

NN31545.1537

NOTA 1537 ^H

juni 1984

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

BEREKENING VAN GRONDWATERSTANDEN
IN BEBOUWDE GEBIEDEN

Dr. G.P. Wind
J. Buitendijk



Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemidde-
len, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meest gevallen zullen de
conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog
niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

22 AUG. 1984

ISN-210100-02

INHOUD

	blz.
INLEIDING	1
PROBLEEMSTELLING	2
MODEL HYDRUR	4
Rekenwijze	5
Randvoorwaarden	6
Enkele factoren	6
Toetsing van HYDRUR op Broek in Waterland	8
MODEL TDSATU	13
Beschrijving	14
Rekenvoorbeeld	15
GRONDWATERSTANDSVERLAGING EN MAAIVELDDALING	18
MAATREGELEN OM GRONDWATERSTANDSDALINGEN ONDER GEBOUWEN TE BEPERKEN	19
Dakgoten en wateraanvoer	21
Omgeving van gebouwen	21
Hoogwatersloten	22
Voorbeeldberekening hoogwatersloten	24
LITERATUUR	

LITERATUUR

- BOELS, D 1983 Programma's van simulatie van grondwaterstanden in bebouwde en aangrenzende onbebouwde gebieden. ICW-Nota 1454
- BOELS, D 1983 Hydrologische en grondmechanische gevolgen van polderpeilverlaging. ICW-Nota 1466
- HERMSEN, H.M.G. 1983 De hydrologische gesteldheid op enkele meetlocaties. ICW-Nota 1477
- SCHOTHORST, C.J. 1977 Subsidence of low moor great soils in the western Netherlands. *Geoderma* 17:265-291
- STEENBRUGGEN, G.J.M. 1983 STAT een model voor quasi-3-dimensionale stationnaire verzadigde grondwaterstroming. ICW-Nota 1433

INLEIDING

De kennis van grondwaterstanden in bebouwde gebieden is van veel belang. Te hoge waterstanden, zowel als te lage waterstanden kunnen schade aan de bebouwing veroorzaken, zoals ongelijkmatige zakking en houtrot. In deze nota wordt een methode beschreven waarmee de invloed van ingrepen op de grondwaterstanden kunnen worden voorspeld.

Grondwaterstanden in bebouwde gebieden variëren niet alleen met de tijd onder invloed van regen en verdamping, doch ook met de plaats ten opzichte van ontwateringsmiddelen en verharde oppervlakken. De structuur van het ontwateringsstelsel kan zeer ingewikkeld zijn met open en/of gesloten leidingen, die elkaar kruisen en soms verschillende peilen hebben. De verdeling van onverharde en verharde oppervlakken is meest ook vrij grillig. Dat geldt ook voor de verdeling van niet verdampende, normaal verdampende en sterk verdampende (bomen) oppervlakken.

Door deze ingewikkelde verdeling van hydrologisch zeer relevante gegevens is het moeilijk, zo niet onmogelijk, te voorspellen wat het effect van een bepaalde ingreep op iedere plaats zal zijn. Velerlei ingrepen kunnen de grondwaterstanden beïnvloeden, niet slechts op de plaats van de ingreep doch ook ver daar vandaan. Men denke als voorbeelden aan peilveranderingen van kanalen, aanleg van drainage om te hoog water onder huizen te voorkomen, aanleg van nieuwe straten en plantsoenen, het opgroeien van bomen, grondwateronttrekking.

Deze nota geeft een rekenmethode, waarmee van plaats tot plaats en van tijd tot tijd de grondwaterstand kan worden voorspeld bij iedere verandering van hydrologisch relevante zaken. Hij is speciaal ontwikkeld ten behoeve van berekening van het effect van polderpeilverlaging maar kan evengoed worden toegepast om effecten van andere ingrepen te bestuderen.

PROBLEEMSTELLING

In bebouwde gebieden kan niet worden aangenomen dat regen en verdamping op iedere plek dezelfde zijn. De regen in en de verdamping van tuinen wijkt weinig af van die van landbouwpercelen. Onder gebouwen is geen verdamping, de regen wordt meestal opgevangen en afgevoerd. Voor pleinen en straten geldt bijna hetzelfde, zij het dat een deel van de regen in de grond dringt. Hoge bomen verdampen zeer veel water. Omdat daarmee rekening moet worden gehouden is het nodig dat regen en verdamping van plaats tot plaats verschillend kunnen worden ingevoerd.

Voor een plek midden tussen twee oneindig lange evenwijdige sloten niet afwijkend van zijn omgeving kan de hydrologie worden beschreven met een één-dimensionaal model. Slechts de verticale stroming is daar van belang. Voor plaatsen die niet midden tussen evenwijdige sloten liggen moet rekening worden gehouden met aan- en afvoer van water van naburige plekken in een richting loodrecht op de sloten. Voor die plaatsen is een twee-dimensionaal model nodig. Heeft men te maken met een patroon van sloten en verharde oppervlakten, die niet oneindig lang en evenwijdig zijn, maar elkaar onderling kruisen en slechts beperkte lengte afmetingen hebben, dan is slechts een driedimensionaal model in staat het verloop van het grondwater naar plaats en tijd te beschrijven. Dergelijke situaties doen zich veelal voor in bebouwde gebieden.

Een model om het verloop van grondwaterstanden in bebouwde gebieden naar tijd en plaats te kunnen beschrijven, moet dus voldoen aan de vereisten: driedimensionaal, verzadigde zone, onverzadigde zone, naar plaats variabele input, dynamisch in de tijd. Dergelijke modellen bestaan niet, omdat de benodigde rekentijd op de computer prohibitief zou zijn voor hun toepassing. Zelfs tweedimensionale modellen, die wel aan de andere 4 eisen voldoen vereisen een zo grote mate van specialistische kennis en zoveel rekentijd, dat ze niet op grote schaal kunnen worden toegepast.

