

C1 88.17

C1 88.17

***Bezwijkmechanisme duinen
de ontwikkeling van het duinprofiel
tijdens de grensconditie; de wijze
van doorbraak en de gevolgen***

H.J. Steetzel

december 1988

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

bezwijkmechanisme duinen

de ontwikkeling van het duinprofiel tijdens
de grensconditie; de wijze van doorbraak en
de gevolgen

verslag onderzoek

H.J. Steetzel

INHOUD

SAMENVATTING

ABSTRACT

blz

1.	<u>Inleiding en achtergronden</u>	1
2.	<u>Methode van aanpak</u>	2
2.1	Falen en bezwijken.....	2
2.2	Indeling in bezwijkfasen.....	3
3.	<u>Beschrijving per bezwijkfase</u>	5
3.1	Overzicht.....	5
3.2	Fase I; Afname kruinbreedte.....	6
3.2.1	Beschrijving.....	6
3.2.2	Toestand b; eind fase I.....	8
3.3	Fase II; Afname kruinhoogte.....	8
3.3.1	Beschrijving.....	8
3.3.2	Toestand C; eind fase II.....	8
3.4	Fase III; Ontwikkeling sroomgat.....	9
3.4.1	Beschrijving.....	9
3.4.2	Toestand D; eind fase III.....	9
3.5	Fase IV; Vulling achterland.....	10
3.5.1	Beschrijving.....	10
3.5.2	Toestand E; eind fase IV-b.....	11
4.	<u>Toelichting op (enkele) onderdelen</u>	12
4.1	Ontwikkeling trechter.....	12
4.2	Bresdebieten.....	13
4.3	Polderpeilontwikkeling.....	14
4.4	Aanval op tweede duinregel.....	15
5.	<u>Overzicht relevante factoren</u>	16
5.1	Algemeen.....	16
5.2	Kans op doorbraak.....	16
5.3	Gevolgen van doorbraak.....	16

INHOUD (vervolg)

6. Conclusies en aanbevelingen..... 18

OVERZICHT GEBRUIKTE SYMBOLEN

LITERATUUROVERZICHT

FIGUREN

FIGUREN

1. Uitgangsprofiel en bezwijkfasen
2. Bezwijkfase I; afname kruinbreedte
3. Bezwijkfase II; afname kruinhoogte
4. Bezwijkfase III; ontwikkeling stroomgat
5. Bezwijkfase IV; vulling achterland
6. Situatie tijdens doorbraak (fase IV-a)
7. Aanval tweede duinregel
8. Duindoorbraak bij vaste waterstand
9. Duindoorbraak tijdens hoogwaterpiek

SAMENVATTING

In het kader van onderzoek naar de veiligheid van de Nederlandse kust is in opdracht van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen een voorstudie uitgevoerd naar het bezwijkmechanisme van duinen. Op basis van een kwalitatieve beschrijving van een duindoorbraak blijkt dat, voor wat betreft de situatie voorafgaand aan de eigenlijke doorbraak, er een groot gebrek is aan kennis van het proces van erosie door golfoverslag.

ABSTRACT

As a part of the research programme concerning the safety of the Dutch coast, which is carried out for the Technical Advisory Committee for Sea Defence (TAW), a study on the introductory mechanism for dune failure was carried out. Based on a qualitative description of a dune burst, erosion of the inner slope due to wave overtopping was thought to be one of the most important failure mechanism.

1. Inleiding en achtergronden

In de huidige "Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering" wordt gebruik gemaakt van het zogenaamde grensprofiel. Dit is een minimaal profiel dat nog aanwezig moet zijn na het optreden van de maatgevende duinafslag (zie Leidraad). In principe zal een geringe toename van de mate van duinafslag resulteren in verdergaande erosie, de vorming van een stroomgat en de finale duindoorbraak.

Inzicht in de wijze waarop en de omstandigheden waaronder een duin doorbreekt is van belang voor het inschatten van de gevolgen van duindoorbraak en, in verband daarmee, voor het opstellen van alternatieven voor mogelijke oplossingen ter verkrijging van voldoende veiligheid bij zwakke duinvakken.

Bovendien is deze kennis noodzakelijk met het oog op de in ontwikkeling zijnde probabilistische methode voor dijk/duinaanleg als ondergebracht bij werkgroep E van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW-E).

Bij de bepaling van het optimale dwarsprofiel op basis van aanlegkosten en schadeverwachting, is het vaststellen van de schadekosten een belangrijk aspect.

Om deze kosten te kunnen voorspellen is het nodig het inundatieverloop te kennen. Deze is afhankelijk van het debiet dat tijdens een doorbraak de polder binnenstroomt en daarmee van de stroomgatontwikkeling.

In deze notitie is, op basis van beschikbare kennis en relevante literatuur, op een systematische wijze de doorbraak van een duinprofiel onder invloed van golfaanval (en golfoverslag) beschreven.

Op basis hiervan is een overzicht gegeven van de relevante parameters en processen welke hierbij een belangrijke rol spelen, alsmede naar welke processen meer onderzoek vereist is om te kunnen komen tot een betrouwbare (mathematische) beschrijving van het duindoorbraakproces.

Uiteindelijk kan worden overwogen de mathematische formulering in het tijdsafhankelijk duinerosiemodel DUROSTA in te bouwen.

2. Methode van aanpak

2.1 Falen en bezwijken

Bij een duindoorkraak zijn er eigenlijk twee verschillende stadia te onderscheiden, te weten:

- het stadium voor de doorbraak, en
- het stadium na de doorbraak.

In de eerste fase voor duindoorkraak is het bezwijkmechanisme van belang. Dit is de wijze waarop het duinprofiel, in de loop van de tijd, overgaat van normaal functioneren (d.w.z. het keren van water) naar het wegvallen van deze functie. De belangrijke vraag hierbij is: Hoe groot is de kans op bezwijken (doorbraak)?

Als mogelijke bezwijkmechanismen voor een duinprofiel zijn o.a. te noemen:

- buitenwaterstand komt boven de kruin van het duin;
- aantasting van het binnentalud a.g.v. afschuiving;
- aantasting binnentalud a.g.v. golfoverslag.

Het eerstgenoemde mechanisme is i.g.v. duinen zelfs onder superstormcondities vrijwel uitgesloten, waardoor het bepalende bezwijkmechanisme waarschijnlijk bestaat uit een combinatie van afschuiving en golfoverslagerosie.

De kans op afschuiving lijkt in hoge mate bepaald door de helling en lengte van het binnentalud en treedt onder "ongunstige omstandigheden" eenmalig op, d.w.z. een incidentele afschuiving resulteert niet per definitie in een volgende afschuiving. Bij erosie door overslag is sprake van een discontinu maar doorgaand proces, waarbij zelfs een geringe erosie aan het binnentalud leidt tot meer erosie door golfoverslag.

Dit laatste proces lijkt zichzelf dus te versterken en is daarmee mogelijkwijze bepalend als bezwijkmechanisme, zeker in geval van een natuurlijk duin met een vrij willekeurige topografie (golfoverslagconcentratie in duinpannen).

Het resultaat aan het eind van het bezwijkproces is het ontstaan van een zogenaamde "initiële bres", waardoor het overstromen van de kering kan beginnen.

De wijze waarop het duinprofiel zich vervolgens in de tweede fase na de duindoorsbraak verder ontwikkelt (stroomgatontwikkeling) is van belang voor de gevolgen van de duindoorsbraak en bepaalt tevens of er al dan sprake is van daadwerkelijk falen van de kering.

Als de kering is bezweken maar de gevolgen ervan (toevallig) nog klein blijven is er eigenlijk nog geen sprake van daadwerkelijk falen van de kering.

Het criterium voor de acceptabele bezwijkkans hangt dan ook sterk af van de gevolgen van de doorsbraak. Een doorsbraak met relatief kleine gevolgen mag bijvoorbeeld best een relatief grote kans van voorkomen hebben.

Het maximaal te aanvaarden risico (veiligheid) is derhalve te zien als het produkt van kans op doorsbraak en de gevolgen van de doorsbraak.

De veiligheid kan dus worden vergroot door het risico omlaag te brengen, d.w.z. door de kans op en/of de gevolgen van duindoorsbraak te beperken. Bij de beoordeling van de veiligheid van een duin als waterkering is het derhalve noodzakelijk dat er inzicht bestaat in het bezwijkmechanisme, dit zowel met het oog op de kans op bezwijken, als op de gevolgen ervan.

2.2 Indeling in bezwijkfasen

In het navolgende wordt het doorbreken van een duin nader geanalyseerd door de verwachte ontwikkeling van het duinprofiel tijdens kritieke omstandigheden (grenscondities) kwalitatief te beschrijven.

Deze beschrijving is enerzijds gebaseerd op een analogie met de normale dijkdoorsbraak (vooral voor wat betreft de situatie tijdens en na de doorsbraak) en anderzijds op tijdens modelonderzoek [H298-01; Deltagootonderzoek proef T1] waargenomen en ook onder stormvloedomstandigheden te verwachten effecten van de golfoverslag.

Uitgangspunt bij deze beschrijving vormt een geschematiseerd duin met kruinniveau Z_{kr} en kruinbreedte B_{kr} , een buitenwaterstand Z_w (kruinhoogte is $Z_{kr} - Z_w = H_{kr}$) en een laaggelegen polder met een bodemniveau Z_b (met Z_b kleiner dan Z_w). De buitenwaterstand Z_w , alsmede de diepwatergolfcondities zijn constant in de tijd verondersteld.

Bij de ontwikkeling van de doorbraak zijn er, zoals al eerder vermeld, twee verschillende stadia te onderscheiden, te weten: voor de doorbraak en na de doorbraak.

Beide stadia kunnen worden opgedeeld in elk twee bezwijkfasen met elk een specifieke ontwikkeling (zie later). Hierbij ontwikkelt het totale proces zich dus uitgaande van een uitgangsprofiel met kerende functie tot een situatie waarin de buiten- en de binnenwaterstand (in de polder) aan elkaar gelijk zijn.

