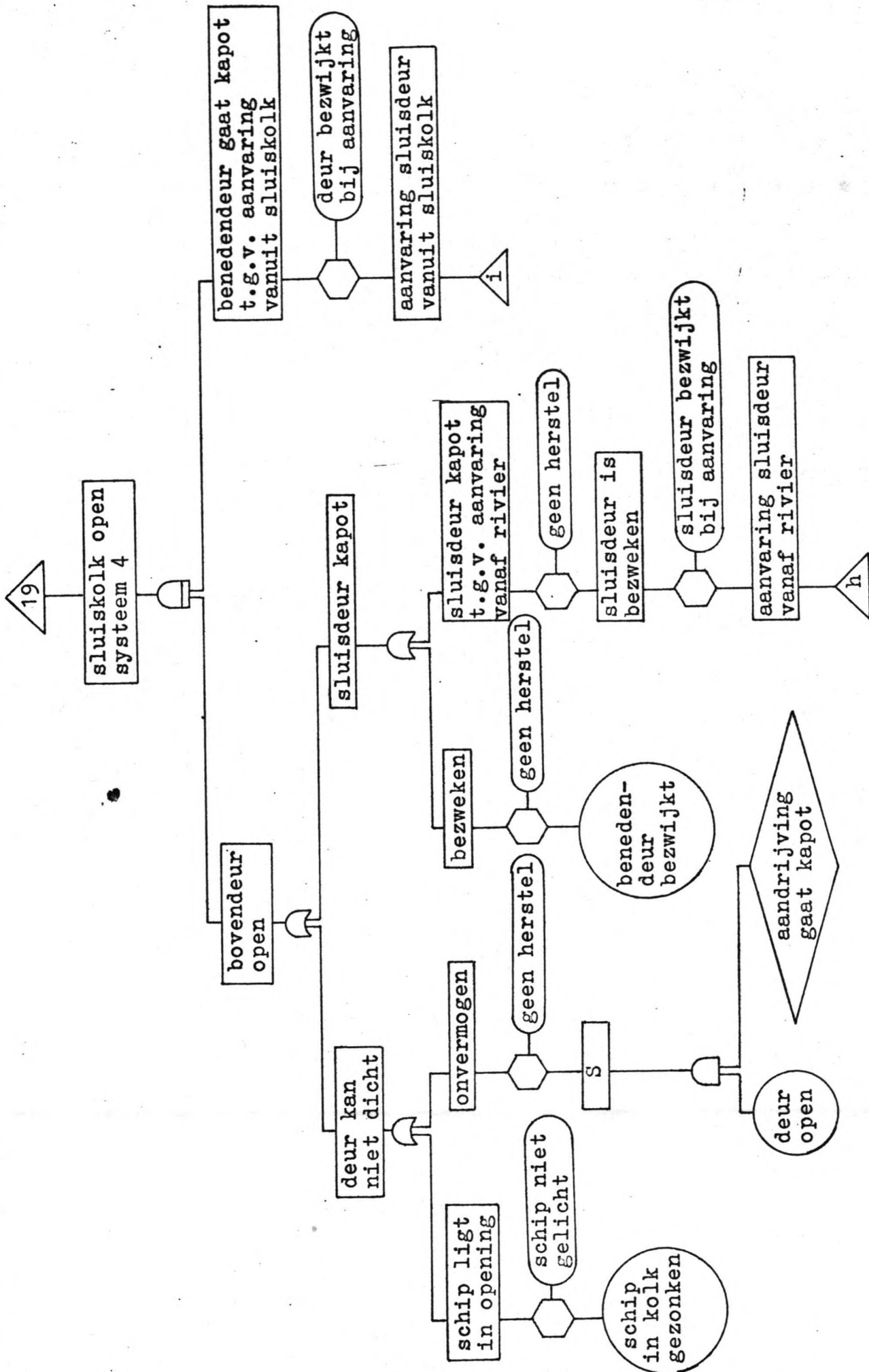


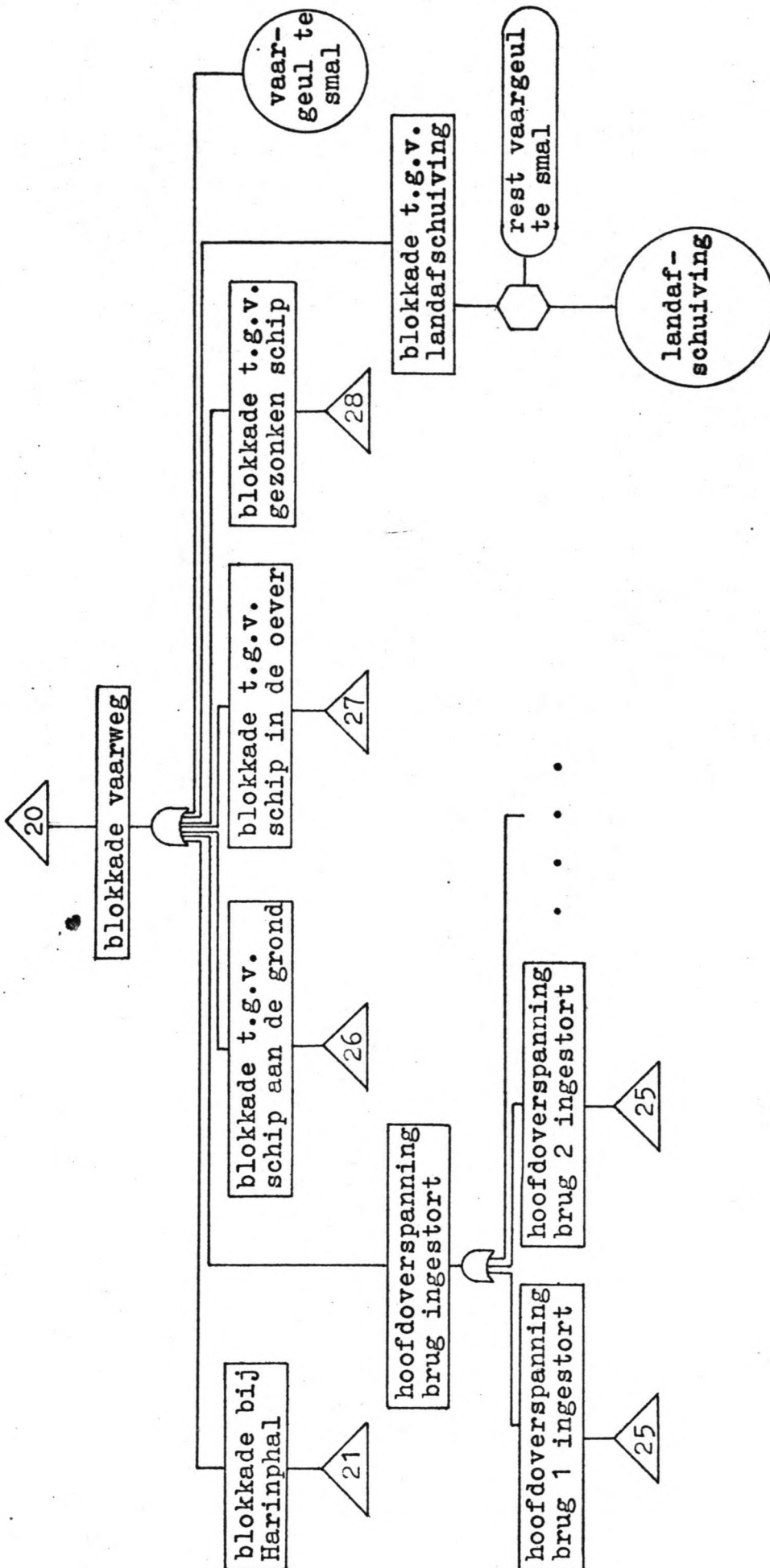


18

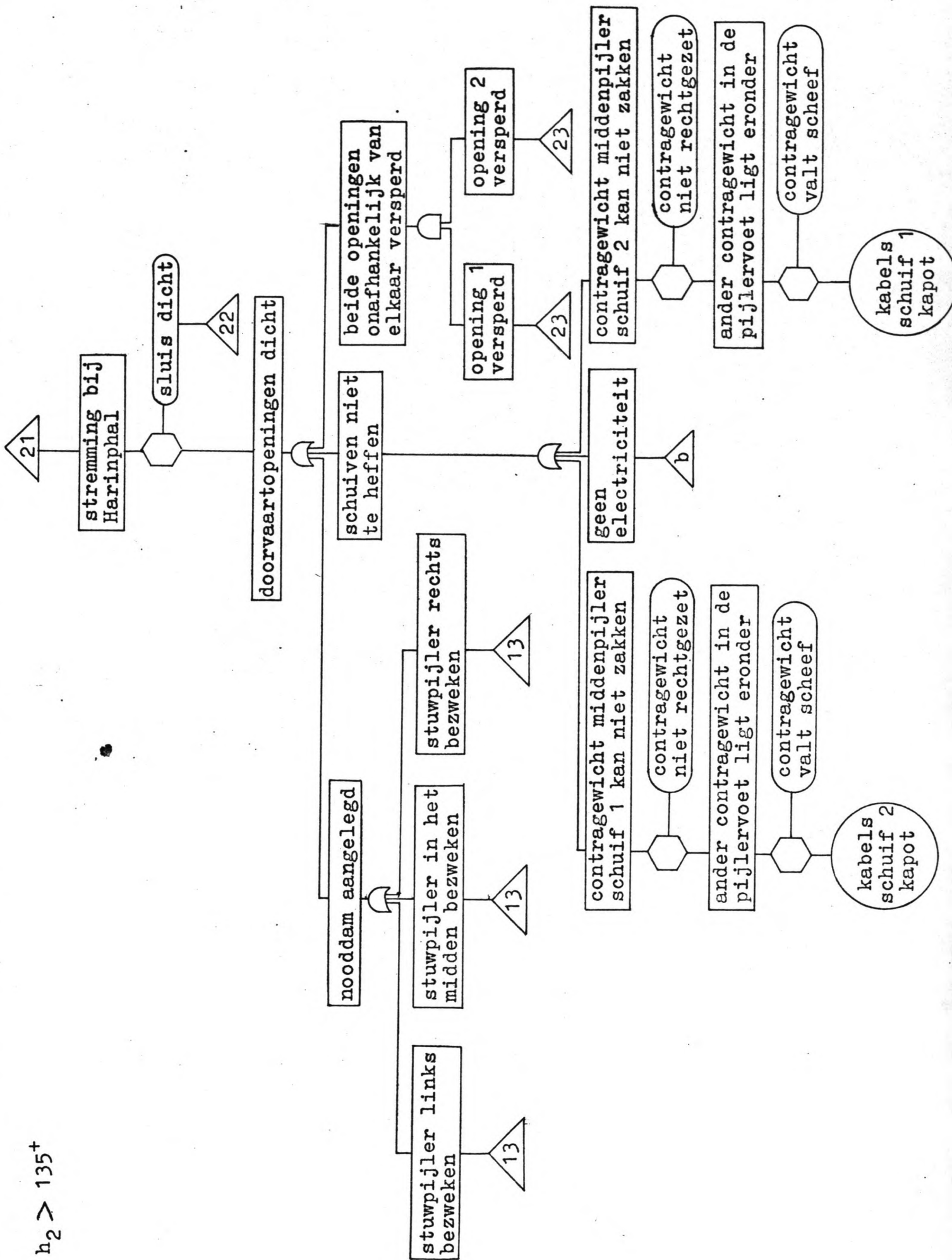
sluiskolk open
systeem 3

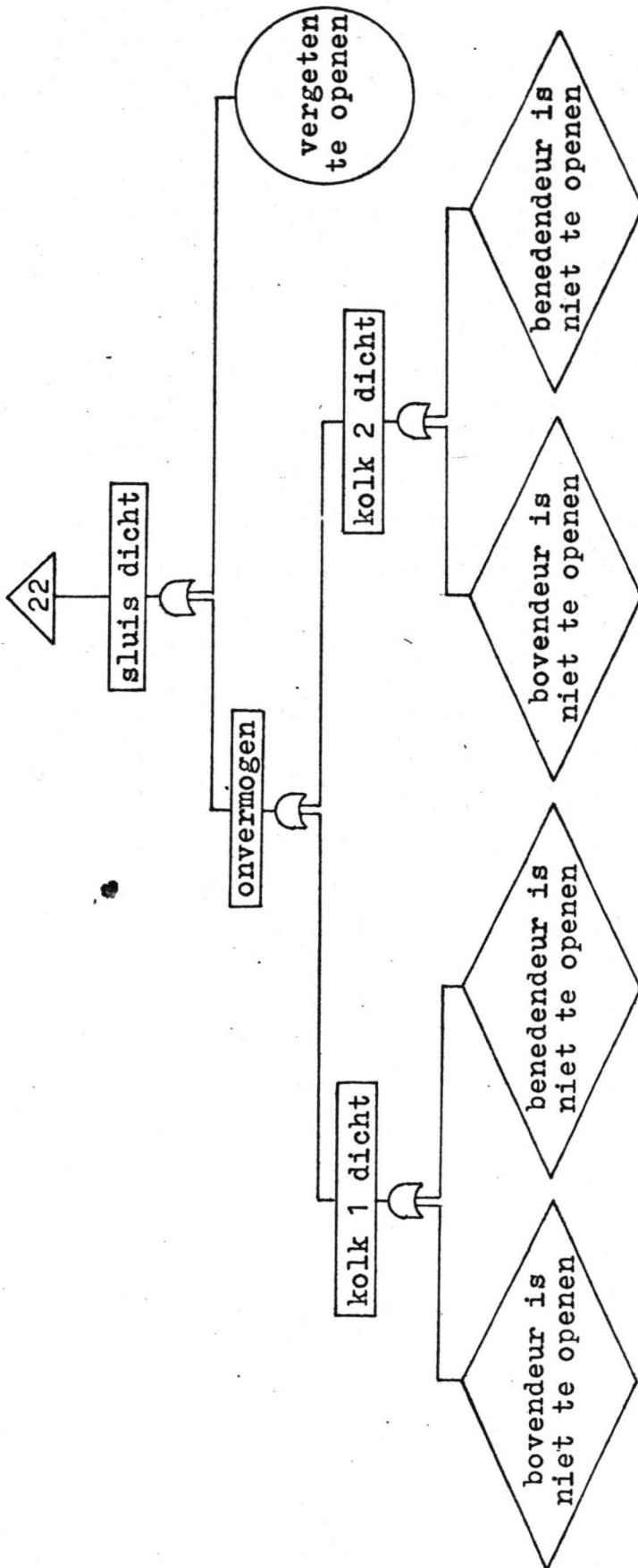