Het probleem is daardoor niet in zijn geheel op te lossen met bestaande methoden. Daarom is gezocht naar een splitsing, die zowel logisch is als voor de delen afzonderlijk oplosbaar. Deze is ge-

vonden in het scheiden van de houtrotproblematiek en de zettingsproblematiek.

Voor houtrot is van eminent belang dat de grondwaterstanden, vooral in de zomerperiode, zeer correct worden gesimuleerd om het aantal dagen te berekenen dat houten funderingselementen boven het grondwater staan. Door de eis van drie-dimensionaliteit te laten vervallen kan een model worden gemaakt dat aan de andere eisen wel voldoet, waarbij een goede beschrijving van de onverzadigde zone van het grootste belang is. De plaatsen waar dit model kan worden toegepast moeten dan wel aan bepaalde hydrologische en topografische eisen voldoen.

In het kader van het onderzoek naar het effect van polderpeilverlaging op gebouwschade is het model TDSATU ontwikkeld, dat tweedimensionaal is en de waterhuishouding zowel in de verzadigde als in de onverzadigde zone beschrijft. Het is beschreven door BOELS (1983).

Voor de vrije maaiveldsdaling, basis voor de schadeberekening door gebouwzakking, is vooral de gemiddelde grondwaterstand van belang. Fluctuaties in zomer en winter kunnen globaler worden beschreven dan voor houtrot-studies nodig is. De onverzadigde zone kan dan buiten beschouwing worden gelaten, zoals ook gebruikelijk is in niet-stationaire drainage berekeningen. Door die vereenvoudiging is het wel mogelijk het model drie-dimensionaal te maken, waardoor het op iedere willekeurige plaats toepasbaar is. Voor dit doel is een model ontwikkeld, genaamd HYDRUR, dat in deze nota wordt beschreven.

MODEL HYDRUR

HYDRUR is een eenvoudig drie-dimensionaal finite difference model waarmee grondwaterstanden in bebouwde gebieden kunnen worden berekend. De naam is een afkorting van HYDRology of URban areas.

Een rechthoekig gebied wordt opgedeeld in een aantal vierkante vakken. Deze kunnen in beginsel iedere gewenste oppervlakte hebben; oppervlakten in de orde van 100 m^2 liggen het meest voor de hand. Het aantal vakken kan vrij worden gekozen; slechts de capaciteit van de computer en de rekenkosten stellen hieraan grenzen.

Per tijdstap worden voor ieder vak berekend:

- de stroming naar de 4 aangrenzende vakken
- de wegzijging of kwel naar de ondergrond
- de onttrekking van water door verdamping
- de voeding van het grondwater door regen.

De som hiervan, gedeeld door het effectieve poriëngehalte geeft de stijging of daling van het grondwater voor dat vak en in die tijdstap. Deze berekening wordt een zeer groot aantal malen herhaald. Voor een gebied van 200 vakken, bijvoorbeeld, en een tijdstapgrootte van 0,4 dag zijn voor het doorrekenen van een jaar 182 500 van deze berekeningen nodig.

Het model gaat uit van het zogenaamde Hollandse profiel, bestaande uit een slecht doorlatende bovenlaag van enige meters, op een goed doorlatende ondergrond. De stijghoogte van het diepe grondwater (randvoorwaarde) en de weerstand van de bovenlaag moeten bekend zijn, voor ieder vak apart. De bovengrond biedt ondanks zijn slechte doorlatendheid toch de mogelijkheid voor ontwateringsstromen naar de sloten en het tegengestelde daarvan: infiltratiestroming vanuit de sloten.

Wat HYDRUR onderscheidt van soortgelijke modellen is dat voor ieder vak de regen en de verdamping met een speciale factor kunnen worden vermenigvuldigd. Op de plaats waar een gebouw staat is geen verdamping en draagt de regen niet bij aan de voeding van het grondwater. Voor andere verharde oppervlakken als straten en pleinen geldt iets soortgelijks. Hoge bomen daarentegen kunnen zeer veel water verdampen.

Rekenwijze

De toename van de grondwaterstand Δh wordt berekend met:

$$\Delta h_i = \frac{\Delta t}{p} \left\{ \frac{2}{l^2} \sum q_{ij} + rP - eE + \frac{H-h_i}{C} + \frac{S-h_i}{R} \right\}$$

daarin is $\frac{2}{l^2} \sum q_{ij}$ de som van de toestroming (in m/dag) vanuit de aangrenzende vakken:

$$q_{ij} = (h_j - h_i) \frac{k_i D_i k_j D_j}{k_i D_i + k_j D_j}$$

De betekenis van de gebruikte factoren is als volgt; de benaming in het model HYDRUR is tussen haakjes opgegeven:

Δh_i	(DELTAH)	stijging grondwaterstand in vak i (m)
Δt	(DELTIM)	tijdstapgrootte (dag)
p	(POR)	effectief poriënvolume (fractie)
l^2	(AREA)	oppervlakte van het vak (m^2)
r	(RAINAR)	de oppervlakte waarop regen wordt geacht te vallen (fractie)
P	(RAIN)	de regenintensiteit (m/dag)
e	(EVAPAR)	het verdampend oppervlak (fractie)
E	(EVAP)	de verdampingsintensiteit (m/dag)
H	(ARHEAD)	stijghoogte grondwater in het eerste watervoerend pakket (m)
h_i	(HEAD)	phreatische grondwaterstand (m)
C	(ARTRES)	hydrologische weerstand in de bovenlaag (dag)
S	(OPHEAD)	slootwaterstand (m)
R	(RADRES)	slootweerstand (dag)
kD	(KADE)	transmissiviteit van de bovengrond (m^2 /dag)
h_j	(HEAD)	grondwaterstand in het naburige vak

Voor ieder vak gelijk zijn de variabelen Δt , l^2 , P en E .