Stadium	Korte beschrijving
V O O R	Uitgaande van een uitgangsprofiel met een kerende functie tot een, a.g.v. afnemende kruinhoogte en -breedte, duinprofiel zonder kerende functie (ontstaan van een stroomgat)
DOOR- BRAAK	Doorbraak (einde kerende functie)
N A	Ontwikkeling van een stroomgat van toenemende omvang tot uiteindelijk een situatie met gelijke binnen- en buitenwaterstanden.

In het volgende hoofdstuk is een en ander nader uitgewerkt.

3. Beschrijving per bezwijkfase

3.1 Overzicht

In figuur 1a is de uitgangssituatie weergegeven.

Er wordt uitgegaan van een in eerste instantie voldoende hoog duin en een constante buitenwaterstand (Z_w).

In figuur 1b is de ontwikkeling van het dwarsprofiel in de tijd gegeven. Hierbij, is omwille van de duidelijkheid, uitgegaan van alleen terugschrijdende erosie van de achterzijde van het duin t.g.v. golfoverslag. De combinatie met afslag aan de voorzijde komt in een later stadium aan de orde.

Schematisch weergegeven kunnen tijdens de ontwikkeling van een doorbraak achtereenvolgens de volgende toestanden en fasen worden onderscheiden:

Stadium	Toestand	Fase	Korte omschrijving
V	A		Uitgangsprofiel
O		I	Afname kruinbreedte
O	B		Kruinbreedte nihil
R		II	Afname kruinhoogte
DOOR- BRAAK	C		Doorbraak (einde kerende funtie)
		III	Verdere afname kruinhoogte
	D		Duin is weg
N		IVa/b	Verdere ontwikkeling stroomgat
A	E		Waterstanden gelijk

In de volgende paragrafen (3.2 t/m 3.5) is per fase de dwarsprofielontwikkeling verder uitgewerkt.

3.2 Fase I; Afname kruinbreedte

3.2.1 Beschrijving

Uitgaande van de uitgangssituatie (toestand A) zal de omvang van het duin (voor zover gelegen boven het buitenwaterniveau Z_w) afnemen.

Deze volumeafname kan veroorzaakt worden door een viertal oorzaken, te weten:

- duinafslag aan de zeezijde als gevolg van golfaanval;
- erosie aan de boven- en achterzijde door golfoverslag;
- erosie aan de achterzijde door afschuiving;
- erosie aan de bovenzijde door windinvloeden.

Voor wat betreft de achteruitgang van het duinfront door duinafslag kan worden verwezen naar de betreffende studies.

Van de erosie door golfoverslag lijkt de erosie aan de landzijde van het duinmassief het meest belangrijk en relatief belangrijker dan de erosie door afschuiving (zie ook hoofdstuk 2.1).

Door wind zal er materiaal van de duintop worden afgeblazen. In verhouding tot de andere oorzaken lijkt dit effect echter te verwaarlozen.

In figuur 2A is de situatie met afnemende (minimale) kruinbreedte geschetst zoals deze optreedt als gevolg van erosie door duinafslag en golfoverslag.

Voor wat betreft de erosie door golfoverslag is er uiterst weinig bekend. Afhankelijk van de waterstand en de inkomende golf bij de duinvoet (afh. van de ligging van het voorland en de diepwatergolfhoogte) zal er sprake zijn van golfoploop tegen het duinfront. Voor zover deze golfoploop aanleiding geeft tot golfoverslag zal er (als gevolg van transportgradiënten) op de kruin van het duin materiaal landwaarts worden verplaatst.

Hierbij treden drie-dimensionale effecten op, welke in figuur 2B schetsmatig zijn weergegeven.

Gesteld dat de afslag aan de voorzijde van het duinprofiel nauwelijks in langsricting (evenwijdig aan de kruin-as) varieert, dan kan er toch door omstandigheden een zekere concentratie van golfoverslag plaatsvinden. De nu op de kruin aanwezige watermassa zal via de meest laaggelegen delen van de kruin landwaarts afvloeien, waarbij de watermassa zich zal concentreren in een kleiner gebied. De snelheden van het water op de kruin zullen nog niet echt groot zijn en er zal dan ook nog niet echt sprake zijn van de vorming van een geul.

Aangekomen bij de hellende achterzijde van het duin zal de snelheid van het afstromende water toenemen. Deze versnelling gaat gepaard met een grote toename van het transporterend vermogen van de stroom, waardoor er aan de achterzijde van de kruin een soort trechter tegen het talud ontstaat. Deze trechter zal snel in grootte toenemen, zowel wat betreft de breedte B_{tr} (evenwijdig aan de kruin-as) als in de diepte D_{tr} (loodrecht op de kruinas).

Het is duidelijk dat de uitbreiding van de trechter in zeewaartse richting de meest gevaarlijke is. Ter plaatse van de trechter wordt de resterende kruinbreedte B_{kr} , immers kleiner. In het navolgende heeft de kruinbreedte dan ook betrekking op de minimale waarde ter plaatse van het hart van de trechter.

De kruinbreedteontwikkeling is dus enerzijds afhankelijk van de teruggang van de duinvoet als gevolg van de afslag $A(t)$ en anderzijds van de ontwikkeling van de trechterdiepte $D_{tr}(t)$, zodat:

$$B_{kr}(t) = B_{kr}(0) - [f\{A(t)\} + D_{tr}(t)]$$

Tot slot nog iets over de afzetting van het uit de trechter afkomstige materiaal. Door toename van het transport (aanpassing van nihil transport tot het transporterend vermogen) zal er uitschuring plaatsvinden. Op het moment dat er geen verdere toename van transport optreedt en er dus ook geen verdere uitschuring meer voorkomt, zal er sprake zijn van een vlakker deel van de afvoertrechter. De snelheden nemen daar immers af zodat er afzetting van materiaal kan optreden. Aan het eind van dit vlakkere stuk treedt opnieuw een versnelling op met opnieuw een transporttoename, waardoor er opnieuw een steiler deel van de afvoertrechter ontstaat. Dit proces zal zich over de hele hoogte van het landwaartse talud voortzetten, uiteindelijk resulterend in een

soort van getrapte trechter (anti-duinen). In geval van een niet te hoog achtertalud treedt deze trapvorming niet op en zal het geërodeerde materiaal in een waaiervorm op het achterland worden afgezet. In een dwarsprofiel over de trechter zal derhalve ook geen sprake meer zijn van een sluitende sedimentbalans.

In hoofdstuk 4.1 wordt op de ontwikkeling van de trechter nader ingegaan.

3.2.2 Toestand B; eind fase I

In de eindtoestand van fase I van het bezwijkproces is de (minimale) kruinbreedte ter plaatse van de trechter teruggebracht tot nul. Er is nu nog slechts een zeer smalle duinrichel over. Verdere erosie zal leiden tot een verlaging van de kruin.

3.3 Fase II; Afname kruinhoogte

3.3.1 Beschrijving

In fase II van het bezwijkproces zal door verdergaande erosie aan zowel de voor- als de achterzijde de hoeveelheid materiaal in het (minimale) duinprofiel dat zich boven de buitenwaterstand bevindt verder afnemen. Zoals gegeven in figuur 3A zal hierbij de kruinhoogte H_{kr} , waarschijnlijk snel, afnemen.

Het zal duidelijk zijn dat de fase I en II waarschijnlijk vloeiend in elkaar over zullen gaan, waarbij de geschetste eindtoestand van de eerste fase (toestand B) nooit echt zal optreden.

3.3.2 Toestand C; eind fase II

In figuur 3B is naast de (min of meer fictieve) beginfase van fase II (toestand B) ook de eindfase (toestand C) gegeven.

In toestand C is er geen materiaal meer in het profiel aanwezig dat kan zorgen voor de kering van de buitenwaterstand en is de kruinhoogte gelijk aan nul (kruinniveau gelijk aan de buitenwaterstand).

Een kleine verlaging van de kruin geeft nu direct aanleiding tot het binnenstromen van water over de kruin, met andere woorden: de doorbraak is dan een feit.

Was er in het stadium voor de doorbraak (fase I en II) nog sprake van een discontinu erosieproces, dat beheerst wordt door de af en toe overslaande golven, vanaf dit moment is er een continu eroderende waterstroom over de kruin aanwezig.

3.4 Fase III; Ontwikkeling stroomgat

3.4.1 Beschrijving

Figuur 4A geeft het dwarsprofiel bij aanvang van de doorbraak. Vanaf nu kan het water ongehinderd door het ontstane stroomgat naar binnen stromen.

Dit gebeurt volgens het principe van de volkomen overlaat, waarbij de grootte van het debiet wordt bepaald door het verschil in niveau tussen de buitenwaterstand en de top van de nog resterende duinrichel. In hoofdstuk 4.2 is de grootte van het bresdebiet verder uitgewerkt.

Door het overstromende water en de daarmee gepaard gaande transporten zal de hoogte van de duinrichel zeer snel afnemen. De ontstane bres zal zich in deze fase dan ook voornamelijk in verticale richting uitbreiden. De uitbreiding van de bresbreedte B_{br} gaat relatief langzamer.

De voor het bresdebiet q_{br} maatgevende vervalhoogte H , zal in deze fase zeer snel toenemen tot een maximale waarde welke bepaald wordt door de hoogteligging van het voorland: Z_{v1} (het niveau van de relatief vlakke duinafslagzone).

3.4.2 Toestand D; eind fase III

Als het eind van fase III is de toestand D gegeven waarop de duinrichel volledig is verdwenen en de bovenzijde van de "kruin" aansluit op het voorland ($Z_{kr}(t) = Z_{v1}$), als gegeven in figuur 4B.