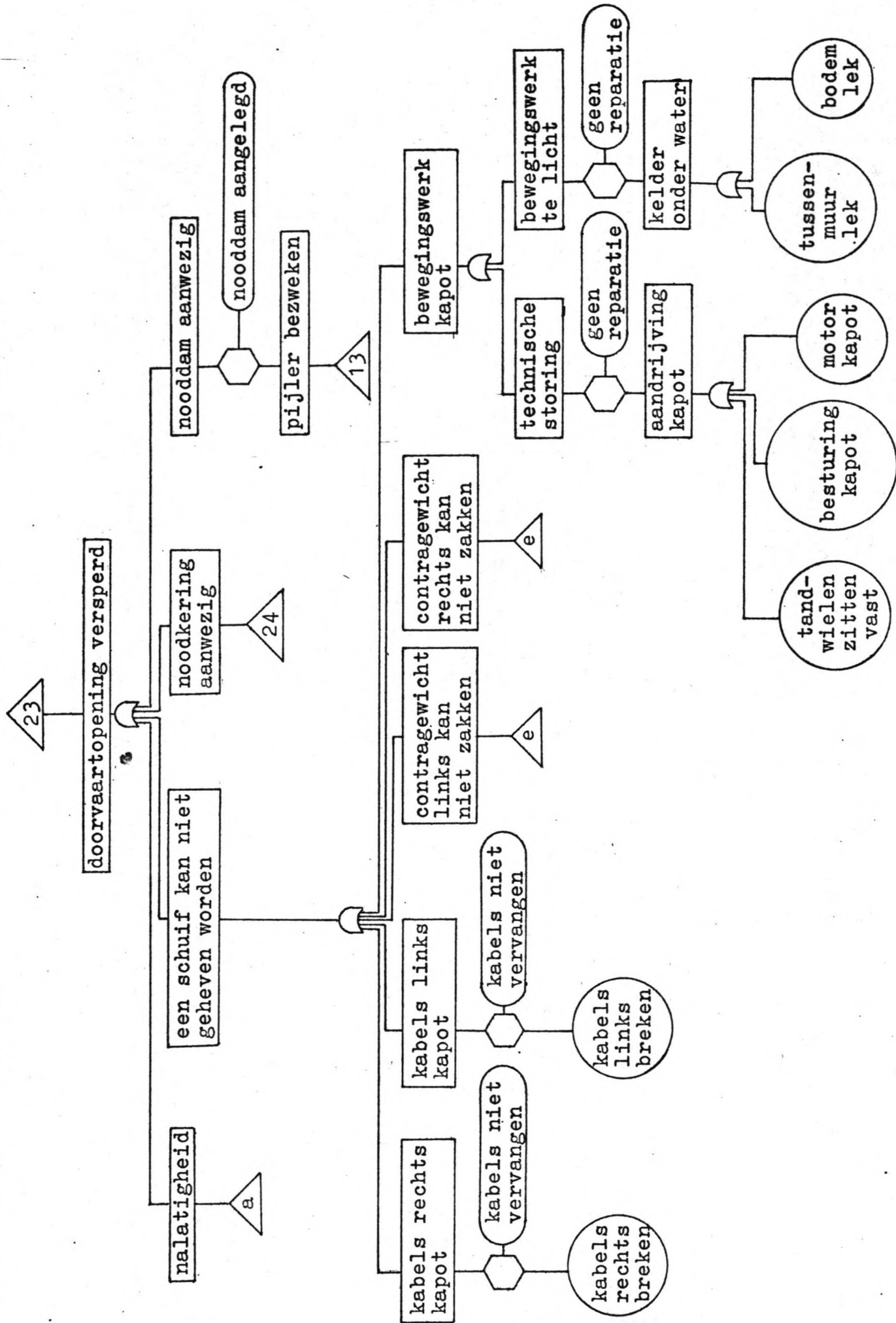


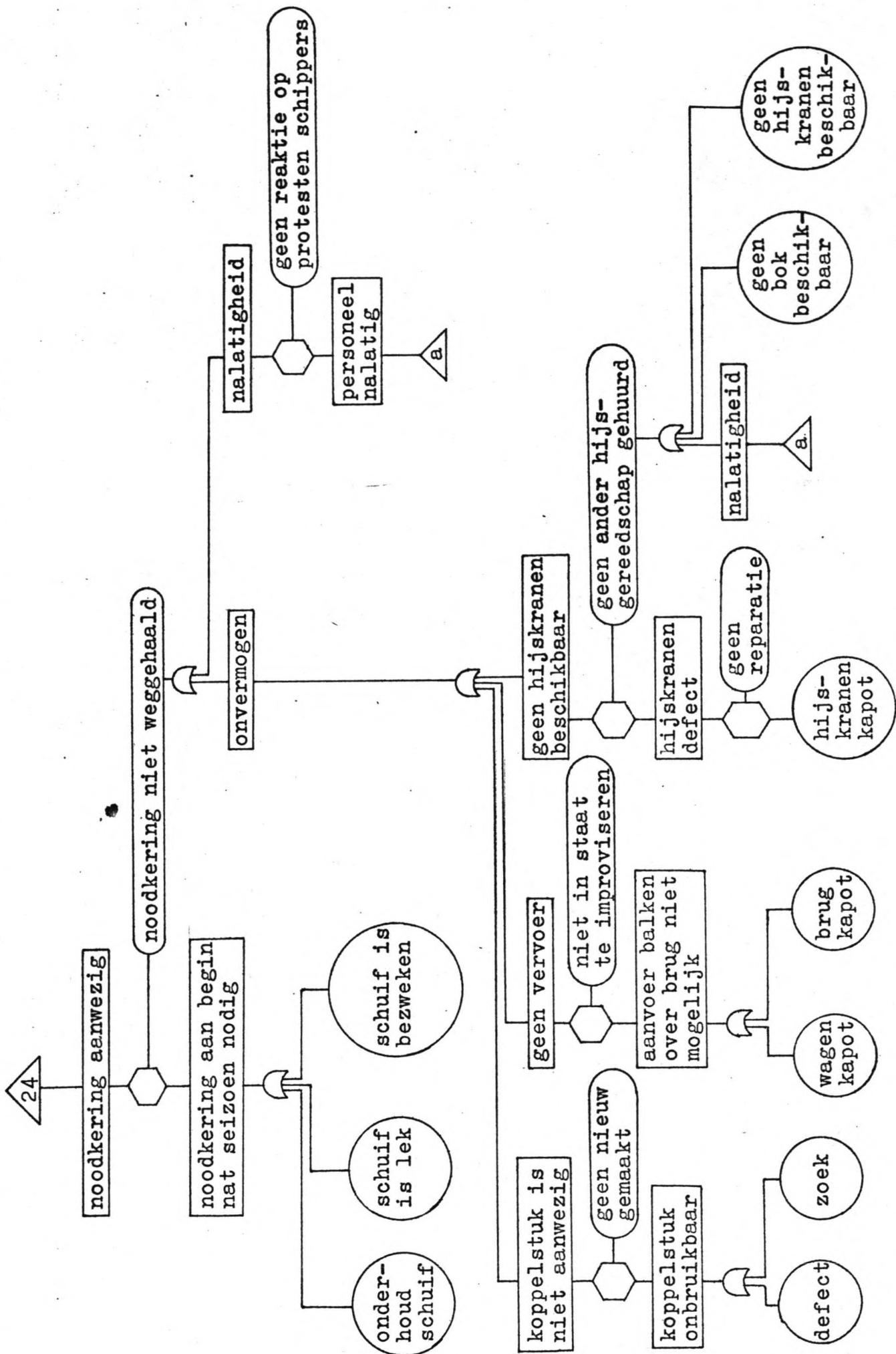


$h_2 > 135^+$

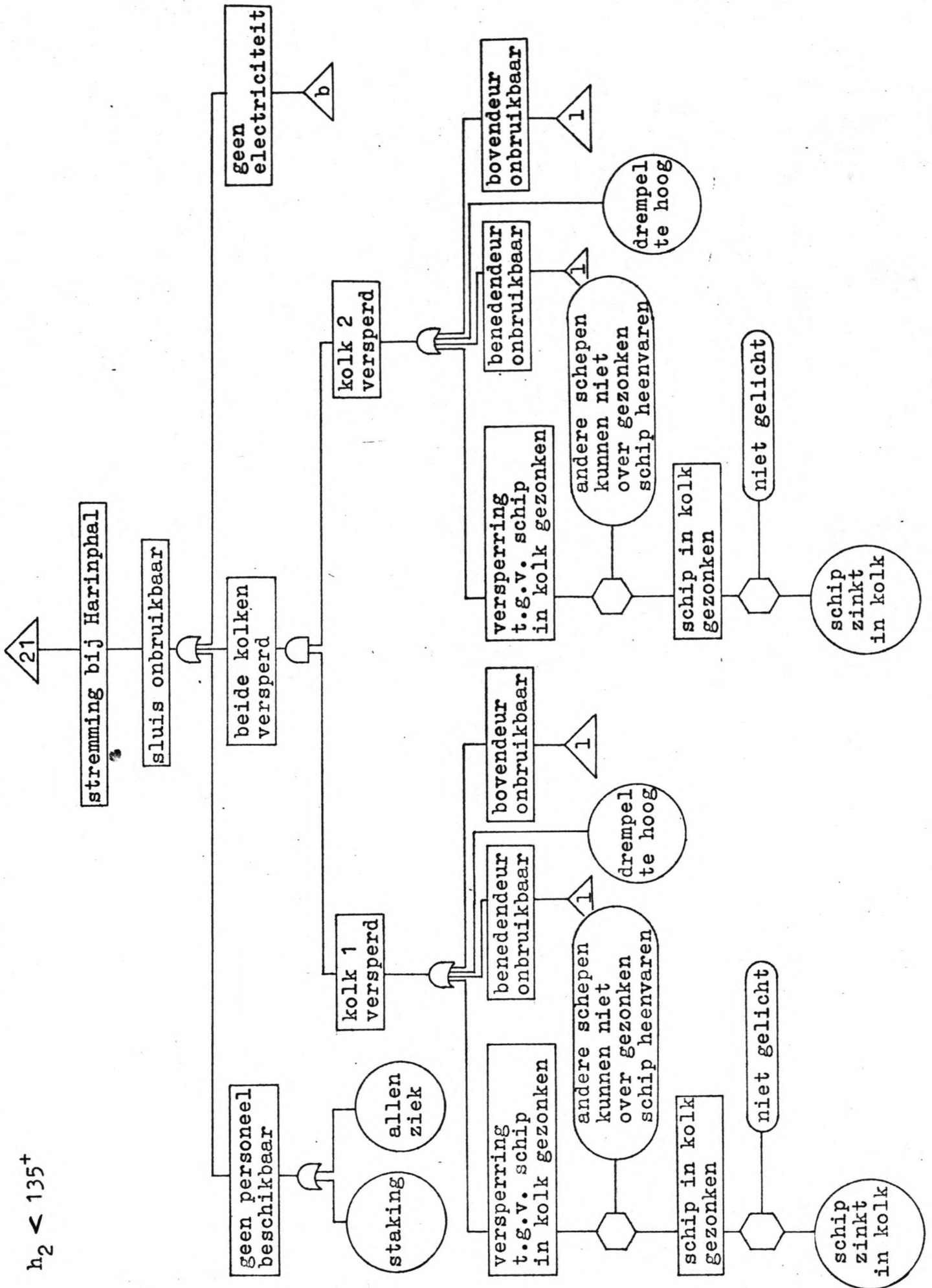


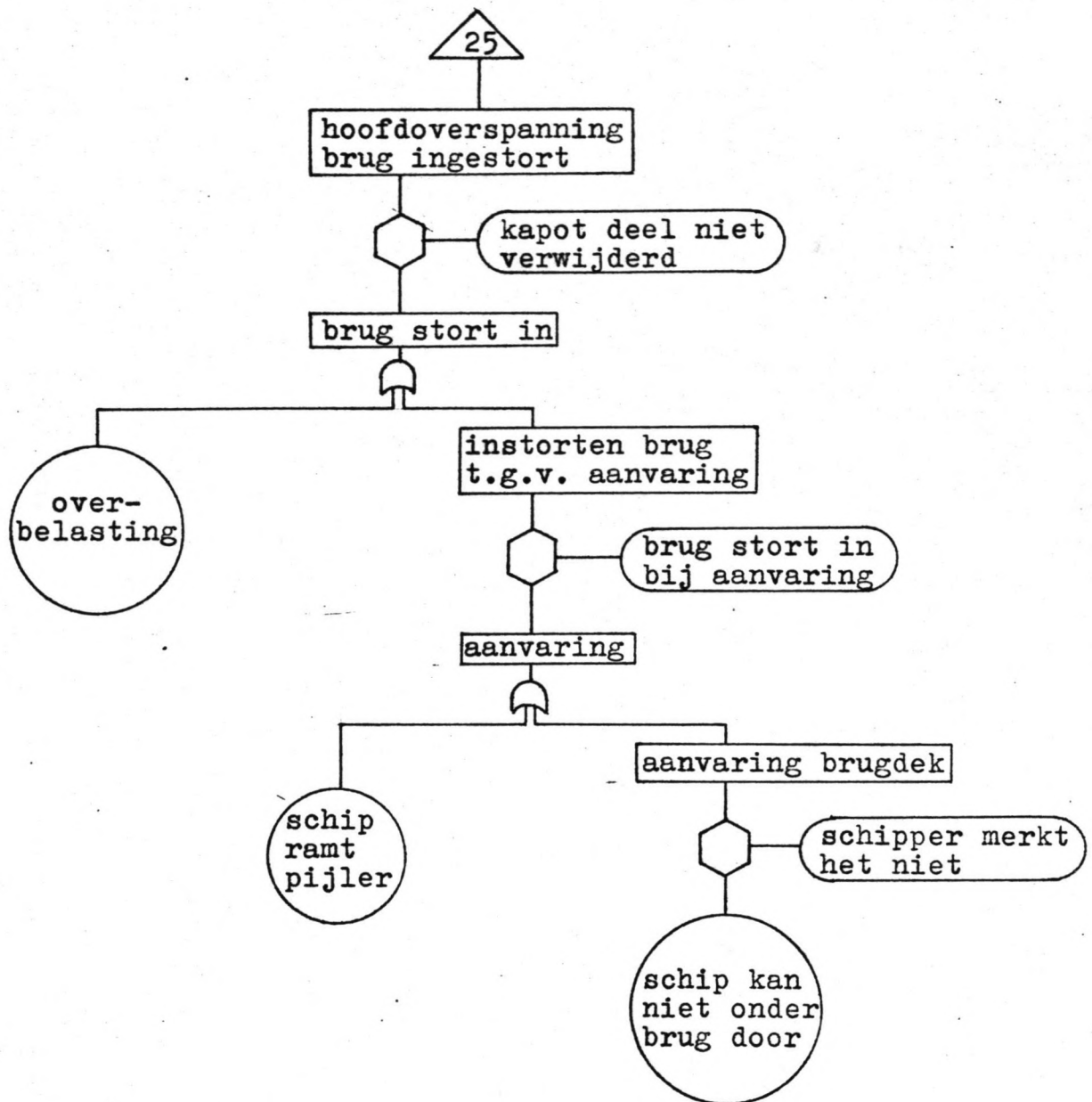


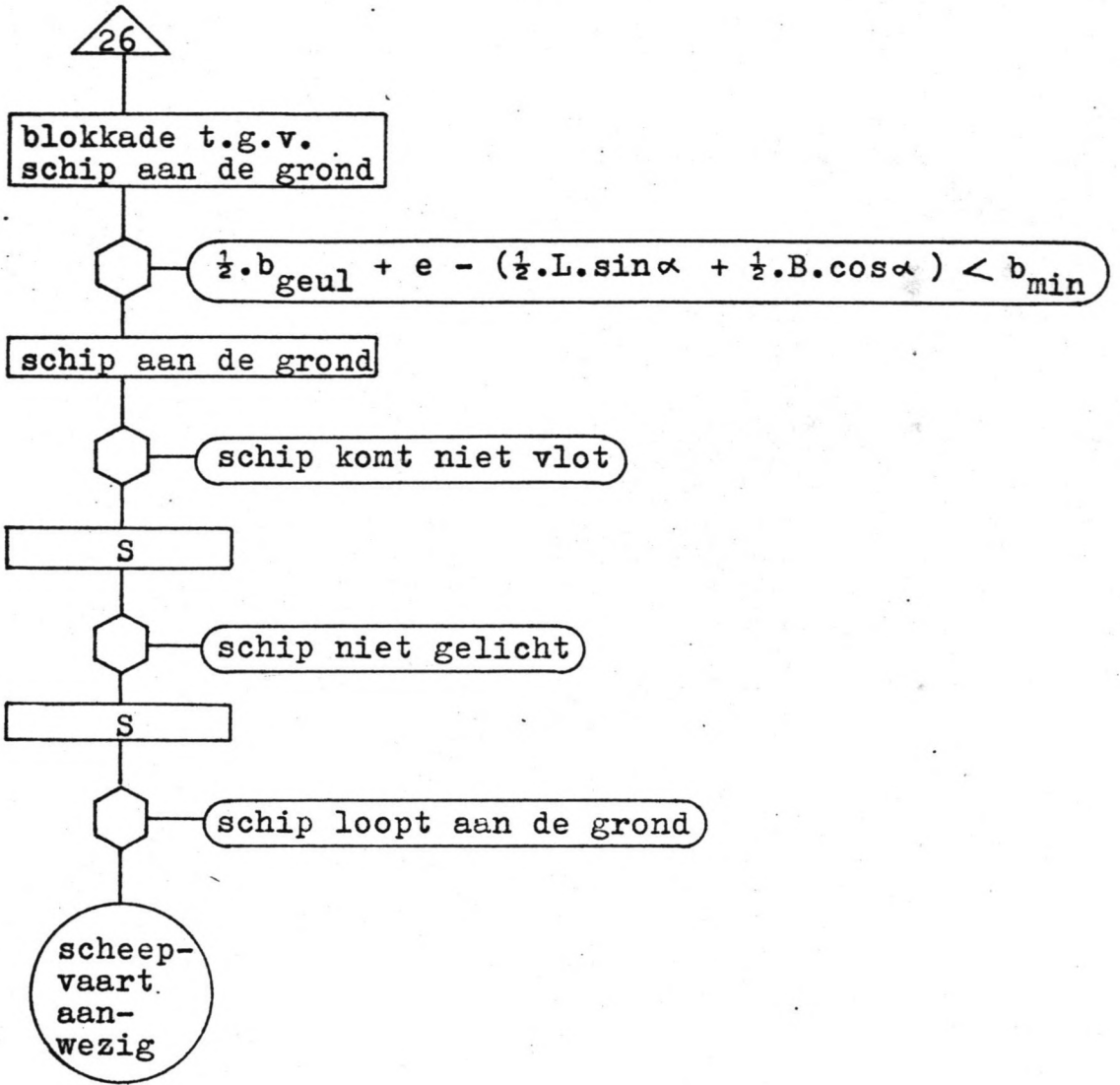