De andere moeten per vak worden ingevoerd. De wijze waarop dit moet gebeuren wordt in de volgende hoofdstukken toegelicht.

Voor de stroming tussen twee vakken is het harmonisch gemiddelde van de twee kD -waarden gebruikt om ook bij grote verschillen daartussen toch een juist gemiddelde te verkrijgen.

Randvoorwaarden

De per vak op te geven slootweerstand en stijghoogten van het diepe grondwater en de per tijdvak in te voeren input gegevens: neerslag en verdamping vormen de expliciete randvoorwaarden. Impliciet houdt het model rekening met een stroming gelijk aan nul door de randen van het gebied. Het gebied moet dan ook zo groot worden gekozen dat onjuistheid van deze impliciete aanname geen invloed kan hebben op het gedeelte waarin men speciaal is geïnteresseerd. Het beste is om de randen van het gebied te leggen bij de sloten.

De begin grondwaterstand moet in ieder vak worden ingevoerd. Waar deze niet bekend is moet een schatting worden gemaakt voldoende ver voor de periode waarin men is geïnteresseerd.

Neerslag en verdamping kunnen zowel dag- als decadecijfers zijn. Voor de verdamping kiese men de waarden van de actuele verdamping van een korte vegetatie. Slootwaterstanden en stijghoogten van het diepe grondwater worden niet beïnvloed door regen en verdamping. Aangenomen wordt dat de polderpeilen in de tijd niet veranderen. Waar dat wel het geval is, moet de invoerfile worden aangepast.

Enkele factoren

Een aantal factoren behoeft enige toelichting. ARTRES en ARHEAD zijn besproken door STEENBRUGGEN (1983). Ze moeten weliswaar per vak worden ingevoerd maar zullen in een klein gebied weinig variëren.

KADE, de transmissiviteit van de bovengrond moet voor ieder vak worden bepaald. Dit kan door de doorlaatfactor K te meten en de dikte van de laag bovengrond waarin de stroming plaatsvindt te bepalen aan de hand van de methode van Hooghoudt. In de soort bodems waar de schadeproblematiek van gebouwen speelt, neemt de doorlaatfactor met de diepte vrij snel af. De KADE-waarden zullen veelal tussen 0,5 en 5,0 m²/dag liggen.

RADRES, de slootweerstand, wordt uitgedrukt in dagen; hij is het quotient van de dikte van de baggerlaag en de doorlaatfactor daarvan. De weerstand kan ook indirect worden bepaald via grondwaterstandsmetingen. Er bestaat bij Waterstaten, RID en ICW ook ervaringskennis over slootweerstand. RADRES is de totale slootwaterstand, de som van alle radiale en intrêe weerstanden.

Voor invoer in HYDRUR moet tevens rekening worden gehouden met de breedte van de sloot. Bedekt de sloot het gehele oppervlak van het vak dan kan de slootweerstand zonder meer worden ingevoerd. Is het slootoppervlak slechts een zeker percentage van het vak dan wordt RADRES gelijk aan de gevonden slootweerstand gedeeld door de oppervlaktefractie. Zie ook bij RAINAR en EVAPAR.

Sloten aan de rand van het gebied ontvangen niet alleen water uit het gebied maar ook uit de omgeving. In het model wordt daarmee geen rekening gehouden. Deze extra aanvoer kan in rekening worden gebracht door de slootweerstand evenredig te vergroten.

POR, het effectieve poriëngehalte is de verhouding tussen de hoeveelheid toegevoerd water en de grondwaterstandsstijging die daarvan het gevolg is (beide uitgedrukt in m). De vaste waarde van POR is het belangrijkste bezwaar tegen modellen van deze soort, verzadigde grondwatermodellen. Niettemin worden deze modellen zeer veel gebruikt omdat vervanging van POR door een realistischer aanname de modellen te bewerkelijk en te kostbaar zou maken. In werkelijkheid is het effectieve poriëngehalte afhankelijk van de diepte van de grondwaterspiegel onder maaiveld en van de verticale stroomsnelheid. De waarden van POR variëren tussen 0,40 voor grind tot 0,01 voor sterk verdichte zavel. Voor het gebruik in HYDRUR passe men waarden toe van 0,02 voor dichte zware klei tot 0,12 voor humusarm zand. De waarden kunnen worden bepaald door ter plaatse gevonden grondwaterstandsstijgingen te delen door de daarbij behorende neerslag, rekening houdend met de afvoer in hetzelfde tijdvak.

RAINAR en EVAPAR, de oppervlaktefracties waarop regen en verdamping een rol spelen worden per vak ingevoerd. Indien het gehele vak dezelfde samenstelling heeft kunnen bedragen worden gebruikt als in tabel 1. De per vak in te voeren waarden dienen naar oppervlakte-evenredigheid te worden samengesteld.

Dit geldt ook voor de sloten. Deze dienen als verharde oppervlakken te worden beschouwd, waaruit niets verdamppt en waar het schijnbaar niet regent. Daar het slootpeil constant wordt verondersteld hebben regen en verdamping ter plaatse van de sloot evenmin invloed op het grondwater als ter plaatse van een asfaltweg.

DELTIM, de tijdstapgrootte heeft geen invloed op het berekeningsresultaat, mits hij voldoende klein is gekozen. Indien te groot gekozen

wordt het model instabiel en komen er evident fouten of in het geheel geen resultaten.