De vervelhoogte $H (=Z_w - Z_{kr}(t) = Z_w - Z_{v1})$ blijft vanaf nu min of meer constant. Aan de landzijde van de bres begint zich een ontgrondingskuil te ontwikkelen, welke zich in omvang en diepte uitbreidt.

3.5 Fase IV; Vulling achterland

3.5.1 Beschrijving

Verdere verlaging van de kruin gaat in deze fase relatief langzaam t.o.v. de verbreding van de bres. Naast de bresverbreding is in deze fase de stijging van de waterstand in de polder van belang, als aangegeven in figuur 5A.

In eerste instantie blijft er sprake van ongehinderde instroming waarbij de binnenwaterstand ($Z_p =$ polderpeil) geen invloed heeft op de instroming en is er sprake van een volkomen overlaat. Deze fase is in het vervolg aangeduid met fase IV-a.

De ontgrondingskuil met de daarin aanwezige watersprong neemt qua omvang en diepte toe. Deze ontwikkeling heeft echter geen invloed op de grootte van de debieten. Natuurlijk is dit wel van belang tijdens de herstelfase bij het dichten van het stroomgat (NB. bij dijkdoorbraken langs rivieren legt men een nieuwe dijk dan ook meestal aan de rivierzijde van de ontstane kolk aan). De ontwikkeling van de diepte van de kuil kan natuurlijk wel worden gehinderd/belemmerd door de aanwezigheid van harde(re) lagen.

Door het binnenstromen van water zal bij een beperkte oppervlakte van de polder de waterstand in de polder $Z_p(t)$ in de tijd toenemen. Vanaf het moment dat de binnenwaterstand een zekere waarde (grensdiepte = $2/3 H$ boven de kruin) overschrijdt zal deze de toestroming van water gaan hinderen, waardoor het debiet af zal gaan nemen. Er is nu sprake van gestuwde afvoer, de onvolkomen overlaat (zie hoofdstuk 4.2). Deze fase is in het vervolg aangeduid met fase IV-b.

Een opsplitsing in fase IV-a en IV-b levert schematisch:

fase	polderpeil Z_p	watersprong	bresdebiet q_{br}
IV-a	$Z_p < (Z_{kr} + 2/3 H)$	ja	$q_{br} = q_{max}$
IV-b	$Z_p > (Z_{kr} + 2/3 H)$	nee	$q_{max} > q_{br} > 0$

Hierin is H het verschil tussen de buitenwaterstand en kruinniveau (= $Z_w - Z_{kr}$).

In figuur 5B zijn deze waterstanden weergegeven.

In fase IV-a is het bresdebiet per eenheid van breedte, q_{br} , maximaal (afhankelijk van Z_{v1} en Z_w) en constant. Het totale debiet door de bres neemt echter wel toe door de breedte toename. Bij overschrijding van de grensdiepte boven de kruin neemt het bresdebiet q_{br} langzaam af. De watersnelheid in de bres neemt nu ook af zodat er in deze fase sprake is van afnemende erosieve transporten. De groei van de bres in breedte richting wordt tot staan gebracht.

In figuur 6 is een bovenaanzicht gegeven van de situatie tijdens de voorlaatste fase van de duindoorbraak. Hierin zijn de bres met radiale toestroming en de waaivormige afzetting om de ontgrondingskuil schetsmatig weergegeven.

3.5.2 Toestand E; eind fase IV-b

In de eindtoestand (toestand E) is de binnenwaterstand Z_p gelijk aan de buitenwaterstand Z_w . De golfwerking kan ongehinderd door het gat naar binnen komen en mogelijk aanleiding geven tot golfaanval op de eventueel aanwezige tweede duinregel (zie ook hoofdstuk 4.4).

4. Toelichting op (enkele) onderdelen

4.1 Ontwikkeling trechter

De ontwikkeling van de trechter is van groot belang als bijdrage aan het bezwijken. Hierbij gaat het met name om de ontwikkeling van de trechter in zeewaartse richting.

Factoren die hierbij een rol kunnen spelen zijn o.a.:

- de spreiding in de golfaanval in langsrichting;
- het percentage golven dat overslag veroorzaakt;
- het gemiddeld debiet tijdens overslag;
- de vlakheid en ruwheid van de kruin;
- de (resterende) breedte van de kruin;
- de transportverdeling over de kruin;
- de helling en lengte van het binnentalud.

De breedte-ontwikkeling van de trechter heeft mogelijk weinig invloed op de diepte-ontwikkeling. De trechterbreedte op het moment dat het duin doorbreekt is immers van minder belang. Het feit dat er sprake is van doorbraak (toestand D) is belangrijk. De breedte van de bres B_{br} , is initiëel gelijk aan de trechterbreedte B_{tr} , maar zal door stroming tijdens fase III en IV van het bezwijkproces snel toenemen, waarbij de initiële breedte er weinig meer toe doet.

Op grond hiervan zou de aandacht beperkt kunnen blijven tot de ontwikkeling van de trechterdiepte D_{tr} .

Kwantificering van de relevante effecten kan resulteren in een verband voor de trechterdiepte $D_{tr}(t)$ als functie van bovengenoemde factoren.

Een dergelijk (uitgebreide) beschrijving is vooralsnog niet aanwezig.

Mogelijkerwijze kan op basis van nader onderzoek wel iets gezegd worden over de afhankelijkheid van de uitbreidingsnelheid van de trechter v_{tr} ($=d[D_{tr}(t)]/dt$) als functie van bijvoorbeeld de kruinbreedte B_{kr} .

Nader literatuuronderzoek levert mogelijke aanknopingspunten.

4.2 Bresdebieten

Voor de grootte van het totale debiet door de bres $Q_{br}(t)$ zijn van belang het debiet per eenheid van breedte $q_{br}(t)$ en de bresbreedte $B_{br}(t)$:

$$Q_{br}(t) = q_{br}(t) B_{br}(t)$$

Voor het bresdebiet p.e.v. breedte $q_{br}(t)$ zijn er twee verschillende stadia te onderscheiden, namelijk de situatie waarbij de binnenwaterstand geen invloed uitoefent op dit debiet, de zogenaamde volkomen overlaat, en een situatie waarin deze invloed wel aanwezig is, de zogenaamde onvolkomen overlaat.

Volkomen overlaat

Het debiet is onafhankelijk van de benedenwaterstand en gelijk aan de maximale waarde, volgens:

$$\begin{aligned} q_{br}(t) &= q_{max} \\ &= m (2/3) \sqrt{[2/3g] [H(t)]^{1.5}} \end{aligned}$$

Hierin is m een afvoerfactor welke afhankelijk is van de vorm van de overlaat (globaal $0,8 < m < 1,0$).

De parameter H is gelijk aan het verschilniveau tussen buitenwaterstand $Z_w(t)$ en de (nog) aanwezige kruinhoogte $Z_{kr}(t)$:

$$H(t) = Z_w(t) - Z_{kr}(t)$$

De waterdiepte boven de kruin is gelijk aan de grensdiepte (= $2/3$ van H).

De snelheid over de kruin v_{br} wordt bepaald met:

$$v_{br}(t) = m \sqrt{[2/3g H(t)]}$$

Deze snelheid wordt volledig bepaald door de bovenstroomse omstandigheden.

Aan de landwaarde zijde van de overlaat zal een watersprong optreden.

Onvolkomen overlaat

Het debiet is nu ook afhankelijk van de benedenwaterstand.

Als h het verschil is tussen de binnenwaterstand $Z_p(t)$ en de (nog) aanwezige kruinhoogte $Z_{kr}(t)$:

$$h(t) = Z_p(t) - Z_{kr}(t)$$

dan geldt voor $q_{br}(t)$:

$$\begin{aligned} q_{br}(t) &= m h \sqrt{2g(H-h)} \\ &= m (Z_p(t) - Z_{kr}(t)) \sqrt{2g (Z_w(t) - Z_p(t))} \end{aligned}$$

De waarde van de afvoercoëfficiënt is ongeveer 1,1.

Een benadering voor de grootte van de snelheid boven de kruin in de bres is:

$$v_{br}(t) = m \sqrt{2g (Z_w(t) - Z_p(t))}$$

Deze snelheid wordt dus volledig mede bepaald door de benedenstroomse omstandigheden.

4.3 Polderpeilontwikkeling

De ontwikkeling van het polderpeil is een belangrijk gegeven. De hoogteligging ervan is immers bepalend voor de grootte van het instroomdebiet $q_{br}(t)$ en de stroomsnelheden in het stroomgat $v_{br}(t)$.

Voor een vlakke polder met bodemniveau Z_b en oppervlakte A_p (en verticale wanden) geldt:

$$A_p H_p(t) = \int_0^t Q_{br}(t') dt'$$

waarin: $H_p(t) = Z_p(t) - Z_b$

ofwel:

$$Z_p(t) = Z_b + [1/A_p] \int_0^t B_{br}(t') \cdot q_{br}(t') dt'$$

4.4 Aanval op tweede duinregel

In figuur 7A is de situatie voor en na duindoorsbraak gegeven voor een polder met een duinregel als tweede waterkering. Na duindoorsbraak wordt de golfaanval op de tweede duinregel bepaald door:

- de aangeboden golfenergie door de ontstane bres;
- de effecten van breken (waterdiepte), wrijving en wind tijdens de golfvoortplanting in de polder;
- de optredende diffractie.

De mate van golfaanval welke door het gat naar binnen komt wordt sterk bepaald door de waterdiepte in de bres.

De reductie in golfhoogte tijdens de voortplanting naar de tweede duinregel, zal afhankelijk zijn van de waterdiepte.

Het effect van diffractie is toegelicht in figuur 7B.

Als B_{br} de breedte van het bres in het duin is en L de afstand van de bres tot de tweede duinregel, dan is de golfenergie-reductie afhankelijk van de verhouding B_{br}/L .