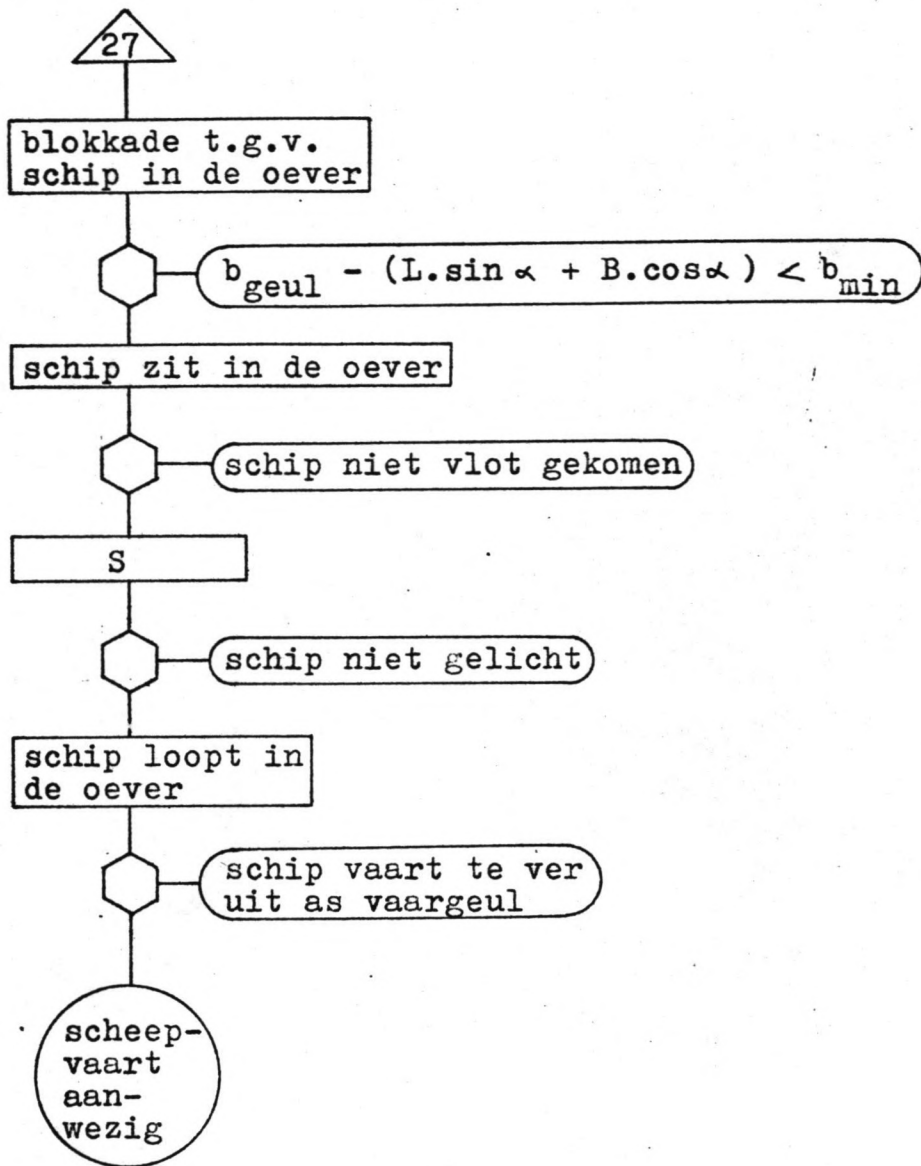


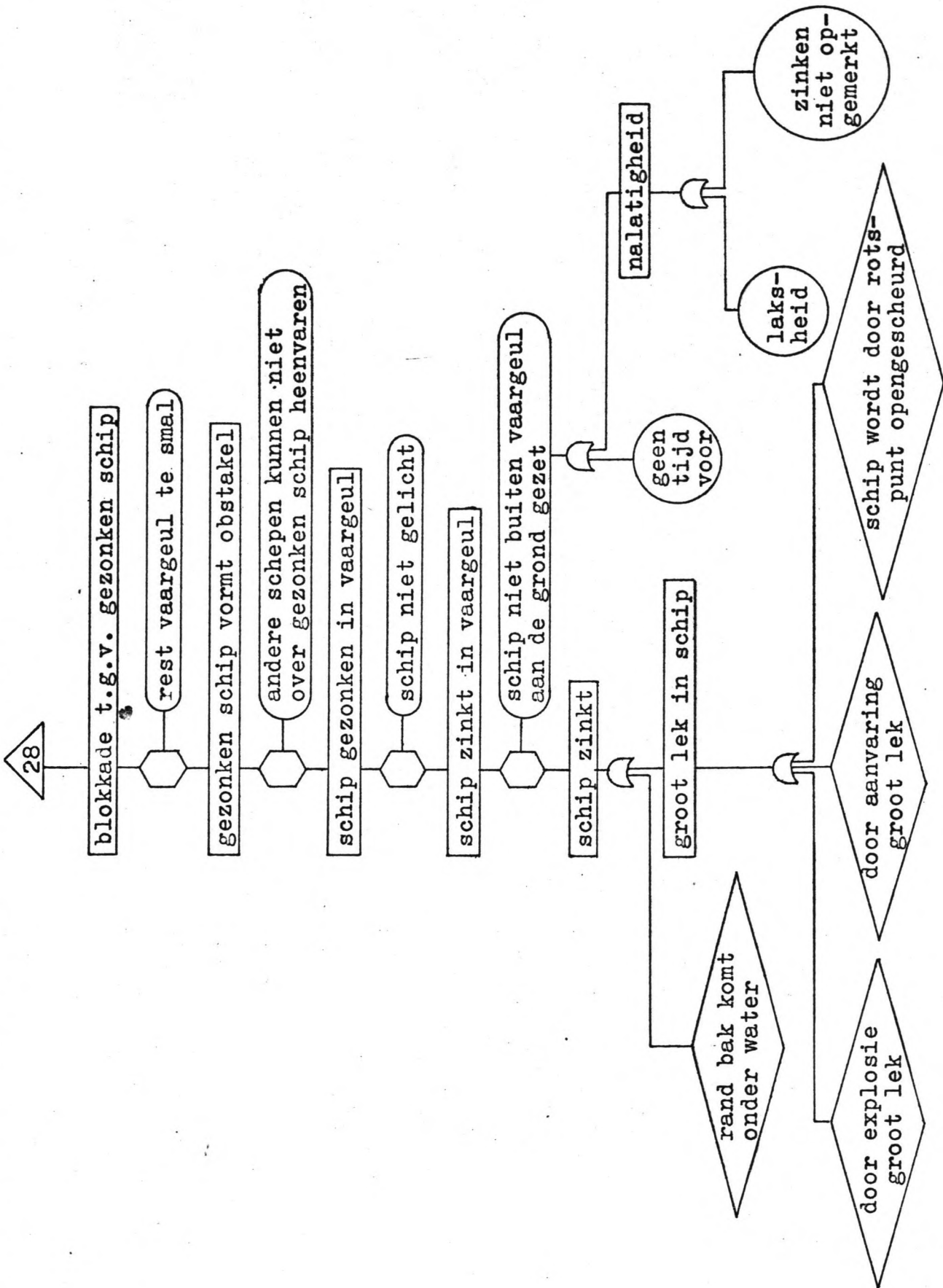
$h_2 < 135^+$

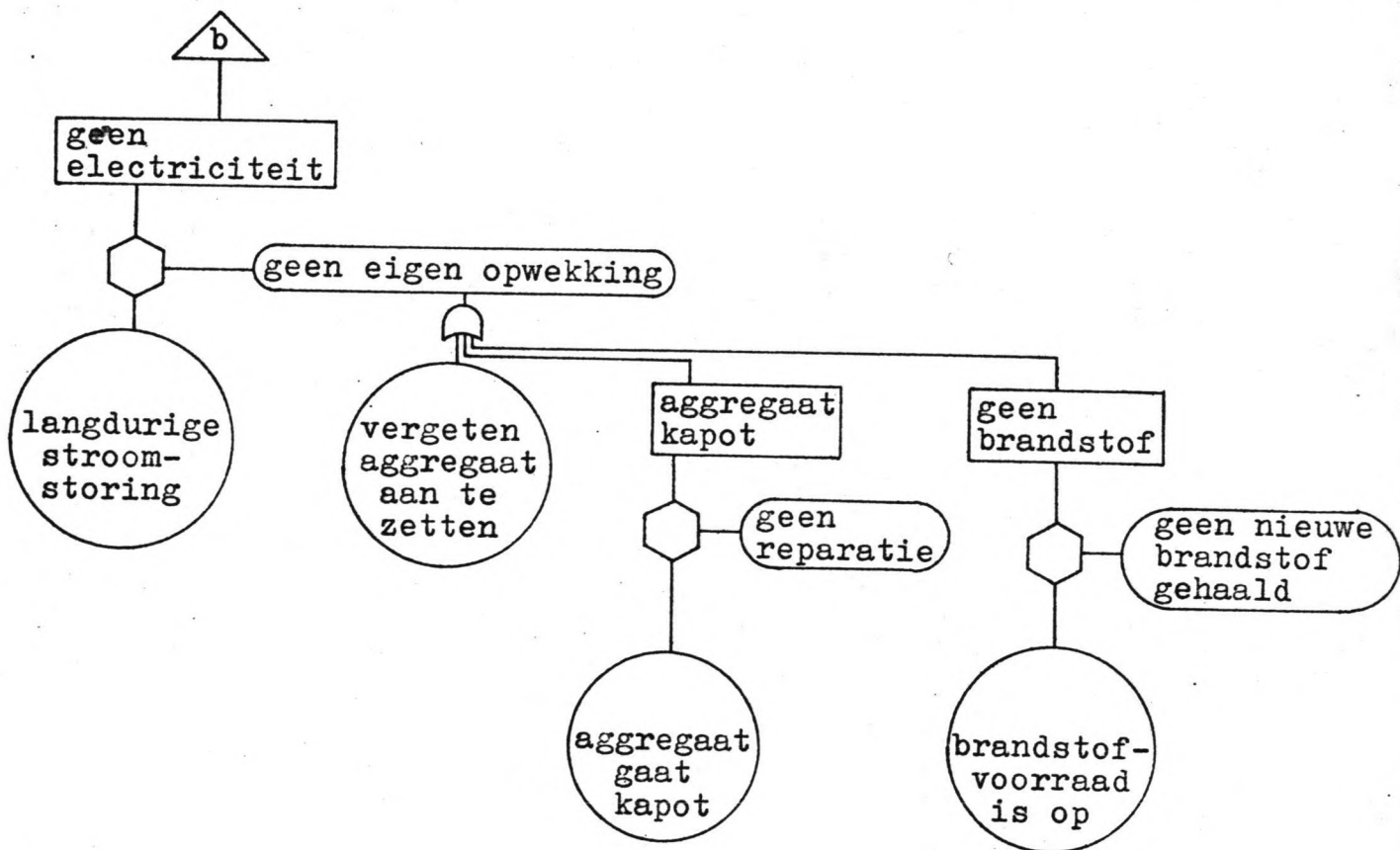
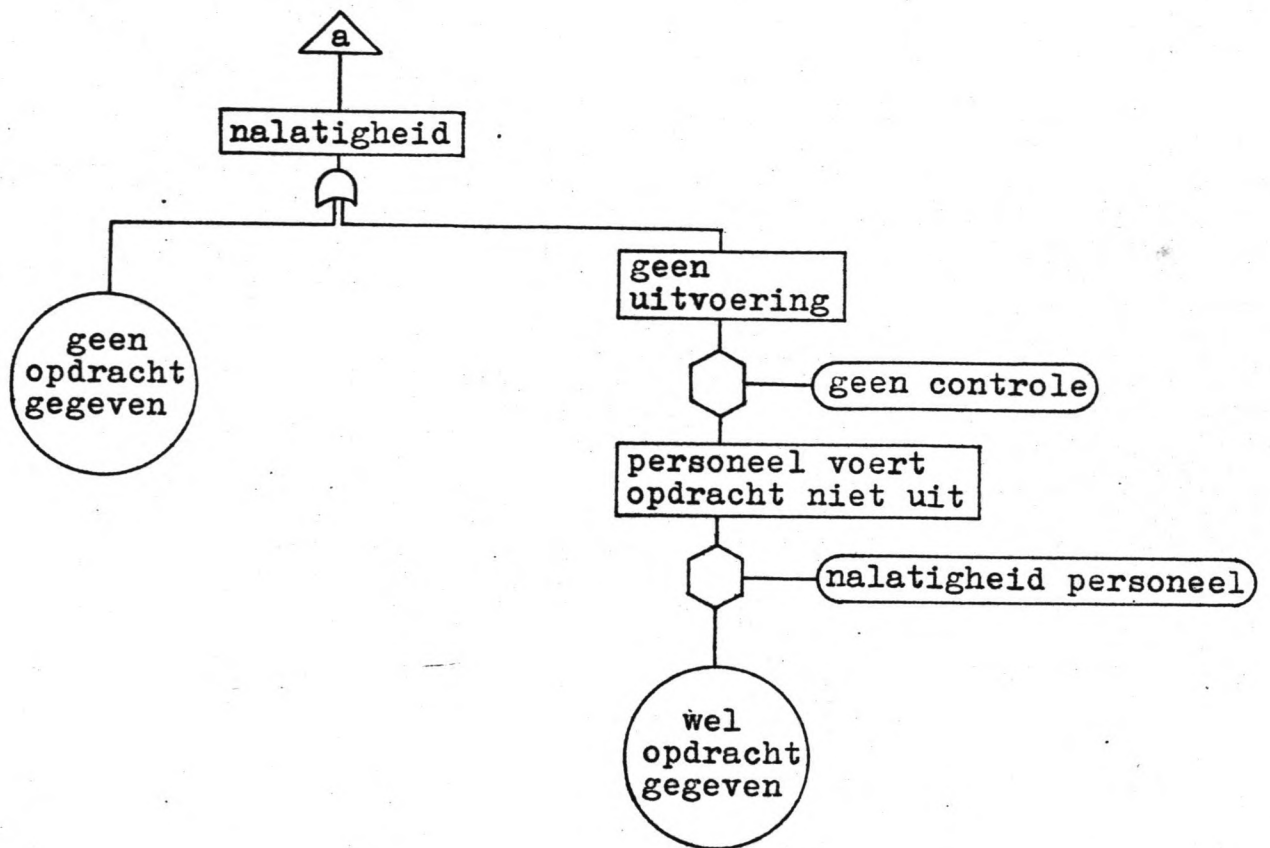