De tijdstapgrootte kan worden berekend met de voorwaarde, dat gemaakte rekenfouten in het model niet versterkt moeten worden, maar verzwakt. Op grond daarvan is de tijdstapgrootte

$$\Delta t \leq \frac{P}{kD/l^2 + \frac{1}{R} + \frac{1}{C}}$$

Tabel 1. Waarden van RAINAR en EVAPAR voor een aantal terreinen

	RAINAR	EVAPAR
Tuinen, plantsoenen, weiden, akkers	1,0	1,0
Straat, afhankelijk van wegdek	0 - 0,4	0
Gebouw met regenafvoer naar riool of sloot	0	0
Gebouw zonder dakgoten	1,0	0
Grind	1,0	0
Rij hoge bomen	1,0	1,5 - 2,5
Groter oppervlak met hoge bomen	1,0	1,2
Parkeerterrein met bomen	0 - 0,4	0,5 - 1,5
Sloten	0	0

Voor een absoluut veilige berekening zoekt men de meest ongunstige factoren uit het hele array bij elkaar. Meestal echter doet zo'n ongunstige combinatie zich in geen enkel vak voor. Bovendien kan een geringe instabiliteit in een vak worden gecompenseerd door een stabiel naburig vak. Enig 'fingerspitzen' gevoel en wat 'trial and error' zijn daarom aanbevolen. De keuze is belangrijk omdat HYDRUR vrij veel rekentijd kan kosten, die omgekeerd evenredig is met Δt . Om de gedachten te bepalen denke men aan 10 cent per doorgerekende dag voor een gebied met 200 vakken.

Toetsing van HYDRUR op Broek in Waterland

Toetsing van een model kan geschieden op twee manieren, de toets op het principe en de toets op de overeenkomst van berekening met

waarneming. In het laatste geval toetst men eigenlijk niet het model maar de ingevoerde parameters.

De principiële toetsing geschiedt door de berekende resultaten te vergelijken met analytische oplossingen voor dezelfde omstandigheden. Vergelijking van HYDRUR met berekeningen met de formule van Hooghoudt en de rekenmethode van de Zeeuw-Hellinge leverde een perfecte overeenkomst op.

Voor de vergelijking van reken- en meetresultaten is gebruik gemaakt van de gegevens van Broek in Waterland, beschreven door BOELS (1983) en HERMSEN (1983). In deze plaats zijn gedurende 1982 wekelijkse waterstandswaarnemingen verricht in grondwaterstandsbuizen die in een ruitennet van 100 meter stonden. De waterstanden zijn tevens berekend met HYDRUR met als input de neerslag en verdampingscijfers per decade, zoals die in 1982 voorkwamen.

Het gedeelte van Broek in Waterland ten oosten van het Havenrak en ten noorden van de Middenweg is gekozen voor de toetsing. Dit gedeelte is bijna vierkant, heeft een oppervlak van ± 400 bij ± 350 m² en is omringd door water; aan de oostzijde met een peil van -1,95 m NAP en aan de andere zijden -1,49 m NAP. Over dit deel van Broek in Waterland is een vierkanten netwerk gelegd van 16 x 13 vakjes; elk vierkant heeft een zijde van 33,33 m.

Voor elk van de 209 vierkanten werden de 9 factoren ingevoerd, die meespelen in HYDRUR. De meeste gegevens konden worden ontleend aan BOELS (1983), STEENBRUGGEN (1983) en HERMSEN (1983). RAINAR en EVAPAR werden ontleend aan kaarten en luchtfoto's. Voor de slootweerstand werden schattingen gebruikt.

De meest gevoelige factor bleek te zijn de transmissiviteit van de bovengrond. De uit de literatuur overgenomen waarde van 6 m²/dag bleek verre van toereikend.

Met deze waarde zakten de grondwaterstanden in de zomer van 1982 tot -3,5 m NAP, terwijl de waarnemingen minimaal -2,2 m NAP lieten zien. Dat betekent, dat de berekende grondwaterstanden zakten tot 2 m onder polderpeil; dat is driemaal zoveel als de gemeten waterstanden, die tot 70 cm onder polderpeil daalden. Dit grote verschil kan slechts worden veroorzaakt door of een verkeerde schatting van de verdamping, of van KADE, het watervoerend vermogen. De andere factoren uit het ingangsarray kunnen niet zo'n grote invloed hebben.

De grootte van het verdampend oppervlak, EVAPAR was gemiddeld voor het gehele bebouwde gebied 0,62. Deze waarde zou tot 0,2 moeten worden verlaagd om de grondwaterdaling tot een derde te reduceren. Gezien de oppervlakte met bomen en tuinen in Broek lijkt dat wel zeer onwaarschijnlijk. De oplossing moet dus liggen in een grotere waarde van KADE. De toe te passen waarde van KADE is gevonden op grond van toepassing van de formule van Hooghoudt:

$$s = \frac{8 \text{ kdm}}{l^2}$$

Daarin is s de verdamping minus neerslag, voor de zomer van 1982 gemiddeld ongeveer 1,2 mm/dag; m is het verschil tussen sloot- en grondwaterstand, 70 cm en l de afstand tussen de evenwijdige sloten, 370 m. Substitutie van deze gegevens leidt tot $kd = 30 \text{ m}^2/\text{dag}$. Op grond van het feit, dat de infiltratie uit de sloten van 3 zijden komt in plaats van 2 in de formule, is KADE een waarde van $25 \text{ m}^2/\text{dag}$ gegeven.