Is deze verhouding groot dan zal de volledige golfenergie zich in de richting van de tweede duinregel verplaatsen. Is de verhouding klein dan zal er met diffractie rekening gehouden moeten worden. De bres in het duin is hierbij dan te zien als een puntbron met radiale uitstraling. De booglengte neemt lineair toe met de straal en de energie per meter booglengte neemt derhalve lineair af. De golfhoogte zal derhalve afnemen met de afstand tot de bres L , volgens:

$$H(L) = H(\text{bres}) \sqrt{B_{br}/(\pi \cdot L)}$$

De dichtsbijzijnde duinregel wordt derhalve het meest aangevallen.

De totale golfhoogteafname volgt uit de som van al de genoemde bijdragen.

In feite kan er met behulp van een golfvoortplantingsmodel (ENDEC) gewoon worden doorgerekend, mits de afname van de golfhoogte als gevolg van diffractie wordt meegenomen (als dit tenminste belangrijk is gezien de (B_{br}/L) -verhouding).

5. Overzicht relevante factoren

5.1 Algemeen

Specifiek voor de situatie van een duin onder kritieke golfaanval en waterstandsverhoging zijn:

- de breedteafname van het (minimale) duin door duinafslag en golfoverslag;
- de opeenvolging van de gebeurtenissen in de tijd, i.v.m. het verloop van de buitenwaterstand tijdens de stormvloed.

5.2 Kans op doorbraak

De kans op doorbraak wordt bepaald door de snelheid waarmee de fasen I en II van het bezwijkproces worden doorlopen. Het feit dat de buitenwaterstand varieert maakt de zaak nog ingewikkelder.

De erosie door golfoverslag is hierbij de grote onbekende factor en verdient dan ook nog de nodige aandacht.

In dit licht gezien zou het in de leidraad gehanteerde grensprofiel een zodanige omvang moeten hebben dat de kruinbreedteafname voor zover veroorzaakt door de golfoverslag in dit profiel kan worden opgevangen.

In hoeverre het thans gehanteerde profiel met een kruinhoogte van maximaal 4 m, een breedte van 3 m en een landwaartse helling van 1:2 over een niet gelimiteerde hoogte hiervoor voldoende is blijft echter een vraag! (zie ook Waterloopkundig Laboratorium; verslag onderzoek H298 deel 6, dec. '87).

Voor verdedigde constructies waarbij er geen sprake is van duinafslag aan de zeezijde, maar natuurlijk wel van golfoverslag zal er derhalve wel aandacht besteed moeten worden aan de veiligheid met betrekking tot de golfoverslag. Een restprofiel als het genoemde grensprofiel lijkt een minimale vereiste.

5.3 Gevolgen van doorbraak

Voor het vaststellen van de gevolgen van een duindoorbraak onder vaste condities speelt met name de polder, voor wat betreft bodemligging en oppervlakte, een belangrijk rol.

Dit heeft alles te maken met de ontwikkeling van het polderpeil Z_p . De gevolgen van de doorbraak (bresontwikkeling en ontgrondingskuil) worden minder ernstig naarmate de grootte van het bresdebiet minder groot is en/of sneller afneemt. Dat een kleine hooggelegen polder relatief gunstig is mag duidelijk zijn.

In figuur 8 is voor een eenvoudig geval (bakvormige polder met vlakke bodem op voorlandniveau ($Z_b = Z_p = Z_{v1}$) en verticale wanden ($A_p(z) = A_p$) en vaste buitenwaterstand Z_w , de kwalitatieve ontwikkeling van het polderpeil $Z_p(t)$, de bresbreedte $B_{br}(t)$ en het bresdebiet $q_{br}(t)$ en $Q_{br}(t)$ gegeven. Ook zijn de verschillende fasen gegeven (van toestand C tot toestand E).

Bij het vaststellen van de mogelijke gevolgen van een duindoорbraak onder stormvloedomstandigheden (met variërende buitenwaterstand) is met name het tijdstip van doorbraak van belang (toestand C).

Gesteld dat doorbraak plaatsvindt tijdens het hoogtepunt van de storm (d.w.z. maximale waterstand), dan zullen de gevolgen afhankelijk zijn van de vergroting en met name de verdieping van de bres.

Als de snelheid waarmee de bres zich verdiept groot is, waardoor de kruinsverlaging voor kan blijven op de afname van de buitenwaterstand, kan er gedurende langere tijd water naar binnen stromen en is er sprake van een ernstige situatie.

De indruk bestaat dat de verdiepingssnelheid van de bres (tijdens fase III) vele malen groter is dan de snelheid van de waterstandsverlaging tijdens stormvloed. Deze laatste bedraagt 0,5 à 0,6 m/uur. Dit impliceert overigens dat het tijdstip waarop de duindoорbraak plaatsvindt (hetzij voor of na de hoogwaterpiek) iets minder van belang wordt.

In figuur 9 is voor de zelfde polder als van figuur 8 voor het geval van duindoорbraak tijdens hoogwater opnieuw het verloop van het polderpeil $Z_p(t)$, de bresbreedte $B_{br}(t)$ en de bresdebieten $q_{br}(t)$ en $Q_{br}(t)$ gegeven. De kruinverlaging gaat hier relatief snel t.o.v. de verlaging van de waterstand, waardoor er voor fase III nauwelijks van verschil sprake is t.o.v. de situatie met vaste buitenwaterstand. Fase IV verloopt daarentegen een stuk sneller, omdat, doordat de buitenwaterstand zakt, de binnenwaterstand de grensdiepte sneller bereikt.

6. Conclusies en aanbevelingen

Er zijn twee opeenvolgende stadia bij het bezwijken van een duin als waterkering, namelijk het optreden van het bezwijkmechanisme dat aanleiding geeft tot het ontstaan van een stroomgat en de ontwikkeling van het stroomgat met het oog op de gevolgen.

Op basis van hoofdstuk 5.3 zijn de gevolgen van een doorbraak tijdens een superstorm altijd ernstig, onafhankelijk van het tijdstip van doorbraak.

Voor wat betreft de situatie na de doorbraak is er enige kennis aanwezig over de stroomgatontwikkeling [Bakker ('86), Visser e.a. ('86), Dieteren en Pottinga ('88)].

De grote onbekende is dan ook de kans op doorbraak en daarmee de kennis van het bezwijkmechanisme.

Voor duinen lijkt het eroderen van het binnentalud door golfoverslag in combinatie met duinafslag aan het buitentalud het maatgevende mechanisme. Het is echter juist het proces van erosie door golfoverslag welke in hoge mate onbekend is.

Het uitvoeren van nader onderzoek naar het golfoverslagproces en kwantificering van deze erosiebijdrage lijkt dan ook een eerste vereiste. Als mogelijke ingang kan uitgevoerd modelonderzoek naar golfoverslag bij dijken dienen (bijv. H181/M1258, juli '87), waarin debieten en snelheden op het binnentalud van een dijk gemeten zijn.

Ook de relatie met het transport onder continue stroom, als optredend in de tweede fase (stroomgatontwikkeling) is natuurlijk een punt van onderzoek.

In een later stadium kan overwogen worden tot een toetsing van de "golfoverslag erosie-kennis" door uitvoering van modelonderzoek.

Overzicht gebruikte symbolen

Symbool	Eenheid	Betekenis
A	[m ³ /m/s]	duinafslag
A _p	[m ²]	oppervlakte van de polder
B _{br}	[m]	<u>b</u> resbreedte
B _{kr}	[m]	<u>k</u> ruinbreedte
B _{tr}	[m]	<u>t</u> rechterbreedte
D _{tr}	[m]	<u>t</u> rechterdiepte
g	[m/s ²]	zwaartekrachtversnelling
H	[m]	verschil buitenwaterstand en kruinniveau (= Z _w - Z _{kr})
h	[m]	verschil binnenwaterstand en kruinniveau (= Z _p - Z _{kr})
H _{kr}	[m]	verschil kruinhoogte en buitenwaterstand (= Z _{kr} - Z _w)
H _p	[m]	waterdiepte in de polder (= Z _p - Z _b)
L	[m]	afstand bres tot tweede duinregel
m	[-]	afvoercoefficient
Q _{br}	[m ³ /s]	debiet door de <u>b</u> res
q _{br}	[m ³ /m/s]	debiet door <u>b</u> res p.e.v. breedte
q _{max}	[m ³ /m/s]	het <u>m</u> aximaal debiet door de bres
v _{br}	[m/s]	stroomsnelheid door <u>b</u> res
v _{tr}	[m/s]	snelheid uitbreiding van <u>t</u> rechterdiepte
Z _b	[m t.o.v. R]	niveau polder <u>b</u> odem t.o.v. referentiepeil
Z _{kr}	[m t.o.v. R]	niveau <u>k</u> ruin t.o.v. referentiepeil
Z _p	[m t.o.v. R]	niveau polder <u>p</u> eil t.o.v. referentiepeil
Z _{vl}	[m t.o.v. R]	niveau <u>v</u> oor <u>l</u> and t.o.v. referentiepeil
Z _w	[m t.o.v. R]	niveau (buiten) <u>w</u> aterstand t.o.v. referentiepeil

Literatuuroverzicht

Bakker, W.T.; De snelheid van doorbraak van de dijk rond een energiebekken. Notitie WB-N-86.027, Deltadienst, Rijkswaterstaat, 1986.

Dieteren, J.M.L. en P.H. Pottinga; Stroomgatontwikkeling tijdens een dijkdoorbraak. Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, juni 1988.

Führboter, A.; Über den Sicherheitszuwachs im Küstenschutz durch eine zweite Deichlinie. Die Küste, Heft 45, pp. 181-208, 1987.

Leatherman, S.P.; Barrier island dynamics: Overwash processes and eolian transport. Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference, pp. 1958-1974, 1976.

Leatherman, S.P.; Overwash hydraulics and sediment transport. Coastal sediments '77, pp. 135-148, 1977.

Leatherman, S.P.; Barrier dune systems: A reassessment. Sedimentary Geology, pp. 1-16, 1978.