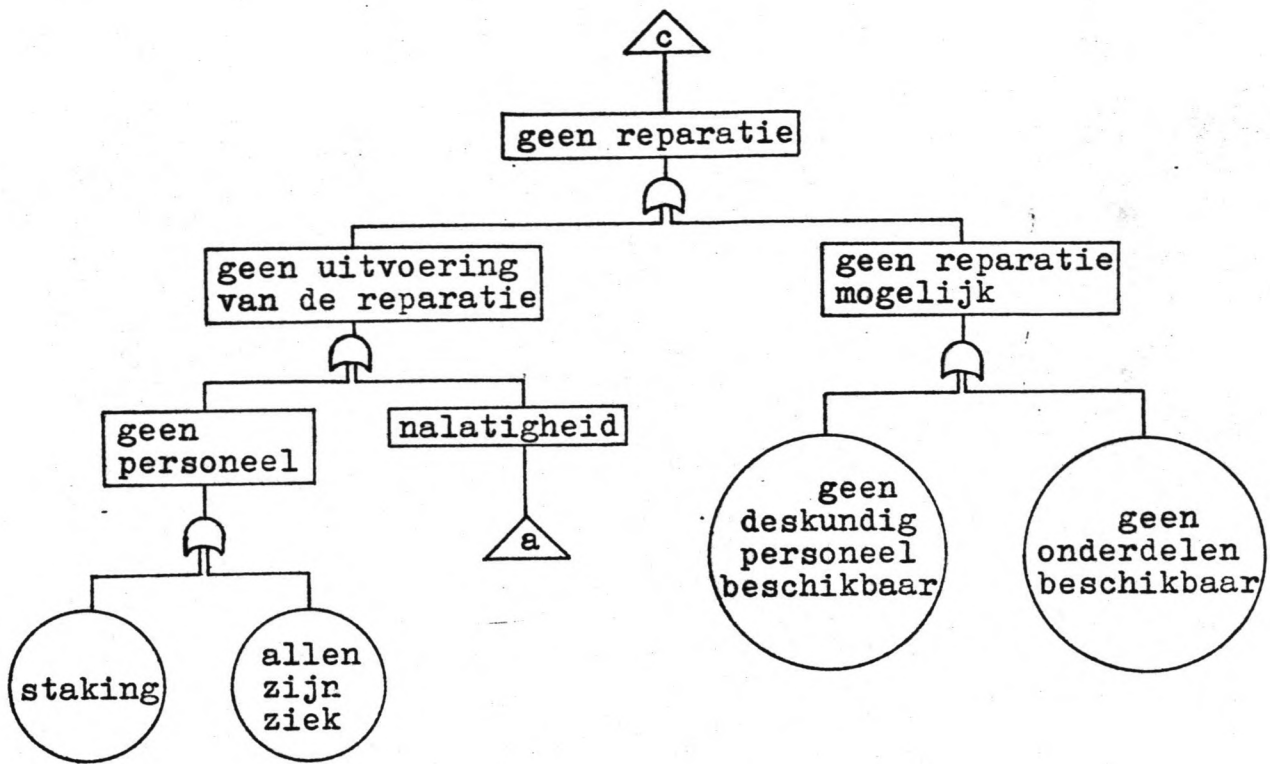




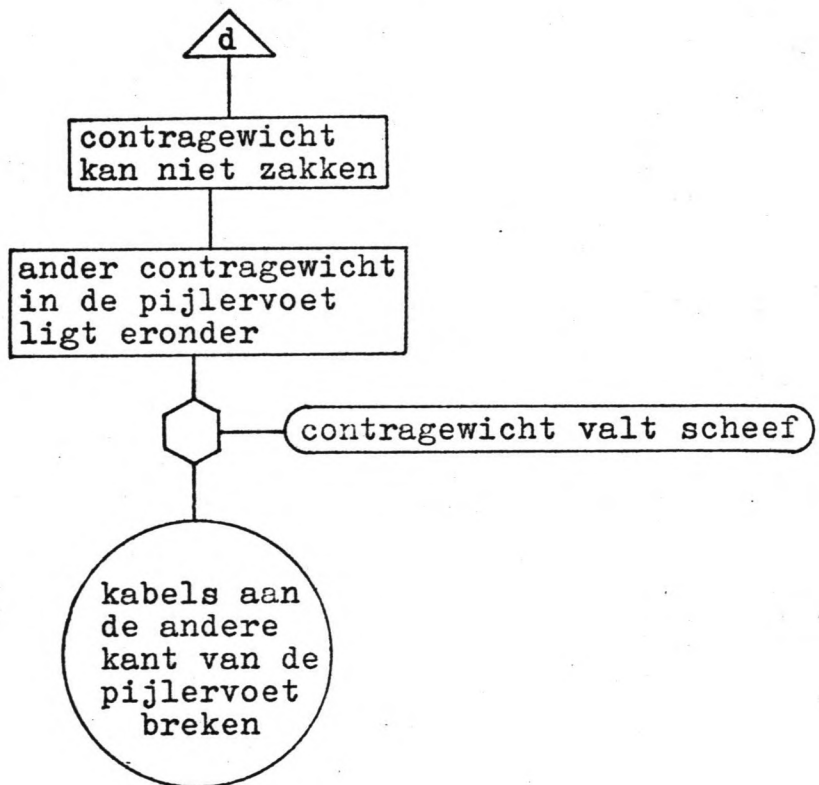




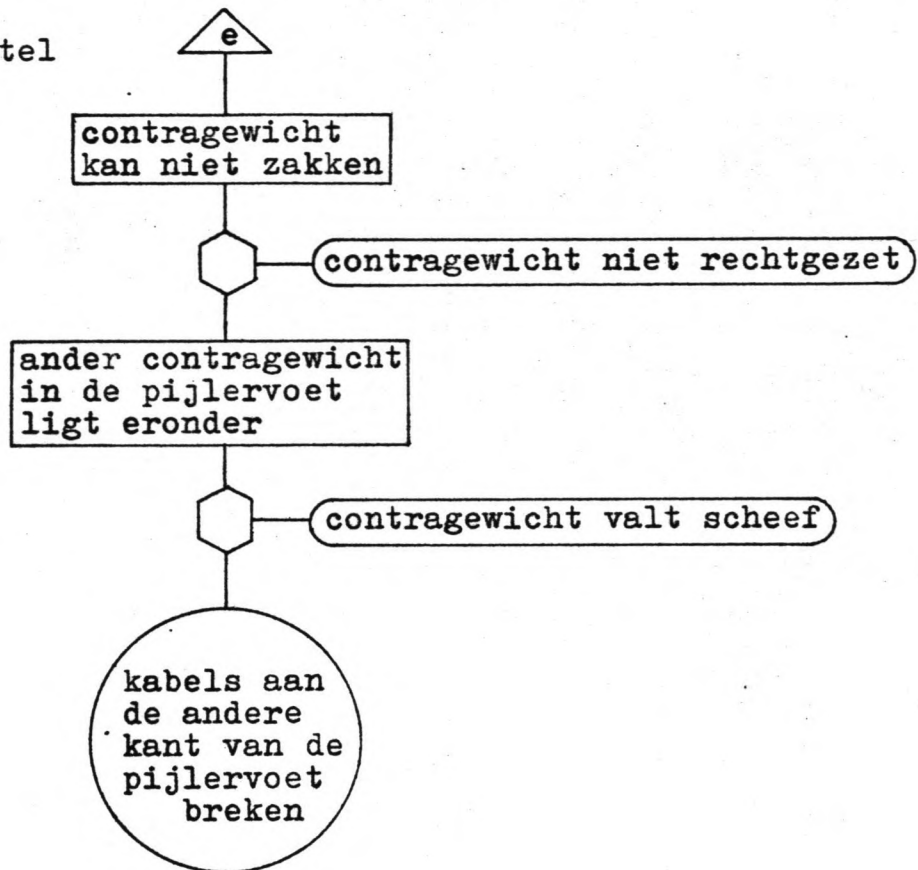




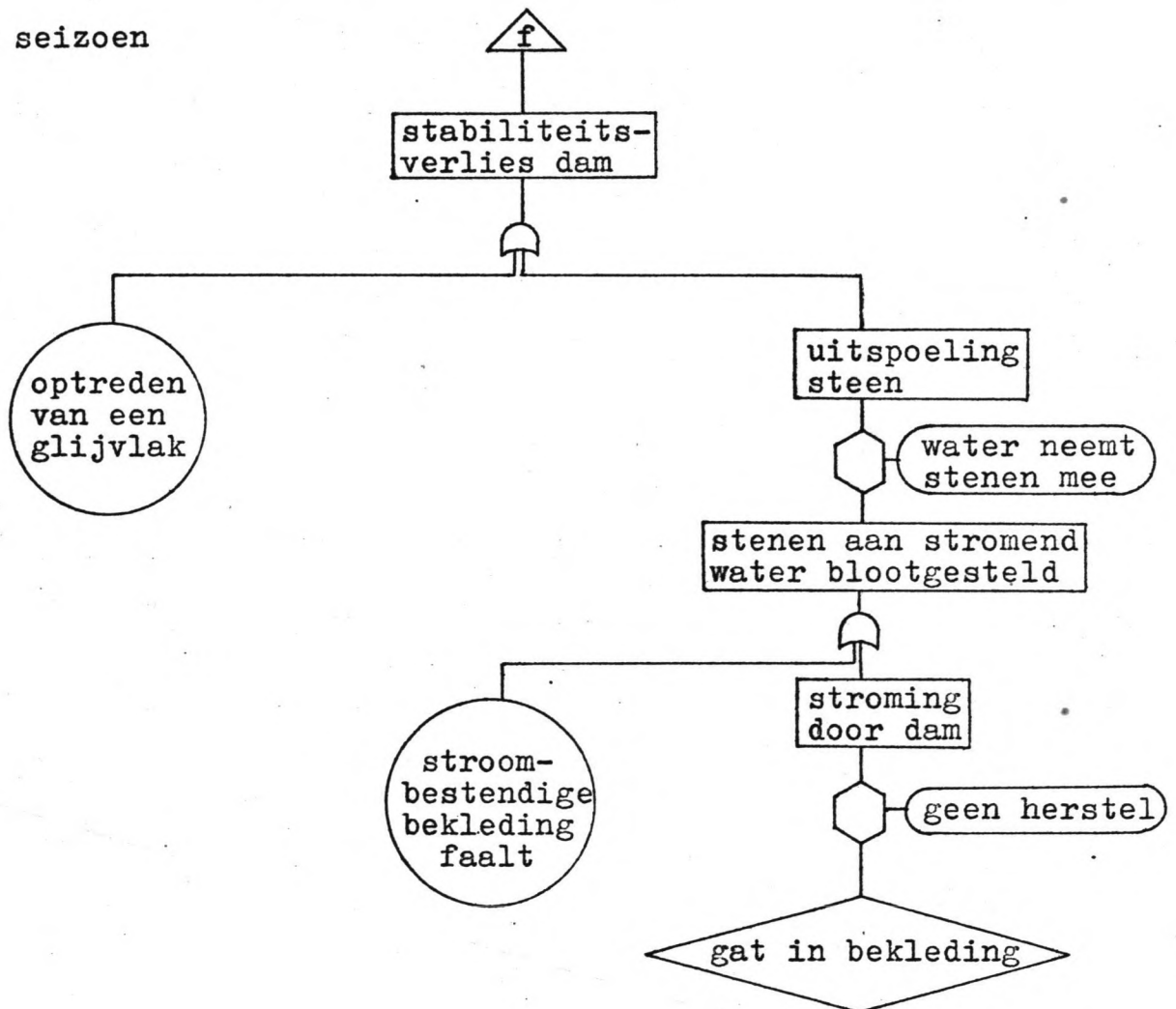
geen tijd
voor herstel