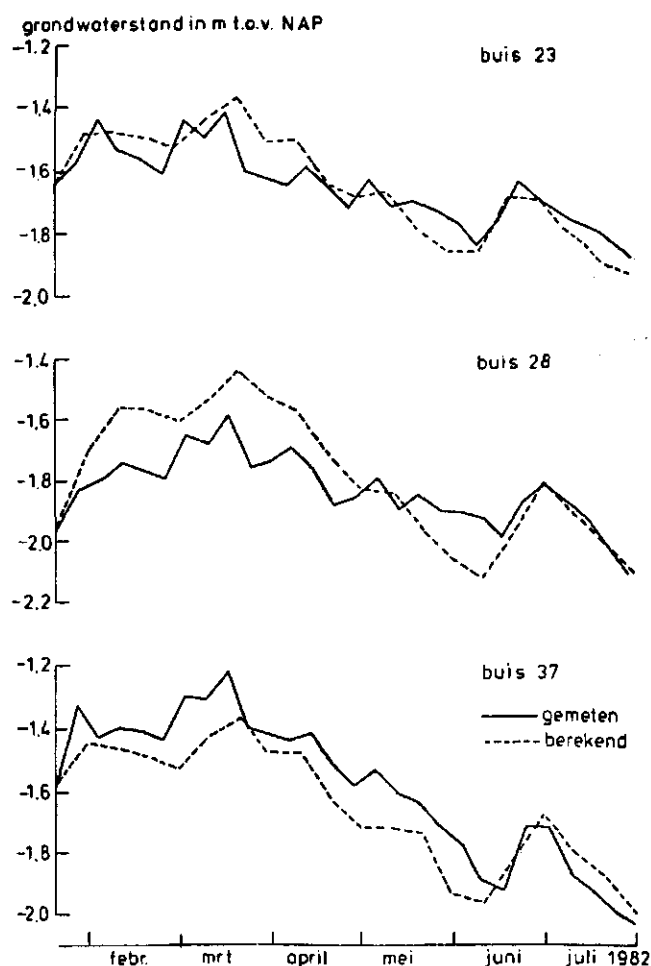


Fig. 1. Gemeten en met 'HYDRUR' berekende grondwaterstanden in 3 waterstandsbuizen te Broek in Waterland.

Gezien het feit dat een groot deel van het studiegebied bestaat uit opgebrachte en vergraven grond is die aanname niet onrealistisch.

In fig. 1 wordt het verloop van de grondwaterstanden getoond voor drie plaatsen in Broek, gemeten en berekend. Voor de plaatsen van de buizen zie fig. 2. Men ziet de overeenkomsten: ligging op hetzelfde niveau, het algemene patroon en het feit, dat beide curven tegelijk dalen en stijgen. Men ziet ook de verschillen in stijg- en daalsnelheid van gemeten en berekende curven in sommige perioden.

Een perfecte overeenstemming is niet mogelijk, doordat in beide gegevens fouten voorkomen, meetfouten in de ene en systeemfouten in de andere. Het model is globaal wel goed, doch het is niet bij uitstek geschikt om van dag tot dag de wisselingen in waterstanden te berekenen. Daarvoor is de aanname van een constante waarde van het poriëngehalte (POR) te grof.

Deze toetsing bleek slechts mogelijk door gebruik te maken van grondwaterstandswaarnemingen in het gebied. Ook in het algemeen zal ten behoeve van de toepassing van hydrologische modellen kennis over de voorkomende grondwaterstanden nodig zijn ter verificatie van gemeten parameters.