Leatherman, S.P.; Beach and dune interaction during storm conditions. Quarterly Jl. of Engng. Geol. 1979, Vol. 12, pp. 281-290, 1979.

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1984.

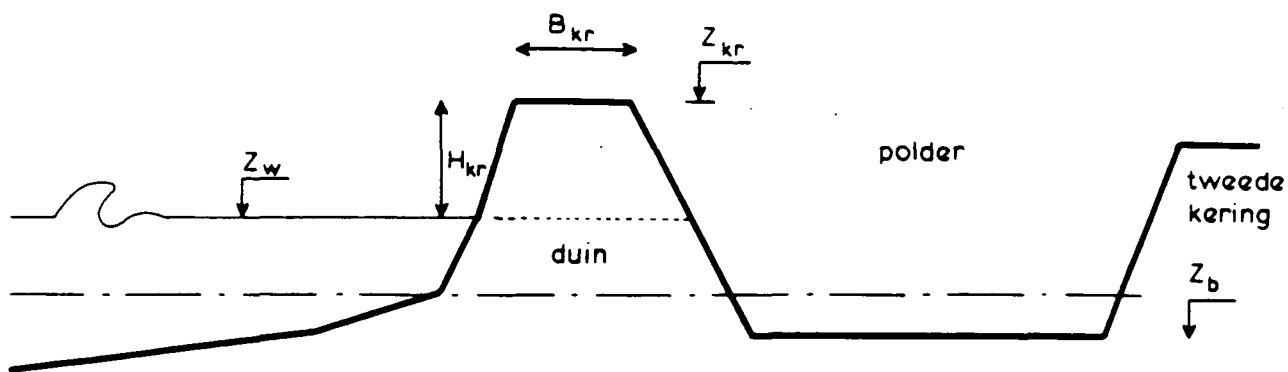
Vellinga, P.; Beach and dune erosion during storm surges. Proefschrift TU Delft, 1986.

Visser, P.J., J.S. Ribberink en J.P.Th. Kalkwijk; Ontwikkeling stroomgat en debiet bij dijkdoorbraak: Deelstudie voor een Pomp Accumulatie Centrale. Rapport nr. 8-86, TU Delft, november 1986.

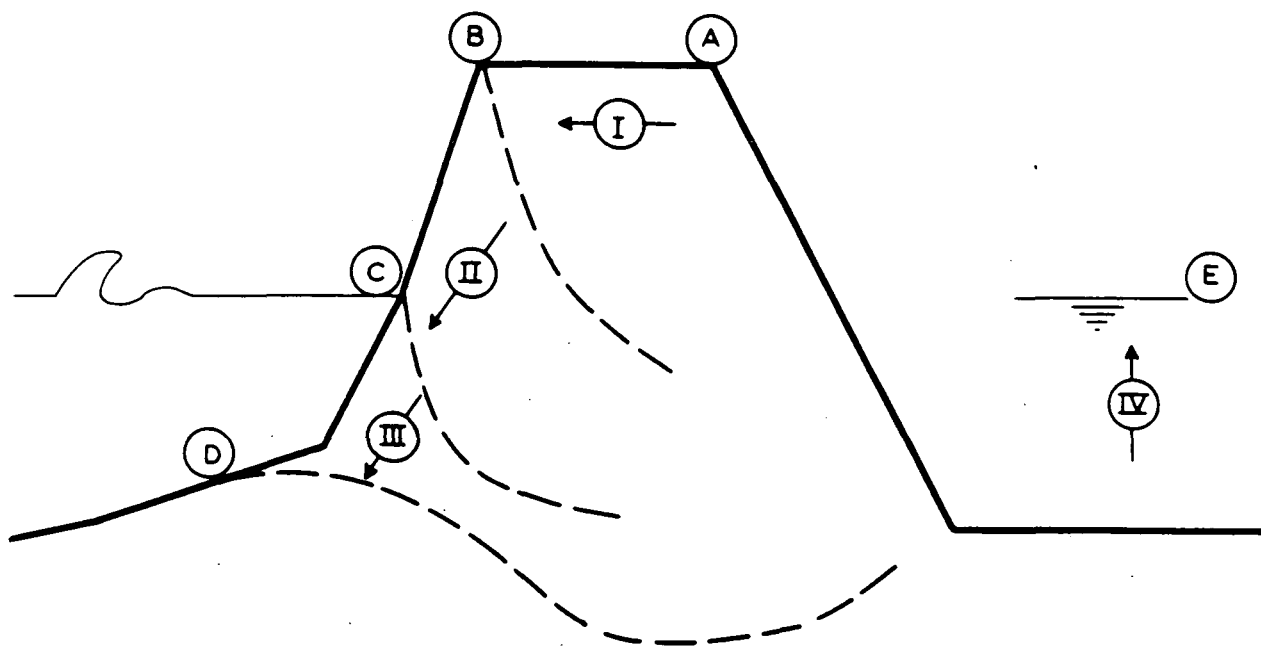
Waterloopkundig Laboratorium; Modelonderzoek duinvoetverdedigingen; Systematisch onderzoek naar de werking van duinvoetverdedigingen, Modelonderzoek op grote schaal in de Deltagoot. Verslag modelonderzoek H298-01, december 1987.

Waterloopkundig Laboratorium; Breedte-hoogteverhouding lage grensprofielen; Oriënterend onderzoek naar de veiligheid van lage brede grensprofielen. Verslag onderzoek H298-06, december 1987.

Waterloopkundig Laboratorium; Golfoverslag bij dijken. Verslag modelonderzoek H181/M 1258, juli 1987.



A. UITGANGSPROFIEL



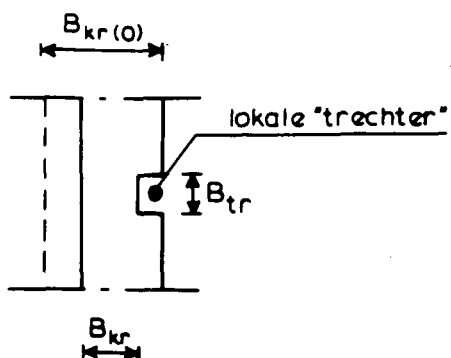
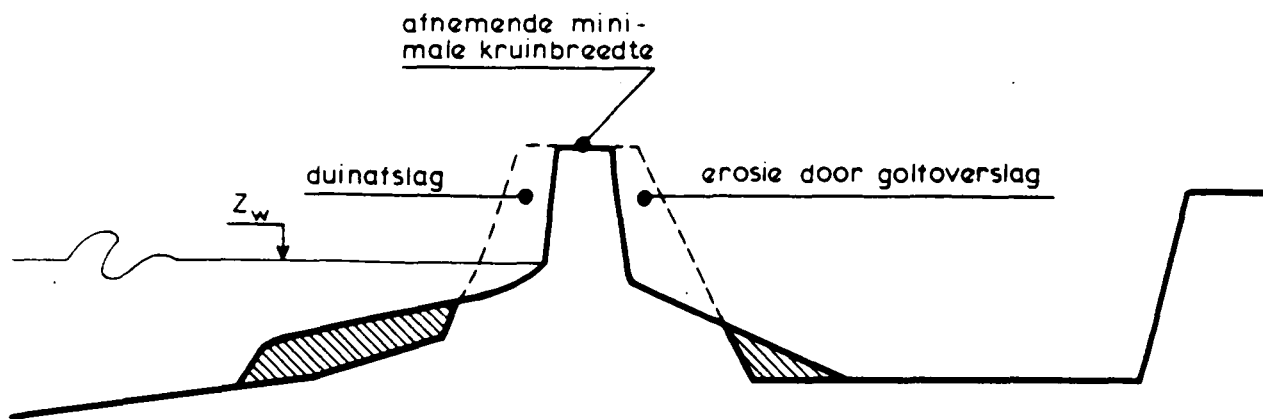
B. BEZWJKFASEN (BJ TERUGSCHRJDENDE EROSIE)

UITGANGSPROFIEL EN BEZWJKFASEN

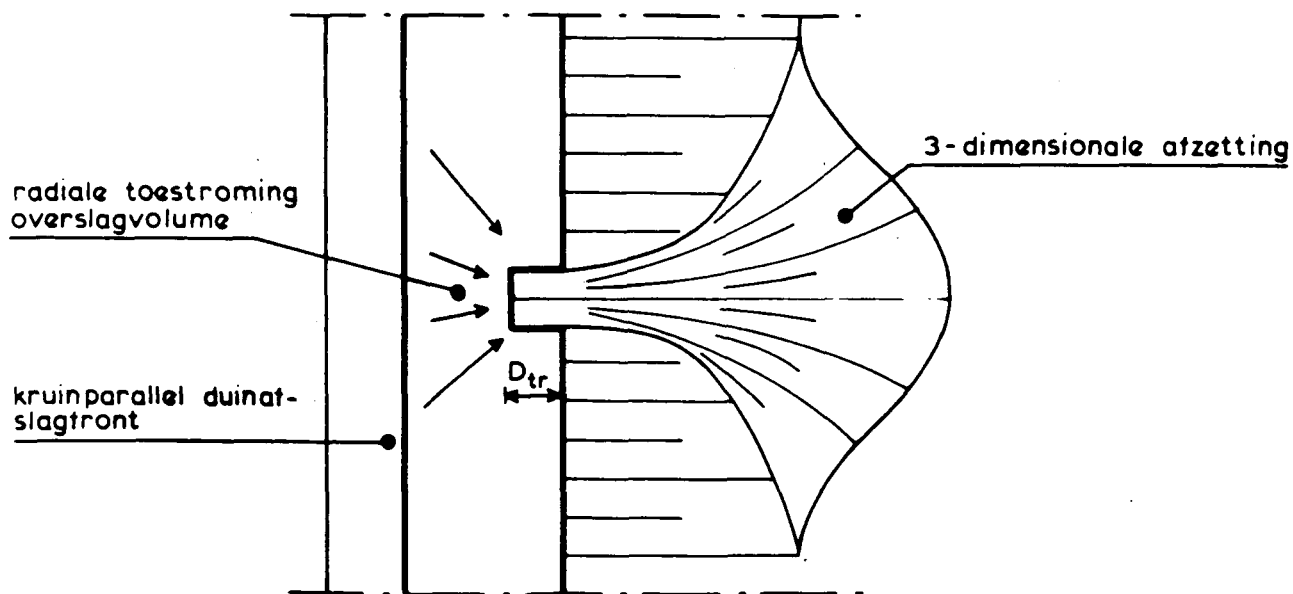
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 298