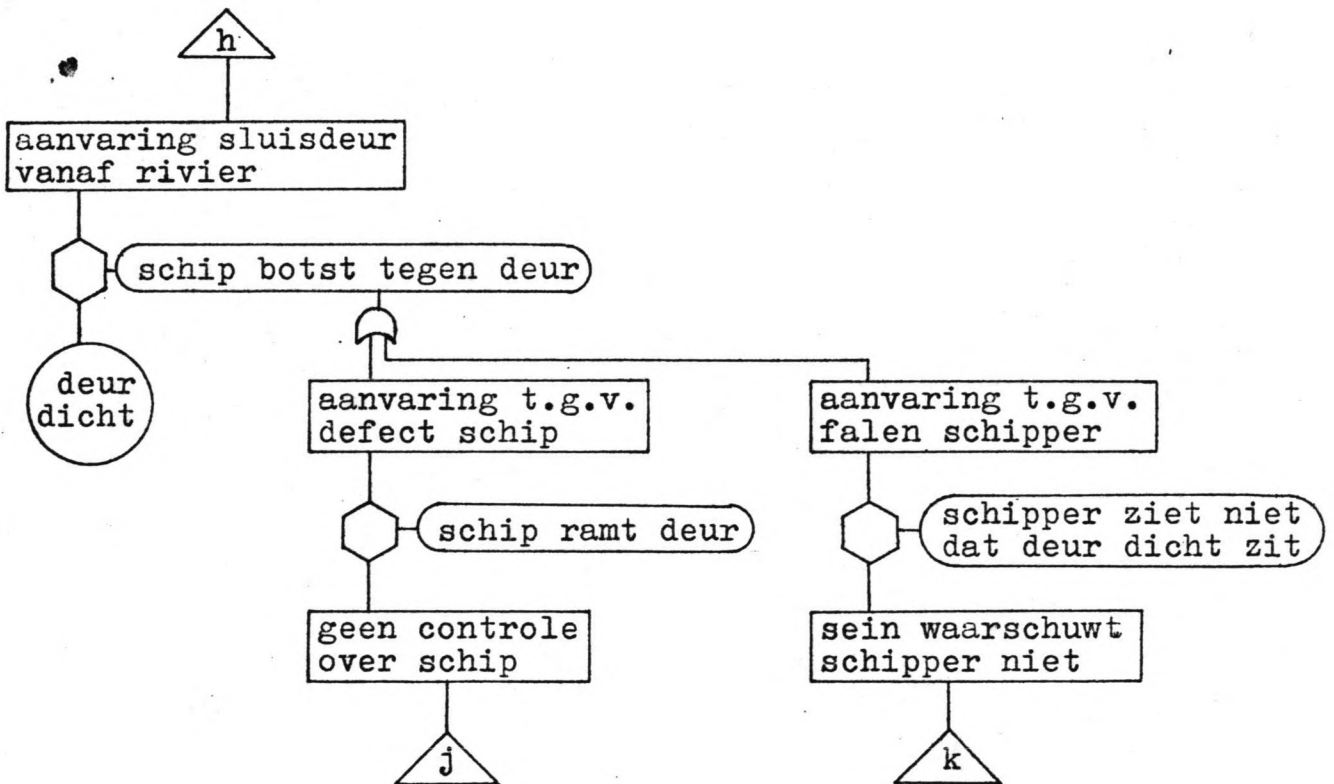
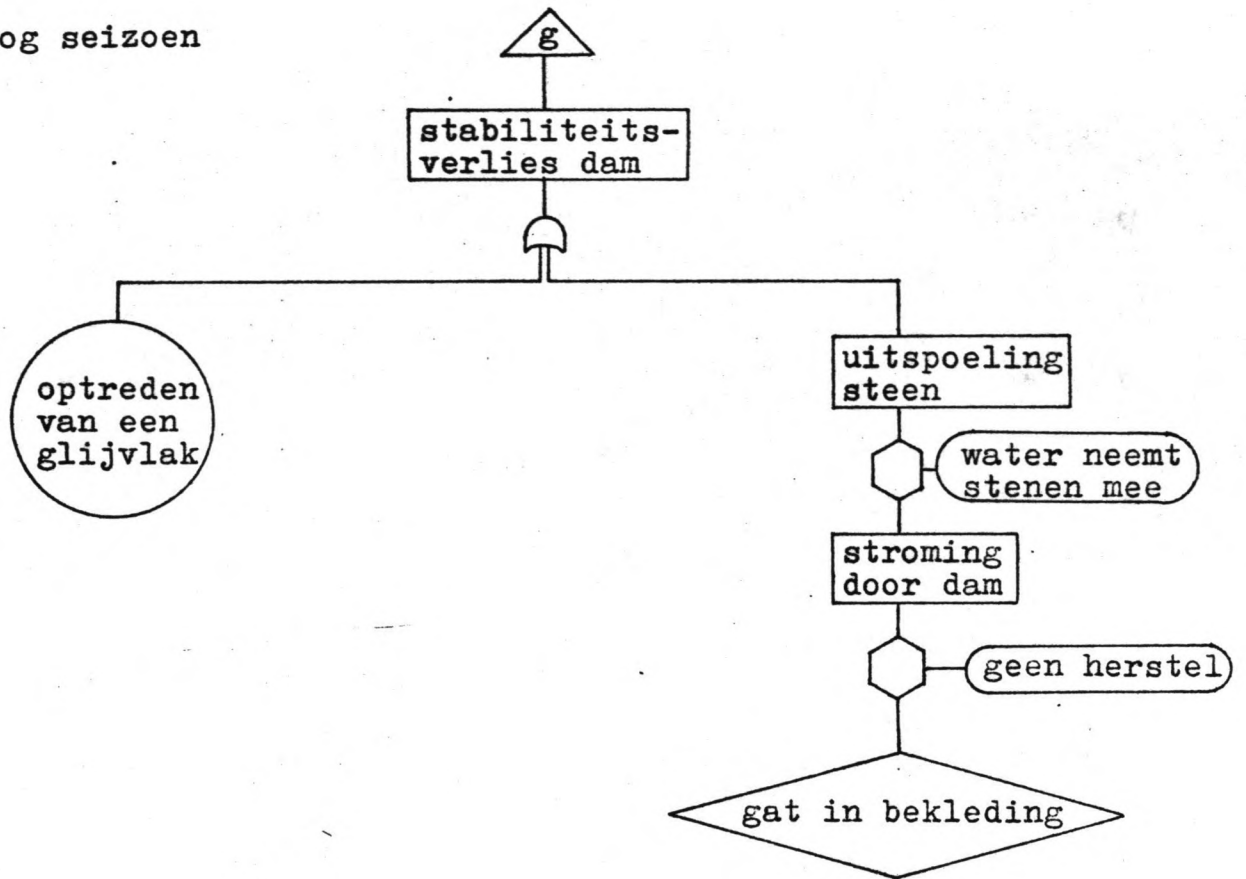
wel tijd
voor herstel

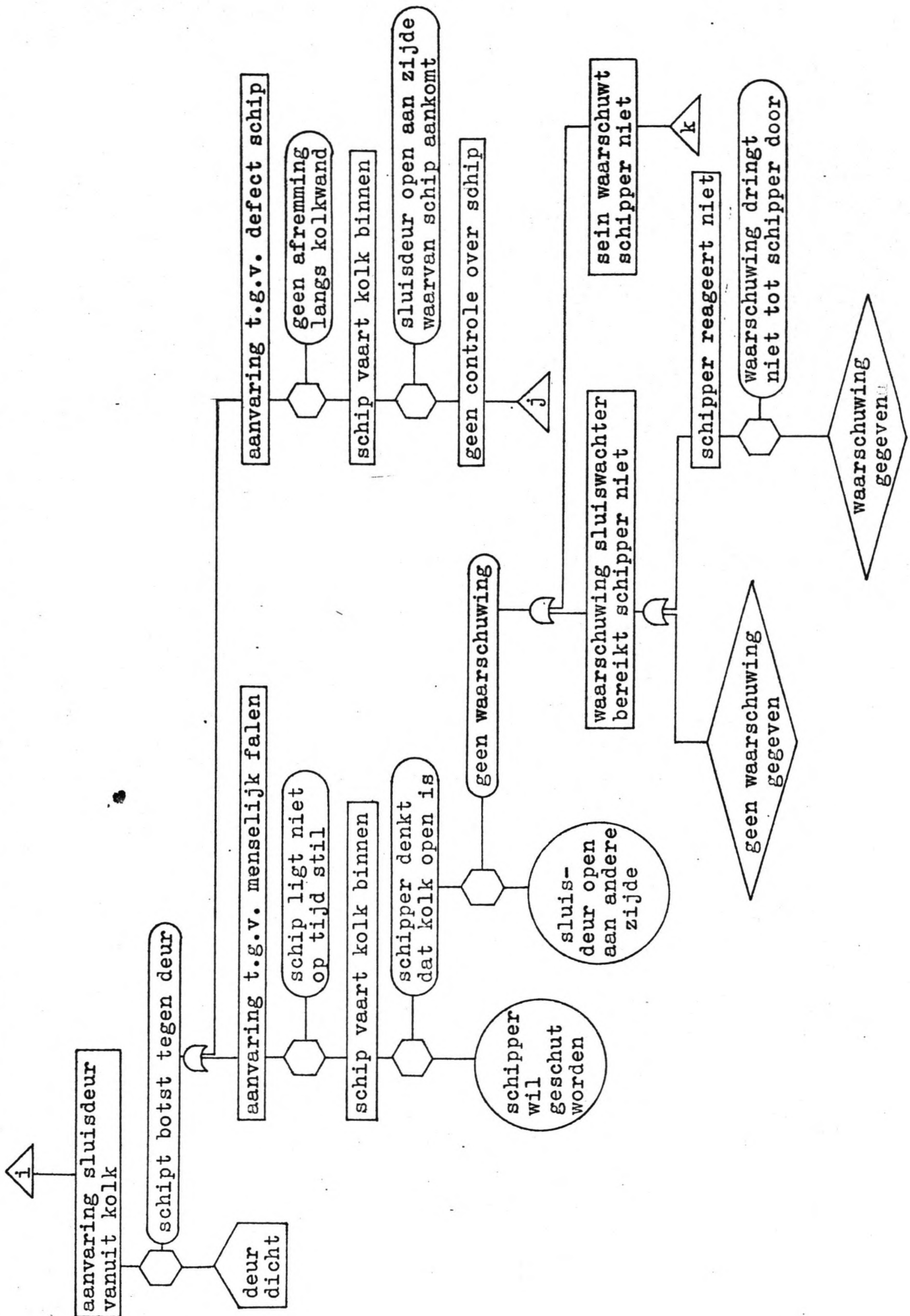


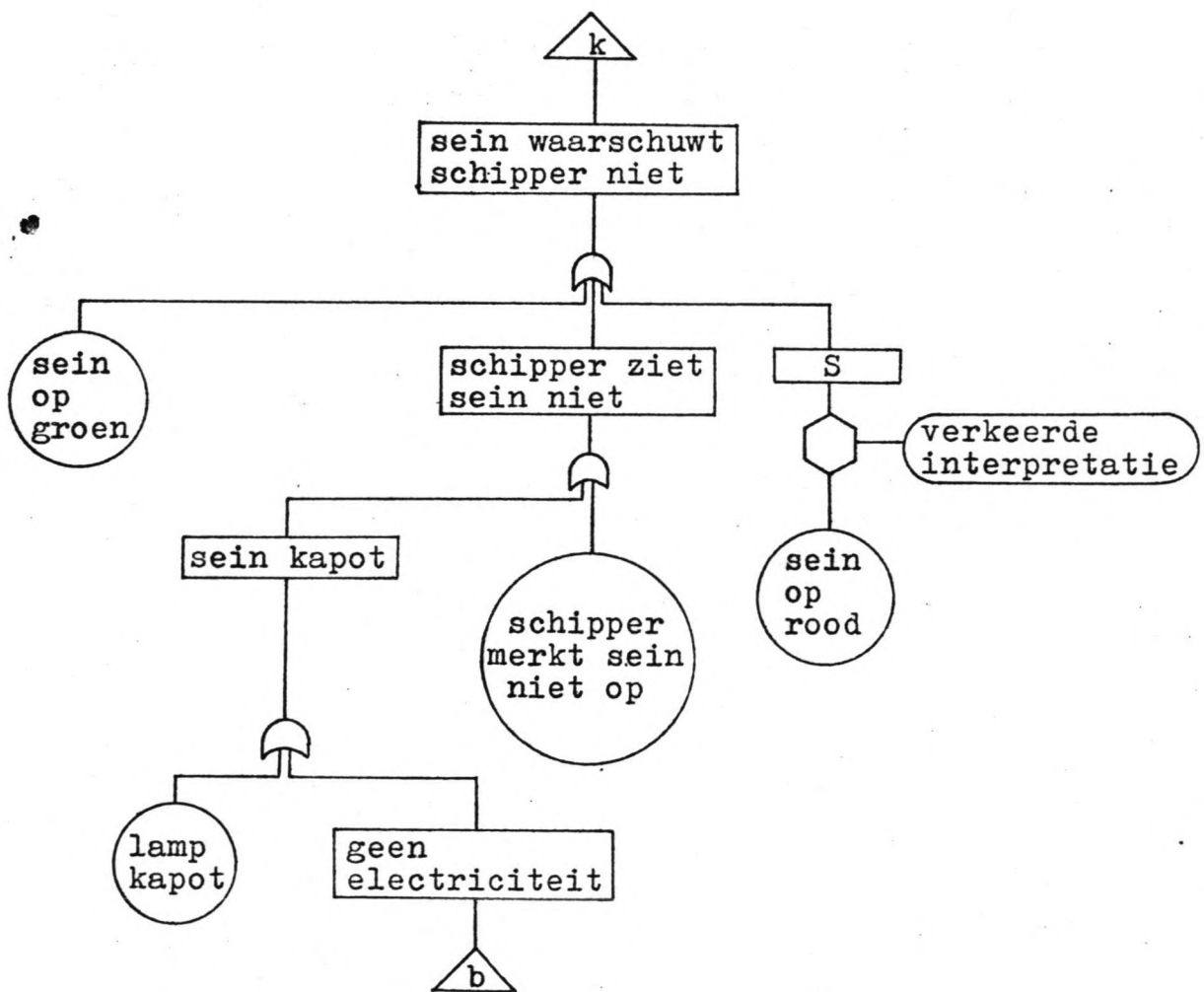
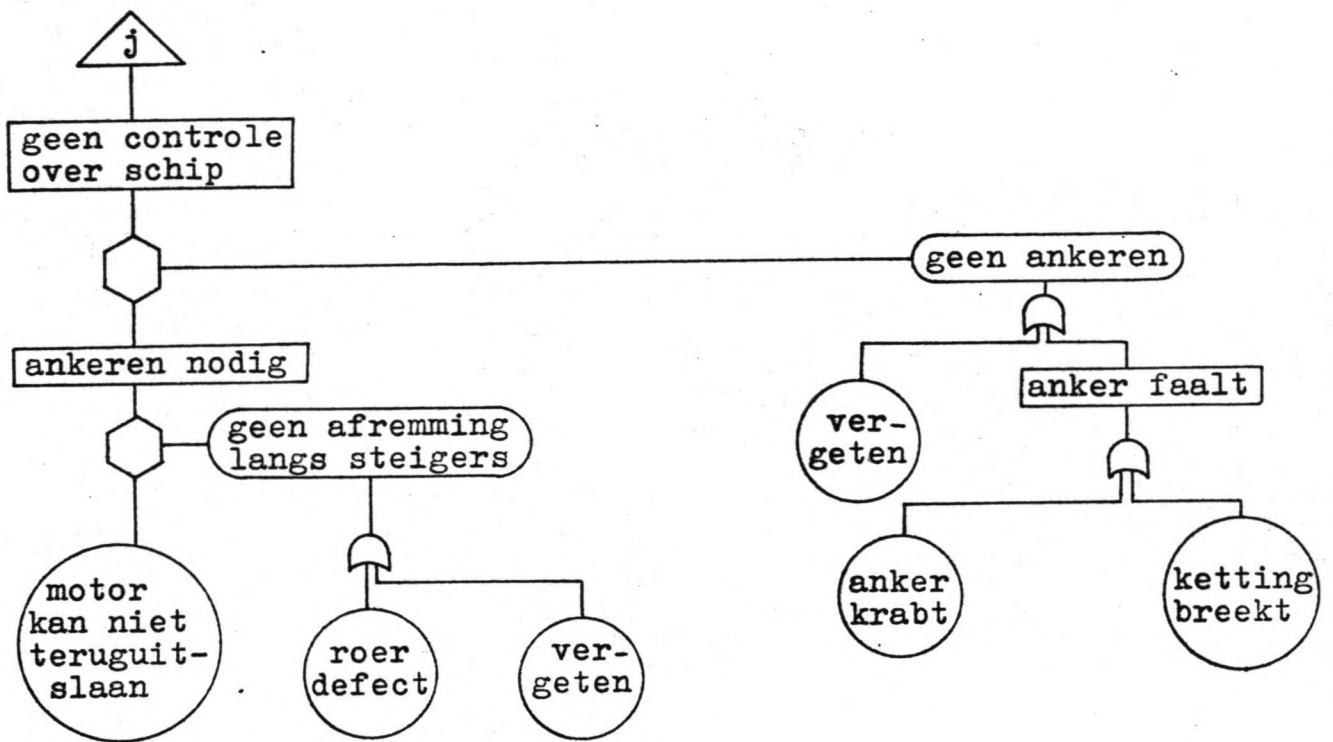
nat seizoen