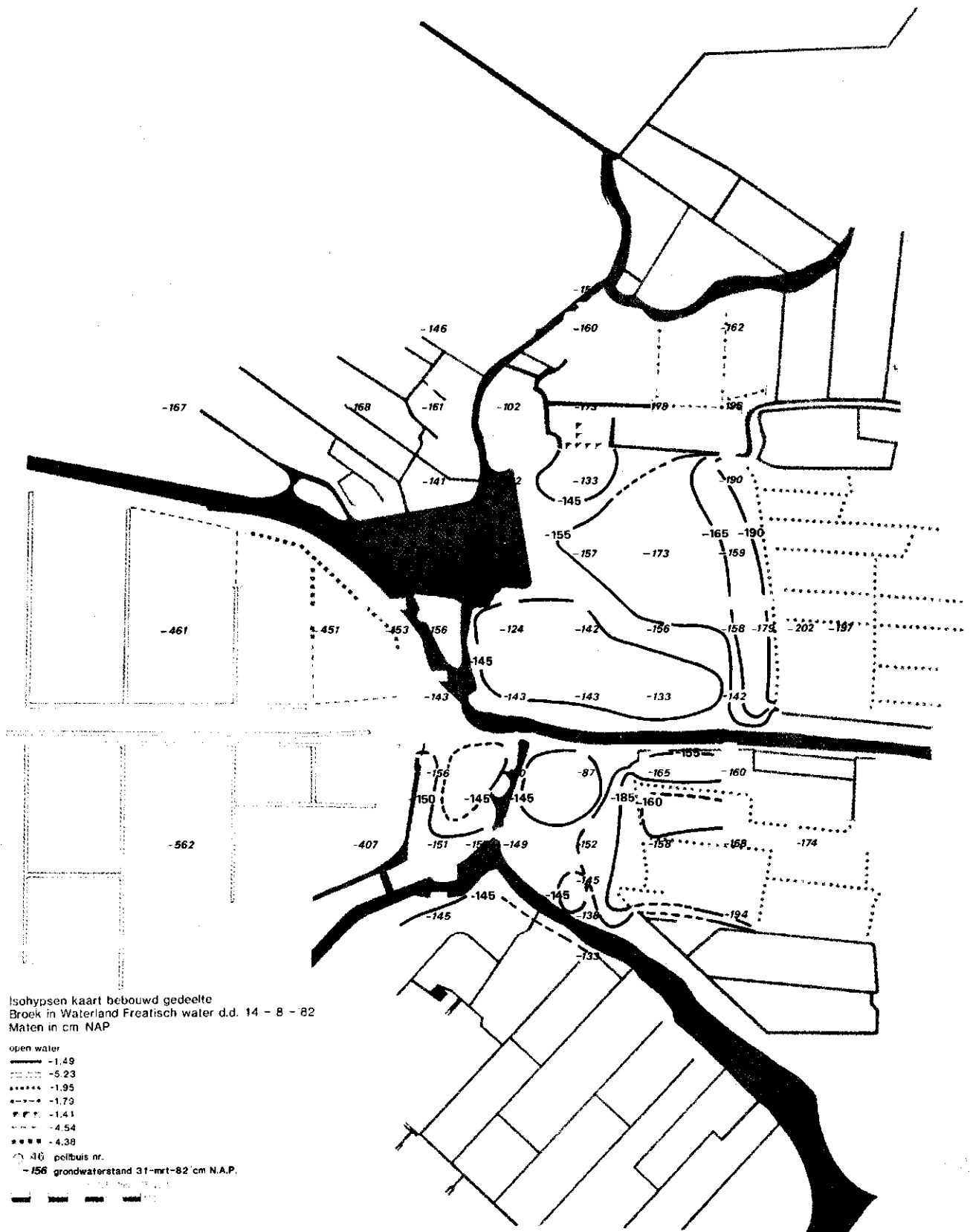


Fig. 2. Broek in Waterland met grondwaterstandsbuizen, open waterpeilen en isolyphen op 31 maart 1982

Hydrologische modellen, die slechts de verzadigde zone van de grond beschrijven geven correcte waarden voor de gemiddelde grondwaterstand. De grondwaterfluctuaties worden echter slechts bij benadering gesimuleerd. De oorzaak daarvan is het gebruik van een vaste bergingscoëfficiënt. In werkelijkheid is die bergingscoëfficiënt zowel statisch (afhankelijk van de hoogte van het grondwater), als dynamisch (afhankelijk van de stroomsnelheid) variabel. Modellen die zowel de verzadigde als de onverzadigde zone beschrijven houden met die variabiliteit impliciet rekening en beschrijven daarmee de grondwaterfluctuaties correct.

Een voorbeeld van dit verschil tussen de twee soorten modellen geeft fig. 3. Deze geeft het verloop van de grondwaterstand dat optreedt als gedurende 15 dagen regen met een intensiteit van 6 mm/dag valt, gevolgd door een droge periode. Dit verloop is berekend met een uitsluitend verzadigd model en een model, dat zowel de verzadigde als de onverzadigde zone beschrijft. Het verzadigde model geeft een duidelijk convexe stijging van het grondwater die direct op dag 0 begint. Het onverzadigde model laat, terecht, een vertraging zien in de stijging, die in tegenstelling met het verzadigde model, vrijwel rechtlijnig verloopt. Aan het einde van de regenperiode gaat de grondwaterstijging bij het gecombineerde model nog even voort en gaat dan geleidelijk over in een daling. Het verzadigde model toont een abrupt einde van de stijging gevolgd door een zeer snelle concave daling. De gemiddelde grondwaterstand is echter vrijwel gelijk voor beide modellen.

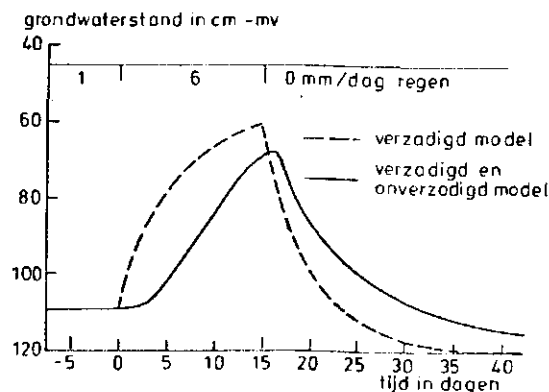


Fig. 3. Reactie van de grondwaterstand op een regenperiode; berekend met twee verschillende modellen

Ook in de algemene trend hebben beide modellen veel overeenkomst, maar het verzadigde model kan wel fouten maken in de orde van decimeters. De correlatiecoëfficiënt tussen beide lijnen is slechts 0,54. Voor een correcte beschrijving van het grondwaterverloop is dus een verzadigd-onverzadigd model nodig. Die correcte beschrijving is vooral gewenst bij de houtrotproblematiek: het aantal dagen dat een funderings-element boven het grondwater staat moet worden berekend.

Met deze doelstelling is het model TDSATU (two dimensional, saturated and unsaturated) ontwikkeld.

Beschrijving

In deze nota is volstaan met een summiere beschrijving van TDSATU; uitvoeriger informatie wordt aangetroffen bij BOELS (1983; 1 en 2).

Het model is tweedimensionaal; dat wil zeggen dat stroming van water plaatsvindt in verticale richting en in één horizontale richting, de lengterichting van het model. Stroming loodrecht op de lengterichting wordt geacht niet te bestaan. Die veronderstelling mag alleen worden toegepast op een stroomlijn die loodrecht staat op niet al te zeer gekromde isohypsen; bijvoorbeeld in een raai loodrecht op 2 evenwijdige zeer lange sloten.

In de lengterichting is het model opgedeeld in een aantal vakken. Deze staan onderling met elkaar in verbinding door de verzadigde zone; op dezelfde wijze als in HYDRUR doch nu heeft ieder vak 2 buurvakken in plaats van 4. Vanuit ieder vak kan grondwaterstroming plaatsvinden naar links en rechts (de twee buurvakken), naar onderen (de diepe watervoerende laag) en naar boven (de onverzadigde zone). In ieder vak bevindt zich tevens een onverzadigd model; de stroming daarin is uitsluitend verticaal, het is dus één-dimensionaal.