FIG. 1

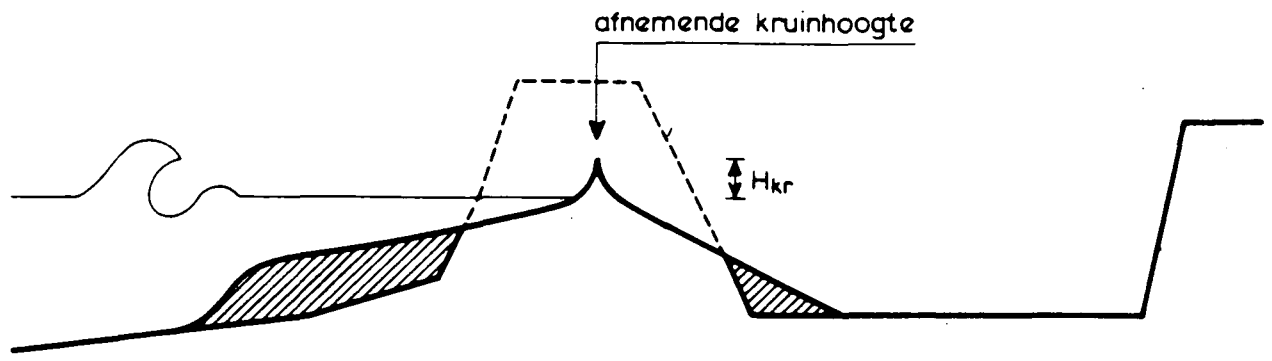


A. FASE I

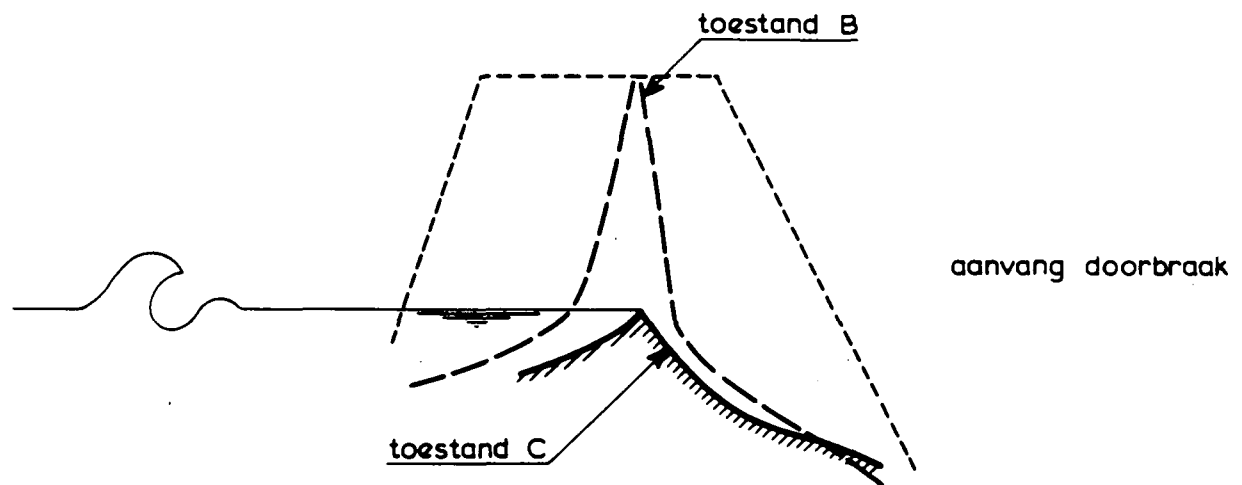


B. DRIE-DIMENSIONALE EFFECTEN

BEZW'JKFASE I; AFNAME KRUI NBREEDTE

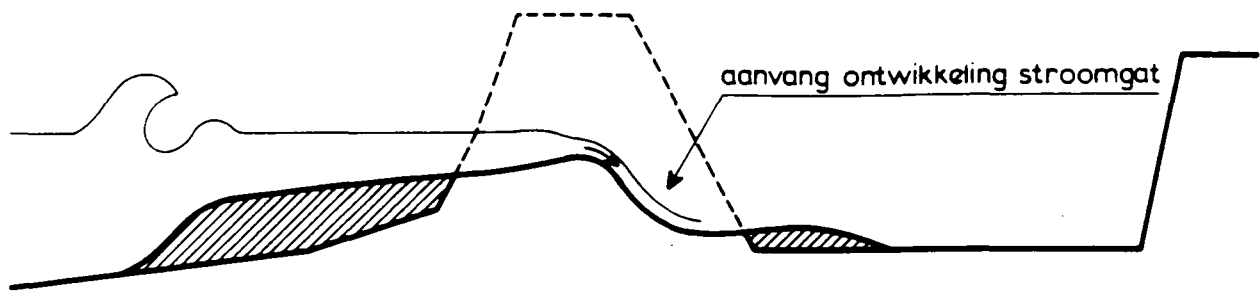


A. FASE II

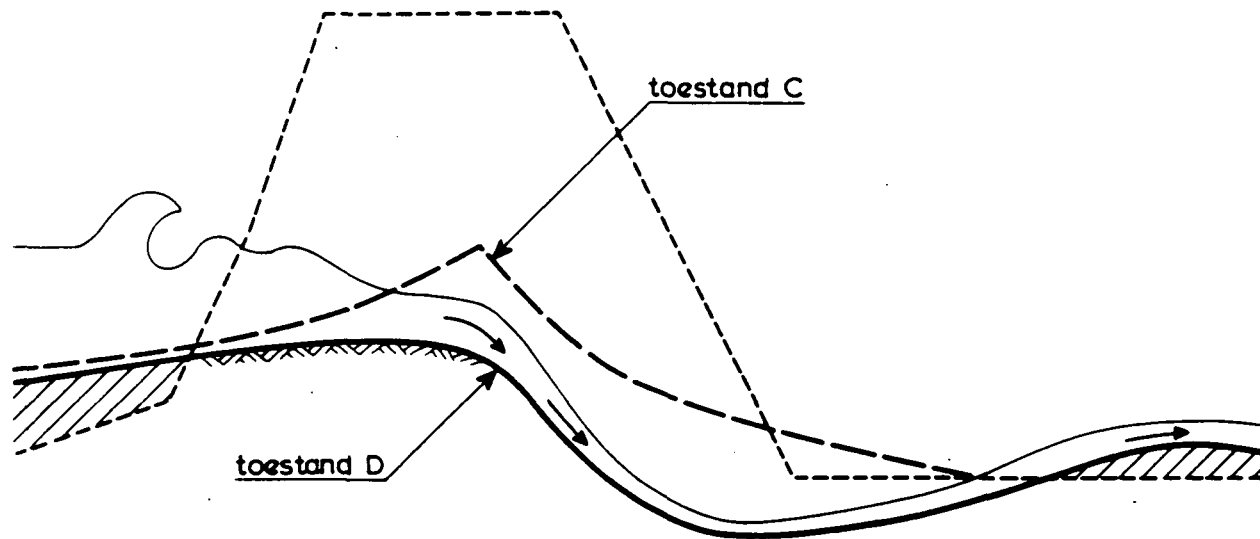


B. BEGIN- EN EINDTOESTAND

BEZWIJKFASE II ; AFNAME KRUIHOOGTE