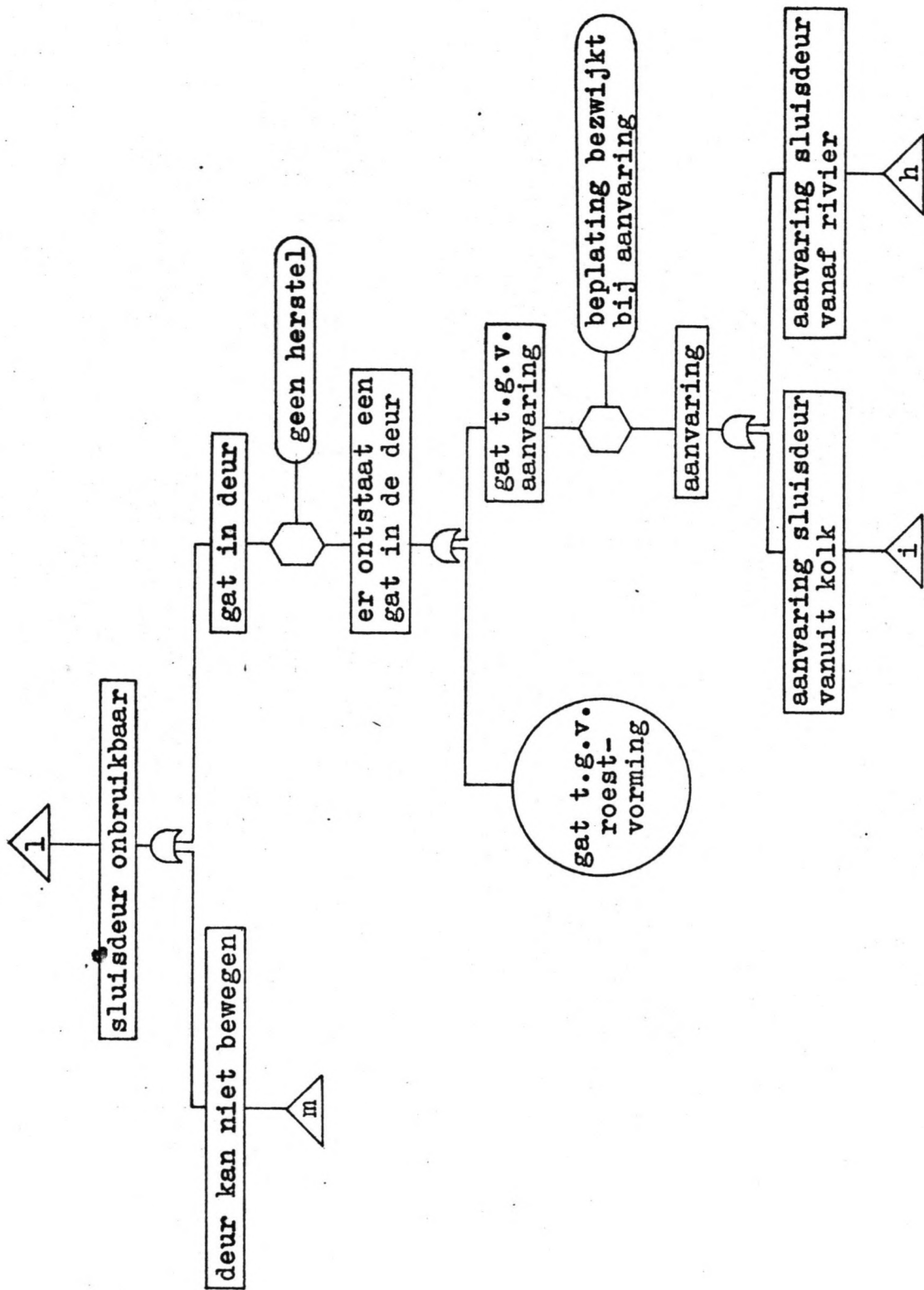


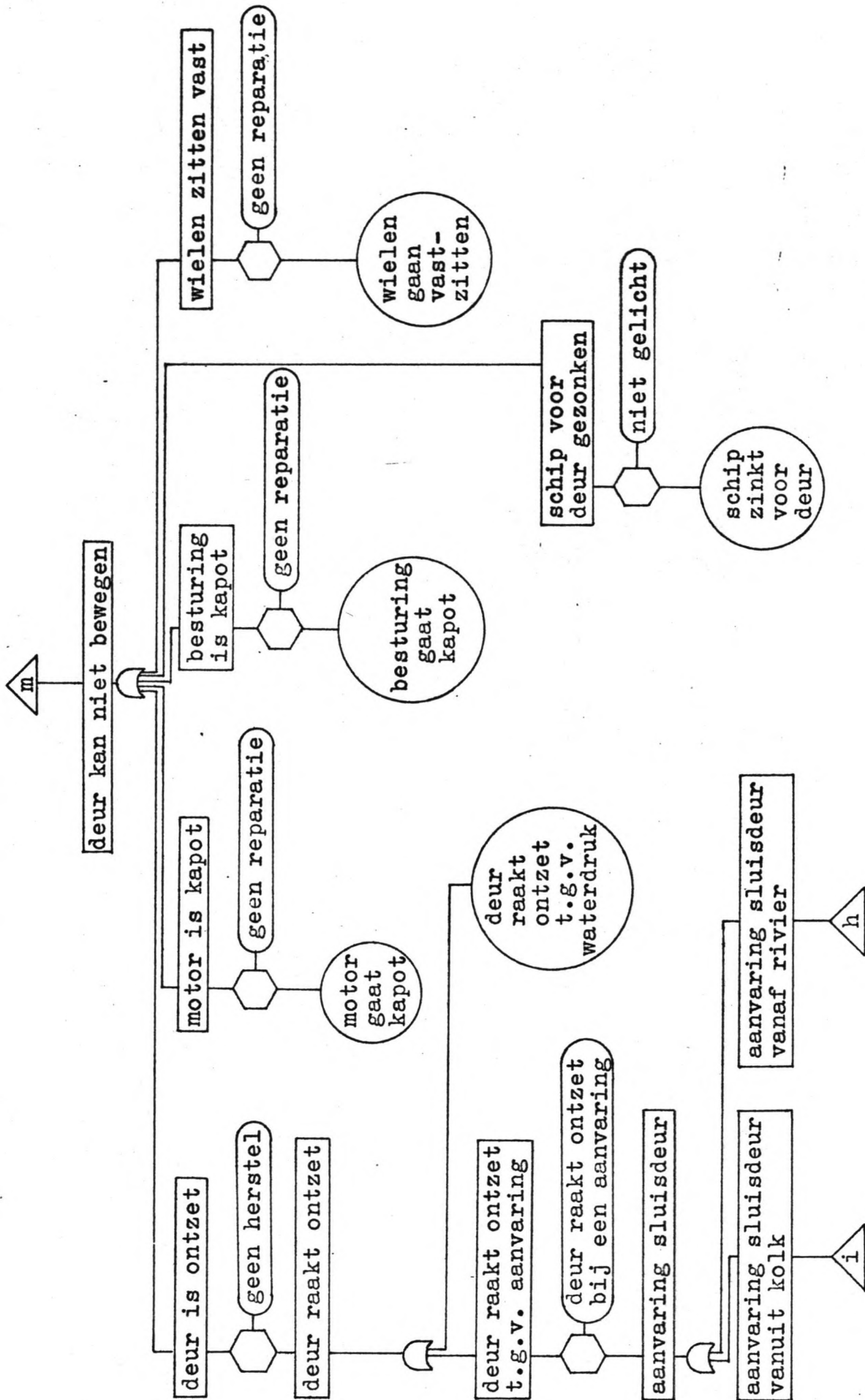
droog seizoen











III BEPALING TOTALE KANSDICHTHEIDSFUNCTIE

Uit het voorgaande moet een kansdichtheidsfunctie van het aantal dagen per jaar dat er op het riviergedeelte geen scheepvaart mogelijk is bepaald worden.

Bij de meeste oorzaken waarom er geen scheepvaart mogelijk is speelt de waterstand een rol. Deze grootheid wordt bepaald door:

- de geborgen hoeveelheid water
- het debiet in de rivier (verhanglijn)
- de windopzet

De waterstand is voor de verschillende plaatsen langs de rivier niet ongecorreleerd. Ook voor de verschillende dagen is deze niet ongecorreleerd omdat de hoeveelheid water die op een bepaalde dag geborgen is bepaald wordt door de hoeveelheid water die de dag ervoor geborgen was en de in- en uitstroming in de tussenliggende tijd.

Beide correlaties zijn in rekening te brengen door voor een "historische" reeks van waterstanden voor elke dag de kans op falen ("geen scheepvaart mogelijk") te bepalen. Door dit voor elke periode (zie II.1) te doen is voor elke periode de gemiddelde kans dat er op die dag geen scheepvaart mogelijk is te bepalen.

Als de duur van elke periode bekend is, is hieruit voor elke periode de kansdichtheidsfunctie van het aantal dagen "geen scheepvaart mogelijk" te bepalen.

Een probleem hierbij is dat de duur van elke periode ook een stochastische grootheid is. Deze wordt o.a. bepaald door het verloop van de waterstand benedenstrooms van de stuw maar ook door het al dan niet optreden van de gebeurtenissen die in II.3 beschreven zijn. Dit betekent dat voor elke duur een kansdichtheidsfunctie opgesteld moet worden waarna d.m.v. Monte-Carlo technieken de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie bepaald kan worden.

Een complicatie bij het voorgaande is dat het stuwmeer nog niet aangelegd is zodat er nog geen prototype metingen van de waterstanden op verschillende plaatsen langs de rivier bekend (kunnen) zijn. Wil men toch een "historische" reeks van waterstanden hebben dan zal men, uitgaande van de windsituatie, het debiet en de geborgen hoeveelheid water, deze d.m.v. simulatie moeten bepalen.

Van de windsituatie (windsnelheid en -richting) zijn in principe

wel historische gegevens bekend.

Om het debiet in de rivier gedurende het jaar te bepalen is een aparte studie nodig waarbij historische afvoergegevens zo bewerkt worden dat ze de rivierafvoer weergeven indien het hele project voltooid was.

De geborgen hoeveelheid water moet bepaald worden uit de hoeveelheid water die de dag ervoor geborgen was en het verschil in in- en uitstroming gedurende 24 uur. De waterbalans van het riviergedeelte bestaat uit de volgende componenten indien $h_2 < 135^+$ (indien $h_2 > 135^+$ is moet een overeenkomstige waterbalans voor het riviergedeelte Sardar Sarovar - Maheshwar opgesteld worden):

- instroming bij Sahashra Dhara; deze bestaat uit:
 - schutwater, de hoeveelheid is afhankelijk van het verval over de sluis
 - water door de hydro-turbines
 - geloosd water (bij een hoogwatergolf e.d.)
 - kwel- en lekwater

In de droge tijd is de geplande minimumafvoer 300 à 600 m³/s.

- neerslag en verdamping; hiervan kunnen wel historische gegevens bestaan. Door vermenigvuldiging met het meeroppervlak is hieruit de grootte van deze termen te bepalen.
- uitstroming grondwater en zijriviertjes; d.m.v. een unit hydrograph methode is hiervoor ook een "historische" reeks te bepalen uit de neerslagcijfers.
- toe- en afstroming via ondergrondse wateraders; geologisch onderzoek moet aantonen of dit veel is. Naar verwachting is het echter verwaarloosbaar.
- lokaal verbruik; dit betreft water voor huishoudelijk gebruik (wassen, koken, drinkwater etc.) en voor bevloeiing en industrie. Een deel van het water komt als afvalwater terug. De grootte van het verschil tussen onttrekking en afvalwater is moeilijk te bepalen en zal naar verwachting in de loop der tijd groeien. Zaken als het gebruik van grondwater, waterleiding en riolering (eventueel in de toekomst aan te leggen) verstoren het beeld. De grootste post zal gevormd worden door de bevloeiing. De evaporatie hiervan hangt af van: areaal bevloeiide grond, bouwplan en mate van bevloeiing.
- golfoverslag; uit de waterstand en de windrichting volgt de strijklengte, uit de strijklengte en de windsnelheid volgt de golfhoogte (bijvoorbeeld m.b.v. de Stevenson formule), uit de

waterstand en de hoogteligging volgt het aanwezige vrijboord, uit het vrijboord en de golfhoogte is de overslag te bepalen. Onzekerheden zijn er bij de omzetting van windsnelheid en strijklengte in golfhoogte en bij de omzetting van golfhoogte en vrijboord in golfoverslag.

- onderloopsheid en achterloopsheid van de stuw bij Harinphal; deze is afhankelijk van het verval over de stuw en de doorlatendheid van de ondergrond (inclusief de waterafsluiting hierin).
 - lekkage van de stuw bij Harinphal; deze bestaat uit:
 - lek in de bekleding van de drempel door: een gezonken schip, een krabbend anker, ongelijke zetting, scheuren door krimp e.d., een bouwfout, etc.
 - lek in de bekleding van de overlaat
 - lek in de voegstrip tussen drempel en bekleding en tussen drempel en pijler
 - lek in de afdichtstrip van de schuif
 - lek door de waterkering (schuif of schotbalken).
 - stroming over de stuw; als de waterstand bovenstrooms van de stuw hoger is dan de bovenkant van de stuw zal er water overheen stromen. De bovenkant wordt bepaald door:
 - ontwerphoogte
 - bouwfout
 - zetting
 - beschadiging; bij een aanvaring door een schip kan de bovenkant van de schuif ingedrukt worden.
 - schutwater; dit wordt bepaald door kolkoppervlak, verval en het aantal schuttingen per tijdseenheid.
 - spuiwater; als de waterbalans positief is zal de waterstand toenemen, net zolang totdat er net zoveel water over de stuw stroomt dat de waterbalans weer in evenwicht is. Als deze waterstand te hoog wordt gevonden kan men een mogelijkheid tot fijnregeling inbouwen (kleppen in de schuiven). In het ontwerp is daarin echter niet voorzien.
- Bij een hoogwatergolf wordt er wel water geloosd door het heffen van een of meer schuiven.

M.b.v. het voorgaande kan voor het eerste deel van het droge seizoen ($h_2 > 135^+$) het verloop van de waterstanden op achtereenvolgende dagen bepaald worden. M.b.v. deze waterstanden is dan weer voor elke dag de kans dat er op die dag geen scheepvaart

mogelijk is te bepalen. Hieruit kan de gemiddelde kans dat er op een dag geen scheepvaart mogelijk is bepaald worden en daarmee de kansdichtheidsfunctie van het aantal dagen "geen scheepvaart mogelijk".

Voor het tweede deel van het droge seizoen ($h_2 < 135^+$) verloopt de bepaling van de kansdichtheidsfunctie op dezelfde manier.

Voor het natte seizoen gaat de bepaling van de kansdichtheidsfunctie in principe op dezelfde manier. Alleen speelt nu het aantal stuwopeningen dat geopend is (n) een rol.

In het eerste deel van het natte seizoen ($h_2 < 135^+$) hangt n af van de voorspelde afvoer (die weer afhangt van de werkelijke afvoer), het aantal openingen dat geopend kan worden en de vraag of na een hoogwatergolf alle openingen op tijd gesloten kunnen worden.

Bij de passage van een hoogwatergolf kan de kansdichtheidsfunctie van n bepaald worden en voor iedere n de kans op "geen scheepvaart mogelijk". Samenstellen levert de kans dat er die dag geen scheepvaart mogelijk is op.

Als alle openingen niet op tijd gesloten kunnen worden wordt h_0 te laag. Als het verhang niet voldoende is wordt de waterstand bij Sahashra Dhara te laag waardoor er geen scheepvaart mogelijk is. Deze situatie duurt totdat $h_2 > 135^+$ is of totdat het toch lukt om alle openingen te sluiten en de gesommeerde instroming sinds dat moment voldoende is om de waterstand weer tot het stuwpeil te verhogen.