Van boven naar onder bestaat het onverzadigd model uit een wortelzone, waaruit water door verdamping wordt onttrokken en waaraan door regen water wordt toegevoegd. Tussen de wortelzone en het grondwater bevindt zich een capillaire zone, die afhankelijk van de grondwaterstand variabel van dikte is. In het model kan de capillaire zone uit drie lagen van verschillende samenstelling bestaan.

De stroomsnelheid in de onverzadigde zone wordt beïnvloed door twee externe factoren: de vochtspanning aan de onderzijde van de wortelzone en de diepte van de grondwaterstand. In het model wordt aangenomen dat de stroomsnelheid in de capillaire zone op iedere diepte hetzelfde is. Daarmee is het model niet echt dynamisch in de tijd, maar pseudo-stationnair. Dit is zo gedaan om de benodigde rekentijd zoveel mogelijk te beperken. Dynamische modellen vereisen namelijk zeer veel rekentijd. In een twee-dimensionaal model moet een groot aantal onverzadigde modellen simultaan werken, zodat de rekentijd zou worden verveelvoudigd.

De pseudo-stationnaire rekenwijze vergt slechts een fractie van de rekentijd van dynamische modellen en wordt daarom zeer veel toegepast. TDSATU verschilt van andere toepassingen doordat per vak verschillende percentages verhard oppervlak kunnen worden ingevoerd. Bovendien is in dit model rekening gehouden met reductie van de verdamping als gevolg van droogte in de wortelzone.

Rekenvoorbeeld

Voor een raai in Broek in Waterland is het model TDSATU door BOELS (1983,1) toegepast. Aan deze nota zijn de gegevens van deze paragraaf ontleend. Deze raai loopt van het havenrak via de waterstandbuizen 27, 28 en 29 (zie figuur 2) naar de oostgrens van Broek. Het havenrak heeft een peil van -1,49 m NAP. In de onderbemalen polder ten oosten van Broek is het polderpeil momenteel -1,95 m NAP. Voorgesteld is dit peil te verlagen naar -2,30 m NAP. Om grondwaterdalingen onder de bebouwing aan de oostzijde van Broek in Waterland te vermijden of zoveel mogelijk te beperken kan de sloot aan de oostgrens op het huidige peil van -1,95 m NAP worden gehandhaafd. Daardoor wordt het peil in die sloot dus niet mee verlaagd met de rest van de onderbemaling en kan hij worden beschouwd als een hoogwatersloot.

Wat het effect is van de voorgestelde peilverlaging en het al of niet handhaven van het peil in de hoogwatersloot wordt getoond in tabel 2. Men ziet dat de gemiddelde grondwaterstanden onder het gebouw dicht bij de hoogwatersloot slechts 1 cm daalt bij de voorgestelde verlaging van Waterlands peil met 4 cm en van de onderbemaling met 35 cm. Krijgt de hoogwatersloot hetzelfde peil als de onderbemaling (variant 1a) dan zou de grondwaterdaling onder dat gebouw beduidend meer zijn, namelijk 22 cm. Dat is evenwel toch nog minder dan de peilverlaging in de hoogwatersloot van 35 cm tussen variant 1 en 1a.

Tabel 2. Doorgerkende varianten met bijbehorende peilen en het effect daarvan op de gemiddelde grondwaterstand onder een gebouw op 13 m afstand van de hoogwatersloot

Variant omschrijving	no.	Waterlands peil	Peil onderbemaaling	Peil hoogwatersloot	Gemiddelde grondwaterstand
Huidige toestand	0	-1,49	-1,95	-1,95	-1,84
Voorgestelde peilverlaging met hoogwatersloot	1	-1,53	-2,30	-1,95	-1,85
Idem, zonder hoogwatersloot	1a	-1,53	-2,30	-2,30	-2,06

In fig. 4 wordt dit nog eens gedemonstreerd aan de hand van de frequentieverdeling van de grondwaterstanden, zoals die onder het huis op 13 m van de hoogwatersloot voorkwamen. De polderpeilverlaging met hoogwatersloot (vergelijk 0 en 1) heeft zeer weinig invloed op de voorkomende grondwaterstanden. In het gebied van de lage waterstanden is zelfs geheel geen verschil. Het weglaten van de hoogwatersloot (vergelijk 1 en 1a) leidt tot een aanmerkelijke grondwaterdaling. In het gebied van de hoge grondwaterstanden (winter) is de daling vrijwel gelijk aan die van de hoogwatersloot maar de diepste zomergrondwaterstanden dalen veel minder.

Tabel 3. Benodigde informatie voor toepassing van modellen

Omschrijving	Bron
hoogtepuntenkaart	
bodemopbouw, ondiep	Stiboka
" diep	Rijks Geologische Dienst, ICW
(geo)-hydrologische eigenschappen, vochtretentiecurven, capillair geleidingsvermogen	Rijks- en Provinciale Waterstaat, Rijks Geologische Dienst, ICW, Stiboka
grondwaterstandsverloop	DGV-TNO, ICW, Gemeente
slotenkaart + peilen en slootweerstand	Gemeente, Waterschap ICW
huisnummerkaart + wegenplan	Gemeente
neerslag en openpanverdamping	KNMI