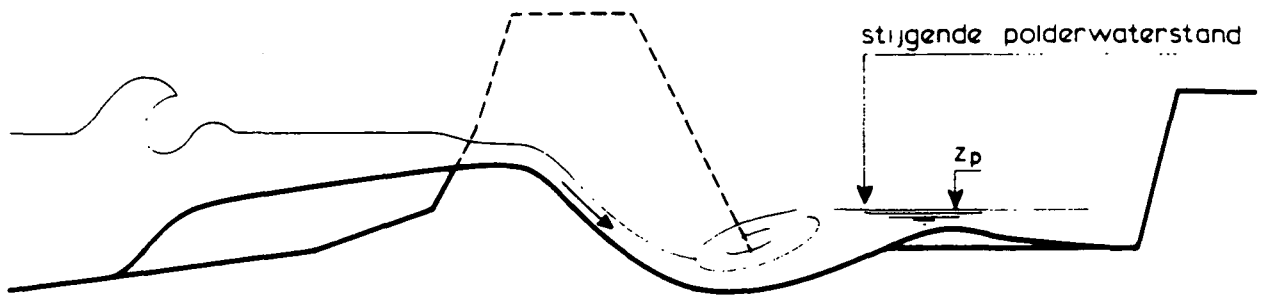


A FASE III

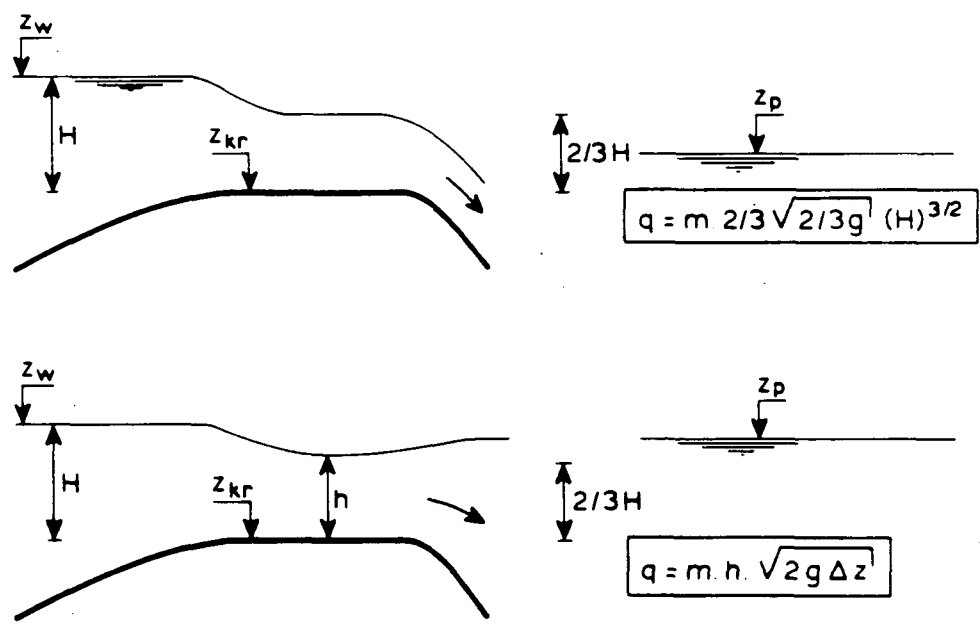


B. BEGIN- EN EINDTOESTAND

BEZWIJKFASE III; ONTWIKKELING STROOMGAT

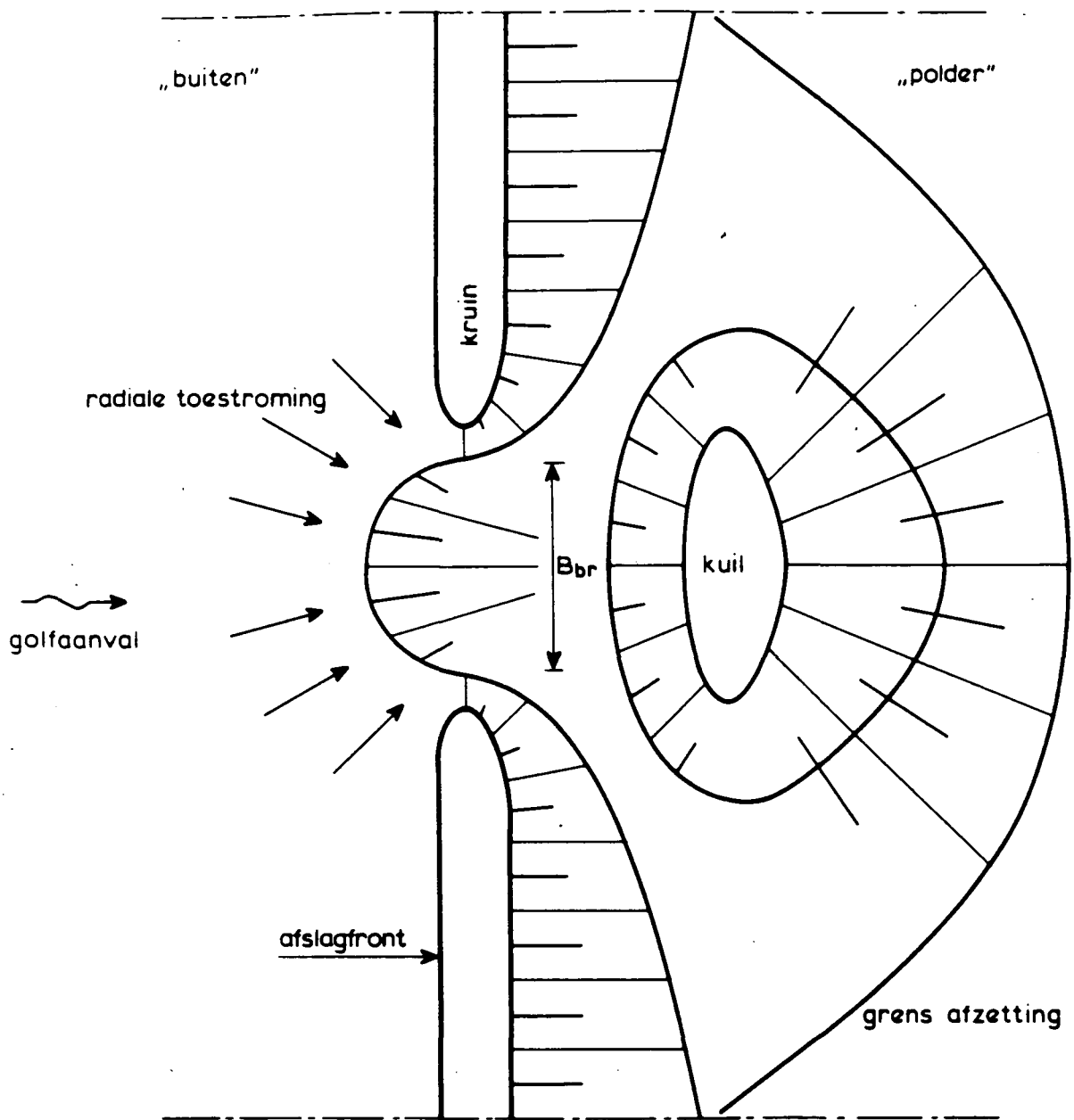


A. FASE IV

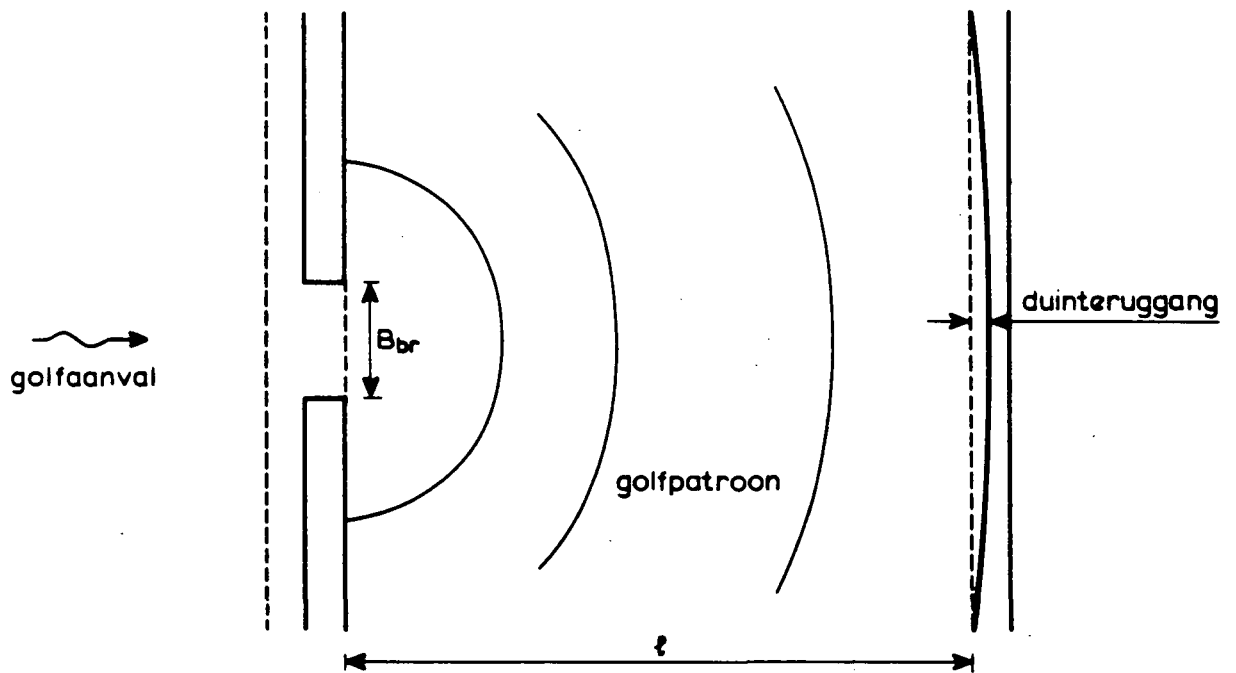
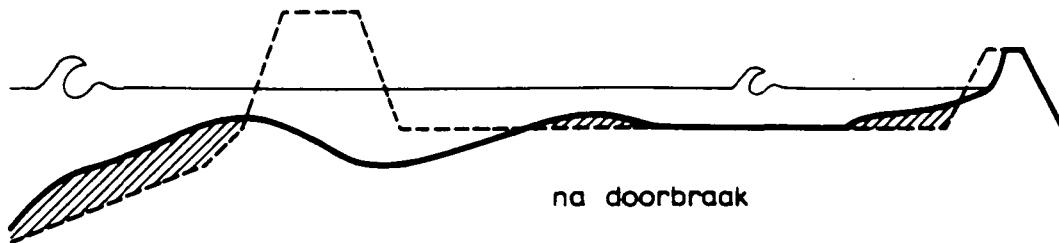
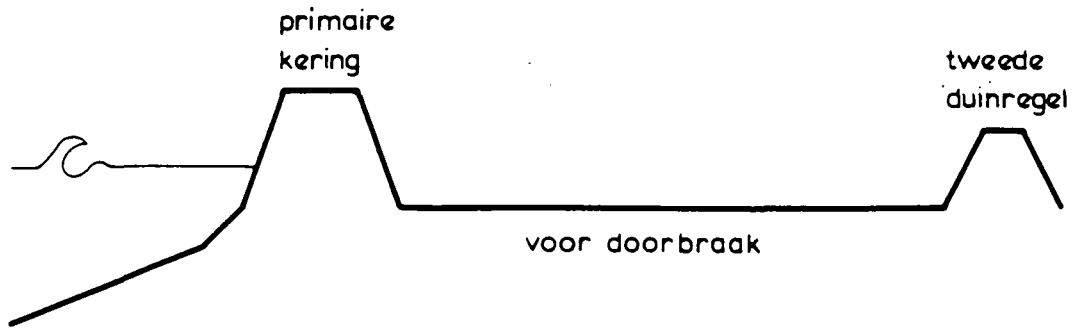