In het tweede deel van het natte seizoen ($h_2 > 135^+$) zijn alle stuwopeningen in principe geopend. Door allerlei oorzaken is het echter mogelijk dat een aantal openingen niet geopend kunnen worden. Hierdoor kan n variëren tussen 0 en 12. In principe kan dit aantal gedurende de periode variëren door reparatiewerkzaamheden e.d. Gemakshalve kan dit buiten beschouwing gelaten worden. Op dezelfde manier als hiervoor is nu bij elke n voor elke dag de kans op "geen scheepvaart mogelijk" te bepalen en daaruit de gemiddelde kans hierop waaruit weer de kansdichtheidsfunctie van het aantal dagen dat er geen scheepvaart mogelijk is in de beschouwde periode te bepalen is.

De voorgaande berekening kan gebruikt worden om te bepalen hoeveel duweenheden men in wil zetten voor het vervoer van de steenkool.

IV MAATREGELEN TER VERKLEINING VAN DE FAALKANS

Op basis van de voorgaande foutenboom zijn een aantal maatregelen ter verkleining van de faalkans te noemen.

Bij de situatie "sluiskolk open" (blz. 41 e.v.) is een belangrijke oorzaak van falen als de sluisdeur bij een aanvaring bezwijkt. De kans op deze ongewenste gebeurtenis is te verkleinen door voor de deuren een opvangconstructie aan te brengen. De deur kan dan pas bezwijken als de opvangconstructie niet aanwezig of bezweken is. In het laatste geval heeft de opvangconstructie al veel bewegingsenergie van het schip opgenomen zodat de kans op het bezwijken van de schuif bij een aanvaring afneemt. Deze opvangconstructie kan ook bij de schuiven van de stuw aangebracht worden.

Een andere oorzaak van falen is als het personeel nalatig is (in die zin dat het nalaat om de nodige maatregelen te nemen). Met name bij de tak " h_0 te laag" zijn er vele basisgebeurtenissen die tot de ongewenste topgebeurtenis leiden maar wat voorkomen kan worden door tijdig geschikte maatregelen te nemen.

Nalatigheid is te verminderen door goed toezicht. Ook is in dit verband van belang de apparatuur erg bedrijfszeker (dus met een kleine kans op kapot gaan) te maken. Verder zijn er technische maatregelen te nemen, bijvoorbeeld bij de sluis: de ene deur kan alleen geopend worden als de andere deur dicht zit tenzij een speciale blokkering wordt opgeheven.

Juist onderhoud verkleint ook de kans op storingen.

In de voorgaande bomen is bij de werking van de stuw uitgegaan van het feit dat er geen handaandrijving aanwezig is. Wordt er wel de mogelijkheid van handaandrijving aangebracht dan kan deze alleen gebruikt worden ter vervanging van de motor (dus bij "motor kapot" of "geen electriciteit"). Hierbij is ook een oplossing te bereiken door een motor elders vandaan te monteren of door een noodstroomaggregaat in te schakelen.

Handaandrijving geeft problemen m.b.t. de hoeveelheid benodigde mensen en de lange duur van de operatie.

Een zwak punt in het ontwerp vormt de waterdichte bekleding. Als deze faalt gebeurt er het volgende:

- de opwaartse waterdruk op de stuwpijler wordt groter waardoor de kans op bezwijken toeneemt
- het lekdebiet wordt groter
- er bestaat een kans op uitspoeling van de drempel

De bekleding kan om de volgende redenen falen:

- beschadiging t.g.v. een aanvaring
- beschadiging t.g.v. een krabbend anker
- afglijden van de bekleding
- scheuren in de bekleding t.g.v. krimp, temperatuur e.d.
- bouwfout

Scheuren zijn door wapening en dilatatievoegen te beperken, deze voegen vormen echter ook lekwegen. Overwogen moet worden hoe de bekleding beter uitgevoerd kan worden.

Een ander kritisch punt is de wrijvingscoëfficiënt van de glijstrip. Als deze te groot wordt door aangroei of beschadiging kan de schuif niet geheven worden. Voor de scheepvaart is dit niet zo ernstig maar wel voor de lokale bevolking.

Uit de foutenboom kunnen ook de volgende maatregelen tot verkleining van de kans op falen afgeleid worden:

- het kan zin hebben om een tweede stel schotbalken (en eventueel nog meer) in voorraad te hebben
- als het lokale verbruik te groot wordt moet hier iets aan gedaan worden in de zin van:
 - verbod op onttrekking van water
 - vergroten minimum afvoer
 - creëren van nuttige berging op het riviergedeelte (verhoging van het stuwpeil)
- zorg dat het noodstroomaggregaat altijd bruikbaar en van voldoende brandstof voorzien is
- breng geleidewerken rond de brugpijlers aan zodat de kans op bezwijken van een brug t.g.v. een aanvaring van de pijlers vermindert
- om scheefvallen van de contragewichten te voorkomen kan men een scheidingsbalk in de kelder aanbrengen waardoor het contragewicht niet opzij uit kan
- zorg dat er voldoende reserve-onderdelen en deskundig personeel voor reparatie beschikbaar is
- breng een mogelijkheid om de contragewichten lichter te maken aan

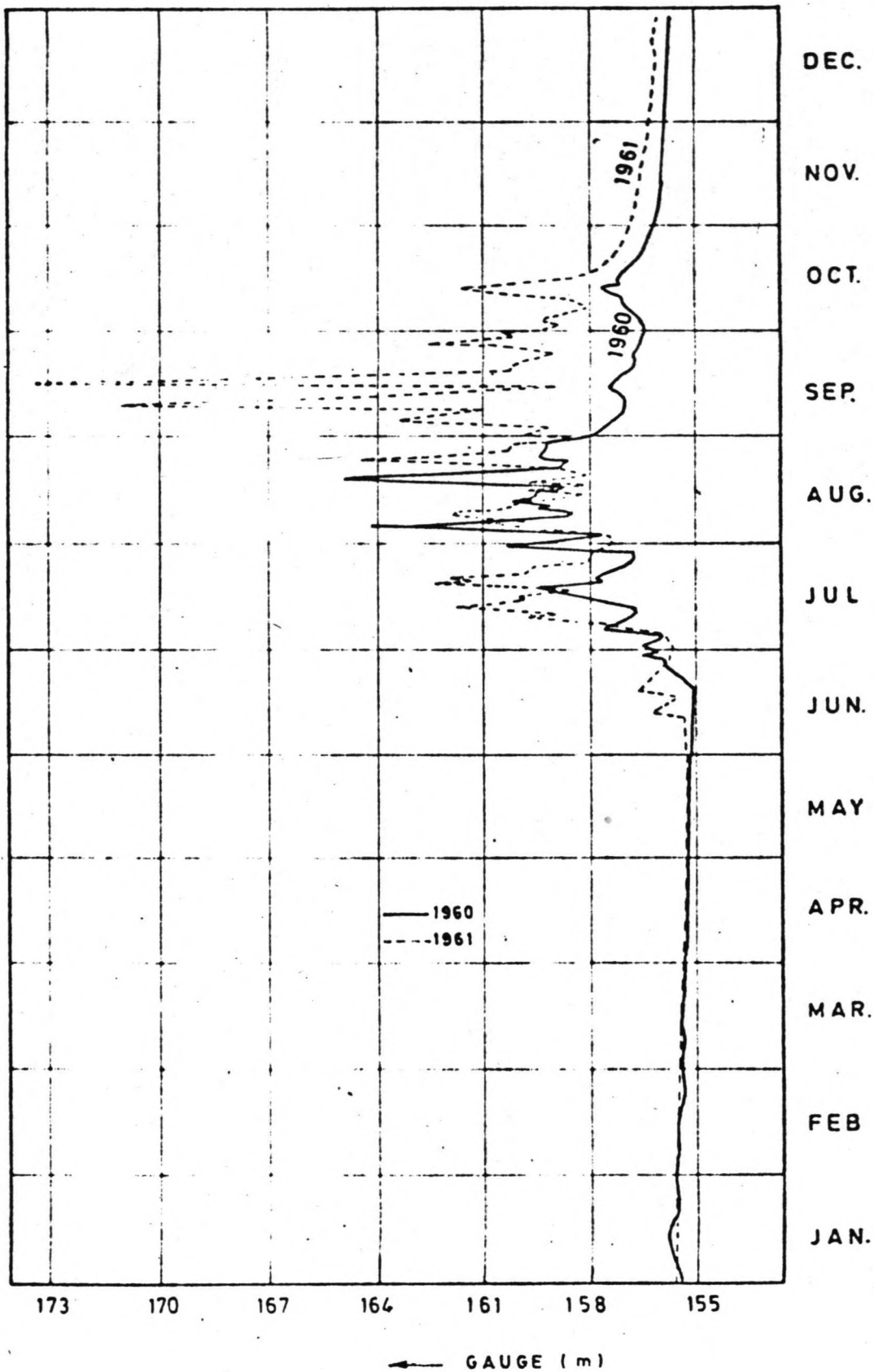
- omring het materieel voor het plaatsen van de noodkering met de nodige zorg
- breng een mogelijkheid tot het plaatsen van een noodkering in de sluis aan en maak de sluisdeuren geschikt om in stromend water gesloten te worden
- zorg ervoor dat een drijvende bok gemobiliseerd kan worden voor het lichten van een schip
- hou de vaargeul voldoende breed en bagger ondiepten en rotspieken weg

De voorgaande maatregelen beperken wel de kans op het optreden van de ongewenste topgebeurtenis maar verhogen in meer of mindere mate ook de kosten. Alleen als de baten (vermindering van de gekapitaliseerde schadeverwachting en/of aantal aan te schaffen duweenheden) van een maatregel meer zijn dan de kosten is het toepassen ervan economisch verantwoord.

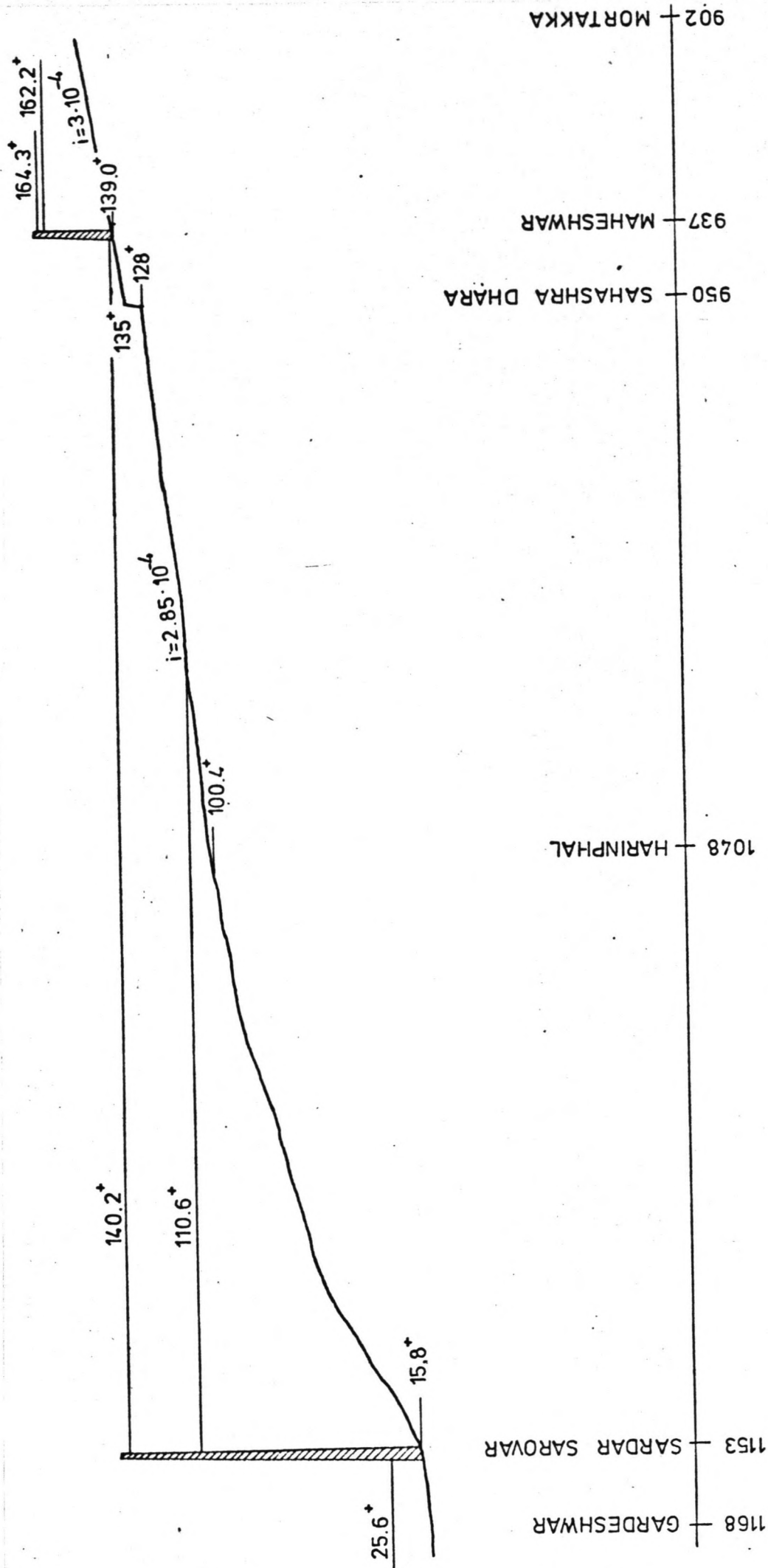
Iets dergelijks geldt voor het gekozen stuwpeil en het vrijboord van de stuw. Deze zijn mogelijk aan de hoge kant. Lagere waarden hiervoor verlagen enerzijds de stuw en daardoor de bouwkosten ervan maar verhogen anderzijds de kans op "geen scheepvaart mogelijk" en daardoor de gekapitaliseerde schadeverwachting en/of het aantal aan te schaffen duweenheden. Hierin zit een mogelijkheid tot optimalisering.

Lijst van gebruikte symbolen.

- α : de hoek tussen as schip en as vaargeul
- B : de breedte van een stuwpijler of een duwconvooi
- b : de breedte van de resterende vaargeul bij een obstakel
- b_{geul} : de breedte van de vaargeul
- b_{min} : de minimaal benodigde breedte van de vaargeul voor de scheepvaart
- e : de plaats van het middelpunt van een duwconvooi t.o.v. de as van de vaargeul
- F_B : de kracht die het bewegingswerk uitoefent
- $\sum F_h$: de som van de horizontale belasting op de stuwpijler
- $\sum F_v$: de som van de verticale belasting op de stuwpijler
- F_w : wrijvingskracht
- G : het gewicht van de schuif
- G' : het gewicht van de schuif onder water
- G_c : het gewicht van het contragewicht
- G'_c : het gewicht van het contragewicht onder water
- h_0 : de waterstand direct bovenstrooms van de stuw bij Harinphal
- h_2 : de waterstand direct benedenstrooms van de stuw bij Harinphal
- L : de lengte van een stuwpijler of een duwconvooi
- $\sum M_x$: de som van het kantelmoment in de damasrichting op de stuwpijler
- $\sum M_y$: de som van het kantelmoment in de stroomrichting op de stuwpijler
- n : het aantal geopende stuwopeningen in de stuw bij Harinphal
- N : normaalkracht (tussen kabels en omloopwiel)
- P(..): de kans op ..
- R : sterkte
- S : belasting; een samengestelde gebeurtenis in de foutenboom



BIJLAGE 1: Afvoer bij Mortakka (km. 902).