B. DEELFASEN IV-a EN IV-b

BEZWIJKFASE IV; VULLING ACHTERLAND

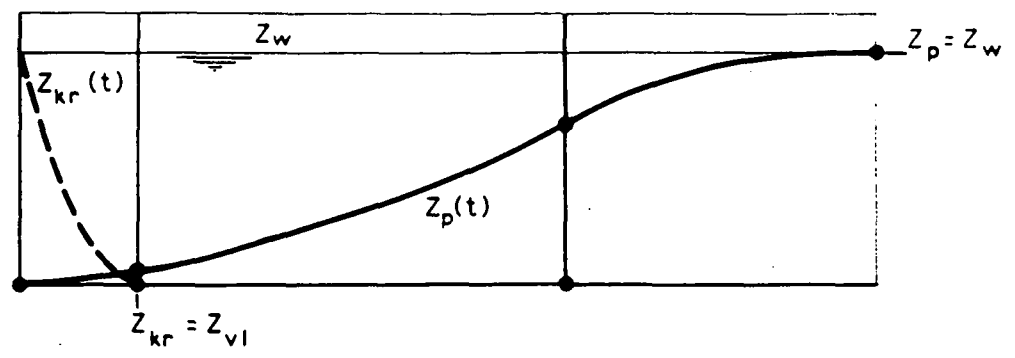


SITUATIE TIJDENS DOORBRAAK (FASE IV -a)

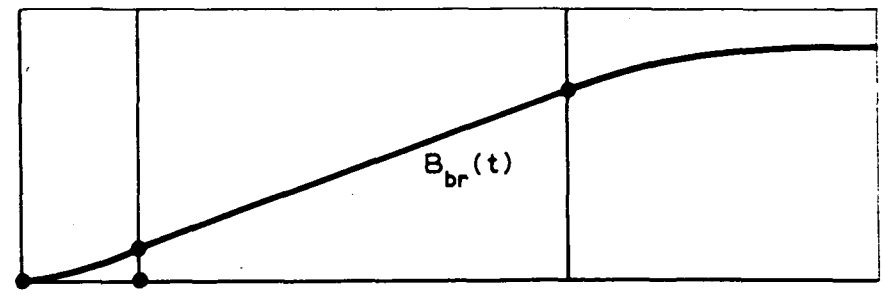


AANVAL TWEEDE DUINREGEL

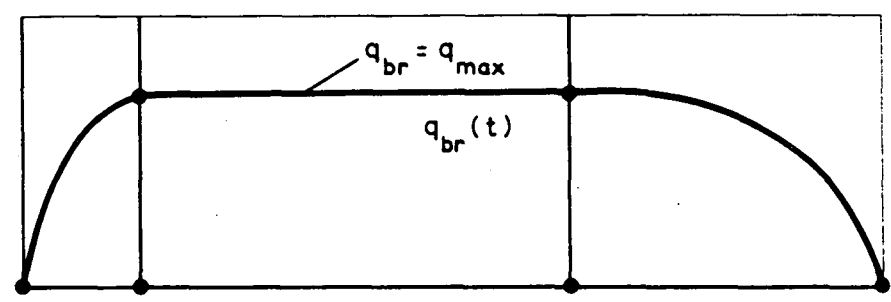
Polder -
peil



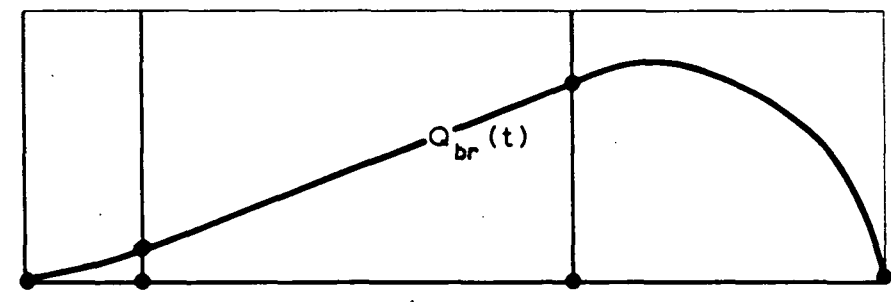
Bres-
breedte



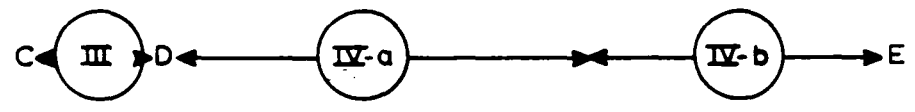
Bres-
debiet



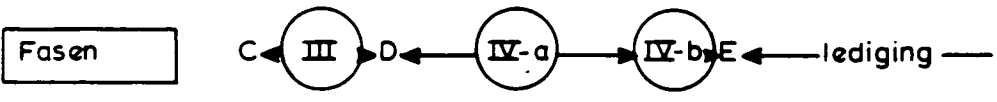
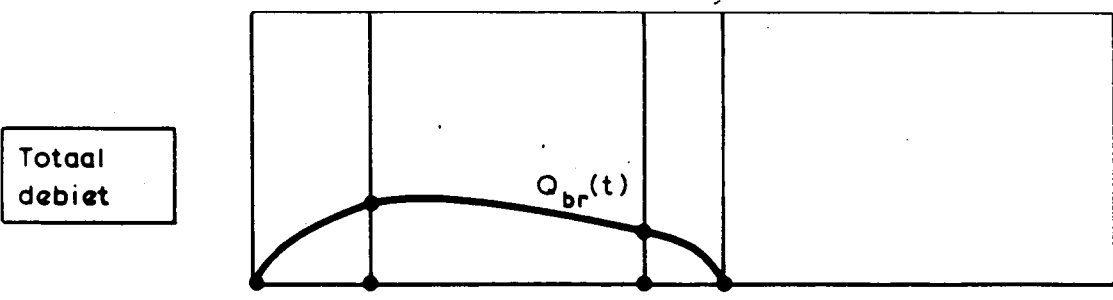
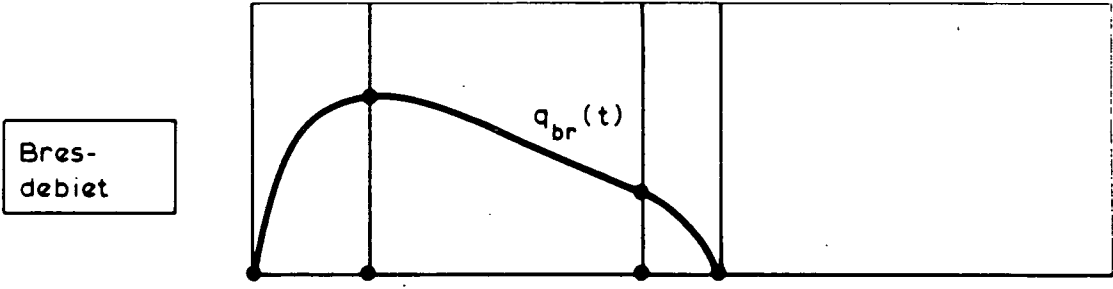
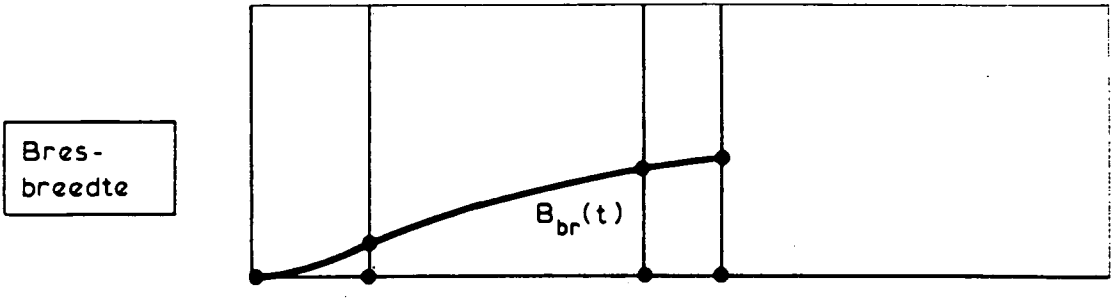
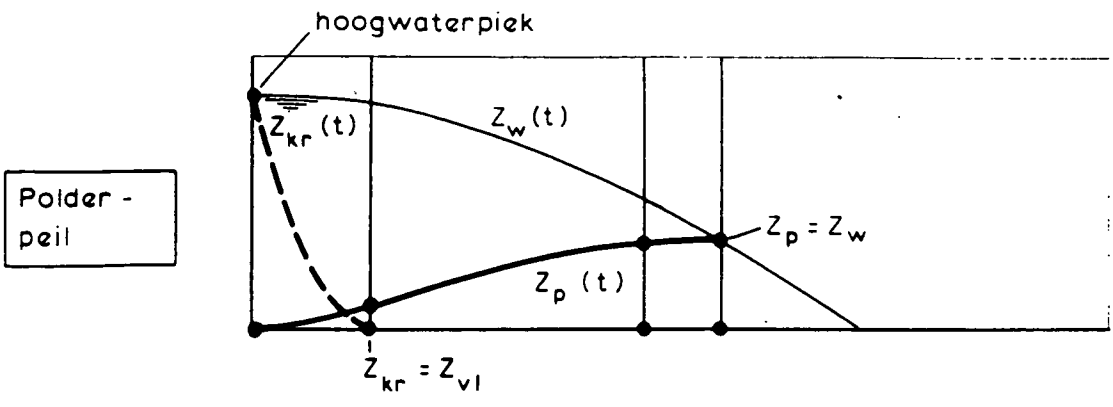
Totaal
debiet



Fasen



DUINDOORBRAAK BIJ VASTE WATERSTAND



DUINDOORBRAAK TIJDENS HOOGWATERPIEK