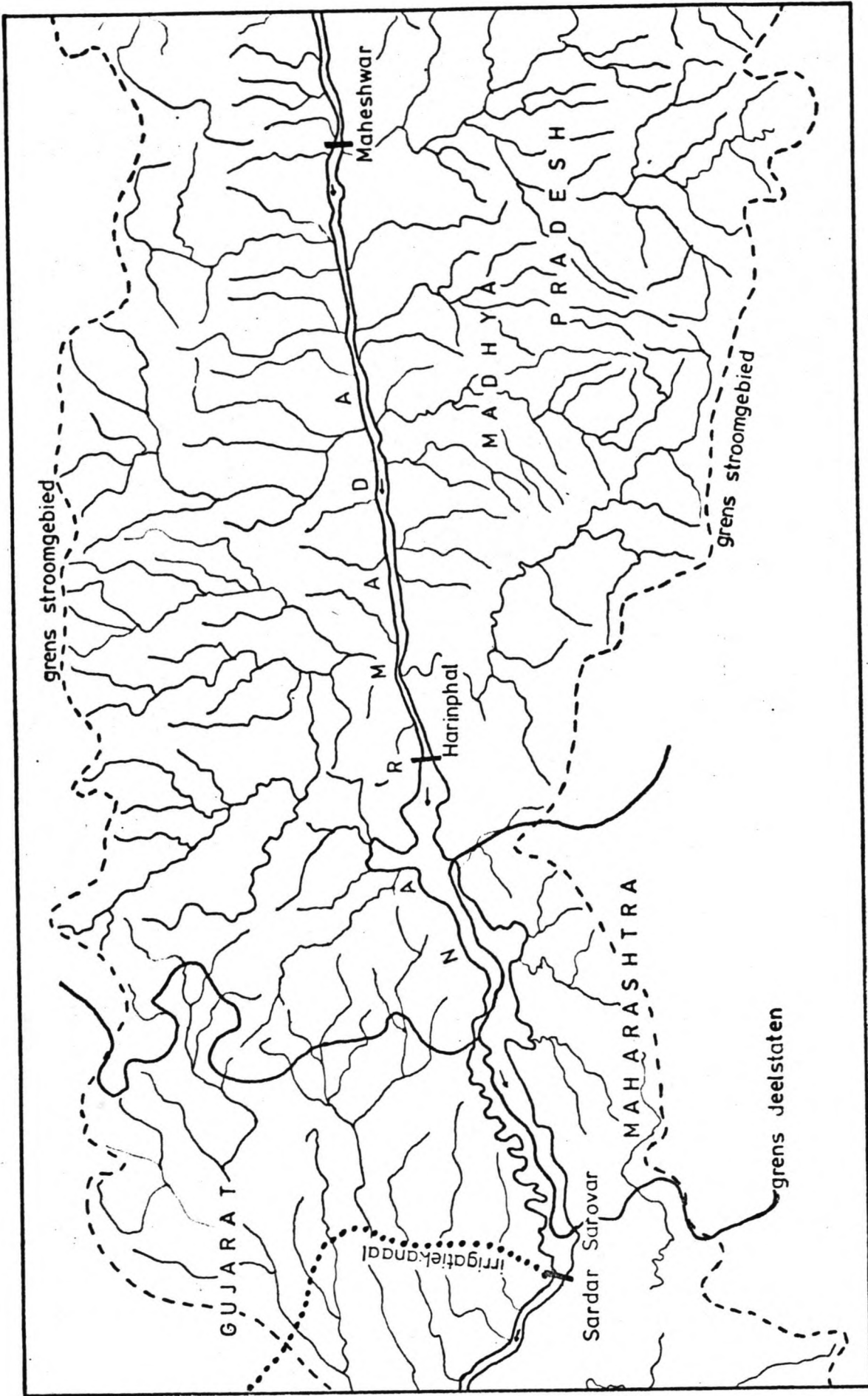
BIJLAGE 2 : Lengteprofiel Narmada tussen Sardar Sarovar en Maheshwar

Schaal verticaal: 1:2500

horizontaal: 1:1.000.000

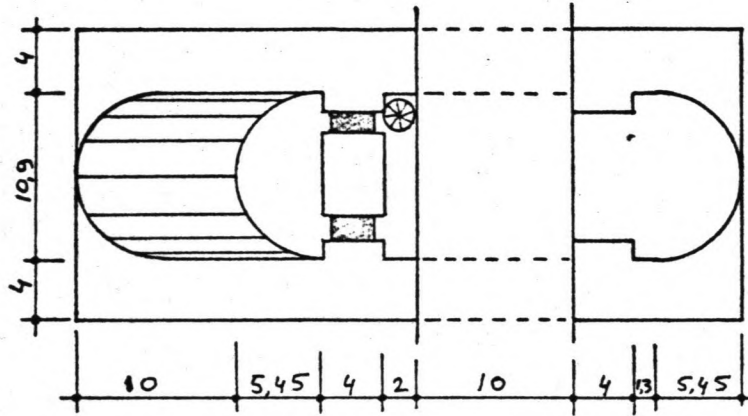
Hoogten in m. t.o.v. zeeniveau.

Afstanden in km. t.o.v. de bron van de rivier.

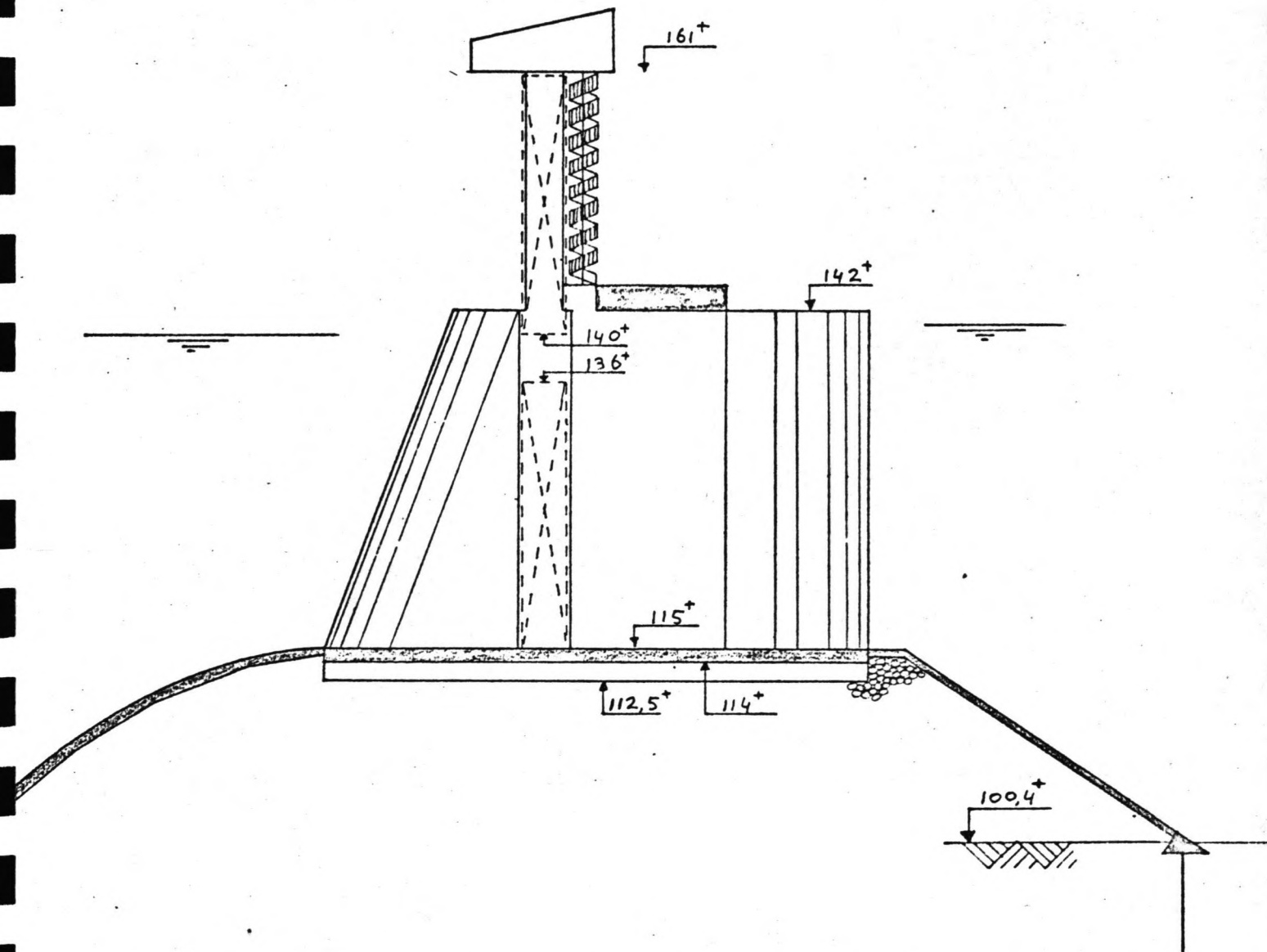


BIJLAGE 3 : Ligging Narmada tussen Sardar Sarovar en Maheshwar
 Schaal 1:1.000.000

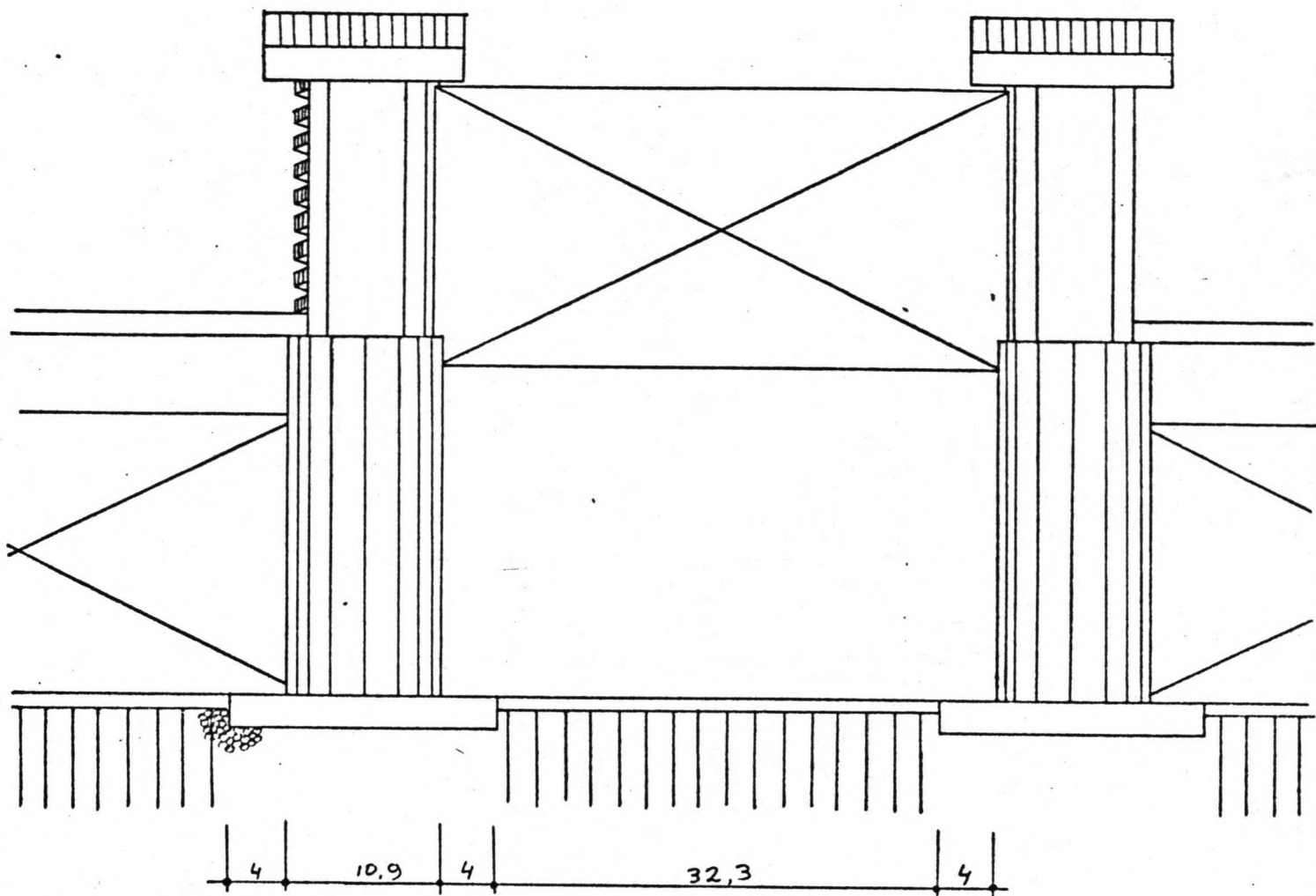
BIJLAGE 4 : Tekeningen stuw.



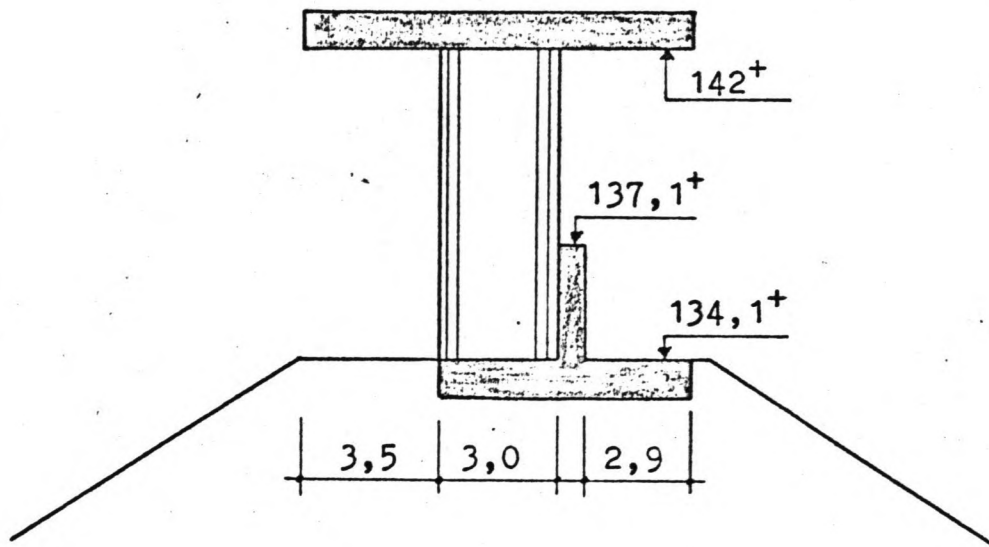
Bovenaanzicht stuwpijler (schaal 1 : 500)



Zijaanzicht stuwpijler (schaal 1 : 500)



Vooraanzicht stuwpijler (schaal 1 : 500)



Dwarsdoorsnede overlaat (schaal 1 : 200)

BIJLAGE 5 : Betekenis gebruikte symbolen foutenboom



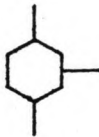
of poort: output (gevolg, gebeurtenis boven de poort) treedt op als één van de inputs (oorzaken, gebeurtenissen onder de poort) optreedt.



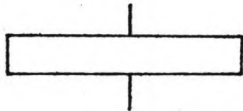
en poort: output treedt op als alle inputs optreden



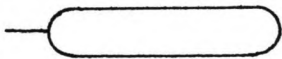
"priority and" poort: deze geeft alleen output als alle inputs achtereenvolgens van links naar rechts optreden



"inhibit gate": variant op de "en poort", de gebeurtenis naast de inhibit gate kan alleen optreden als de begingebuurtenis optreedt



samengestelde gebeurtenis



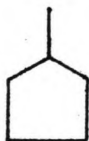
voorwaardelijke gebeurtenis (wordt gebruikt bij een inhibit gate)



basisgebeurtenis



niet verder ontwikkelde gebeurtenis



normale gebeurtenis (house event), d.w.z. een gebeurtenis die altijd optreedt



verwijssymbool, wordt gebruikt om een foutenboom af te breken en te verwijzen naar een elders weergegeven deel