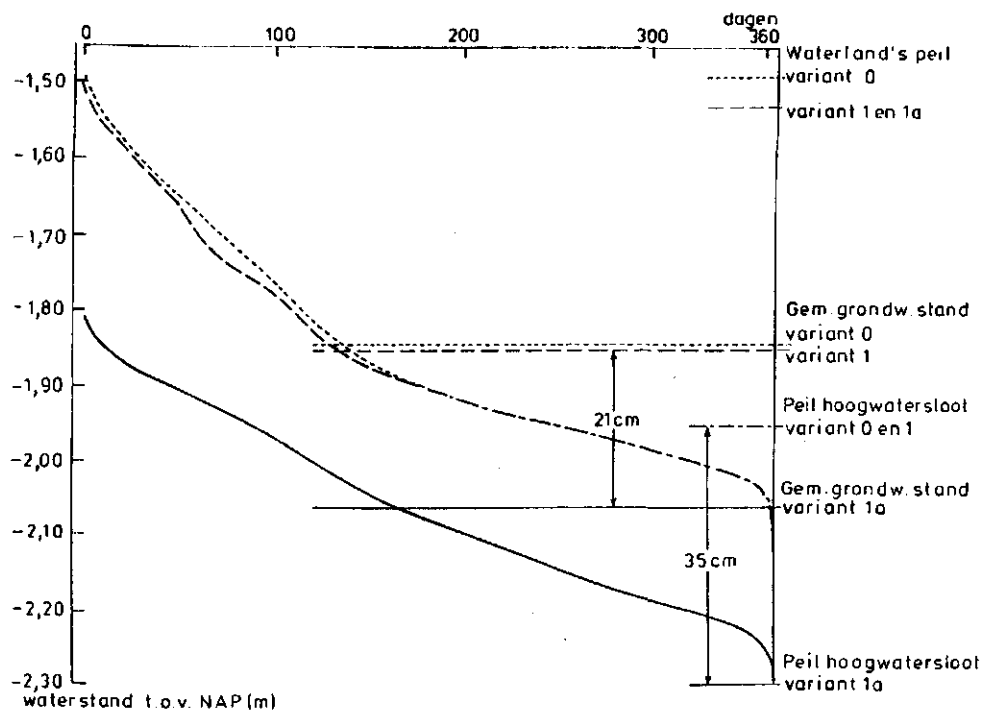


Fig. 4. Cumulatieve frequentieverdeling van grondwaterstanden onder een gebouw in Broek in Waterland op 13 m. afstand van een hoogwatersloot, bij 3 peilvarianten (zie tabel 2)

G r o n d w a t e r s t a n d s v e r l a g i n g e n m a a i v e l d d a l i n g

De totale maaiveld daling die het gevolg is van de grondwaterstandsverlaging heeft op zijn beurt ook weer invloed op de grondwaterstandsverlaging. Naarmate het grondwater dieper staat, zijn immers de bergingscoëfficiënt en de verdampingsreductie groter. In fig. 4 is duidelijk te zien wat daarvan het gevolg is: bij de variant 1a waarbij de hoogwatersloot een peil van -2,30 m NAP heeft, daalt zelfs de diepste zomergrondwaterstand niet onder dat peil. Bij de varianten 0 en 1 dalen de zomerwaterstanden wel onder het peil van de hoogwatersloot.

Een polderpeilverlaging veroorzaakt in eerste instantie een verandering in de hydrologie, waarbij de drainage- en infiltratiestromingen zich op een lager niveau ten opzichte van maaiveld afspelen, dan voor de peilverlaging. De maaiveldsdaling, die daarop volgt maakt dat geleidelijk aan de afstand tussen maaiveld en grondwaterstand afneemt, zodat de hydrologie geleidelijk weer verandert, nu in de richting van de oude toestand voor de peilverlaging. In gebieden met zeer slappe lagen en vooral in veengebieden zal op den duur het maaiveld evenveel zakken als de polderpeilverlaging heeft bedragen.

Ruwweg genomen is de daling van de gemiddelde grondwaterstanden direct ongeveer de helft van de polderpeilverlaging. Dit wordt niet alleen geconstateerd op de ICW-ontwateringsproefvelden (SCHOTHORST 1977). Ook uit toepassing van modellen, dus deductief, blijkt dat de grondwaterstandsverlaging kleiner is dan de polderpeilverlaging. De oorzaak daarvan is dat de peilverlaging een aantal tegenkoppelingen oproept:

1. Bij diepere grondwaterstanden is de onverzadigde zone dikker; daar kan dan meer water aan worden onttrokken en dus is de onttrekking aan het grondwater kleiner.

2. De drogere omstandigheden bij diepere ontwatering geven een grotere verdampingsreductie.

3. Diepere grondwaterstanden leiden tot toename van de kwel of vermindering van de wijziging.

4. De doorlaatfactoren in klei en veengronden nemen doorgaans met de diepte af; bij de gemiddelde afvoer is de opbolling bij diepere polderpeilen dan ook groter dan bij ondiepe.

5. Bij diepe peilen is de hoeveelheid oppervlakkig afstromend water kleiner dan bij de ondiepe; de ondergrondse afvoer is dus groter en daarmee ook de gemiddelde opbolling.

Het effect van deze tegenkoppelingen kan, afhankelijk van de bodemeigenschappen, variëren van zeer groot tot verwaarloosbaar klein.

Na omstreeks 30 jaar is het maaiveld in veengebieden even ver gedaald als de peilverlaging bedroeg. Daarmee is ook het grondwater even ver gedaald. Deze uiteindelijke grondwaterstand is het die voor zettingsberekeningen van belang is.

In gebieden waar een maaiveldsdaling optreedt door zetting, krimp en/of oxydatie moet men daarmee rekening houden bij de berekening van de grondwaterstandsverlaging. Dat heeft ook zijn repercussie voor de soort rekenmodellen die men dient te gebruiken.

Waar men een totale maaiveldsdaling (zetting, krimp en oxydatie) verwacht die de polderpeilverlaging benadert gebruikt men HYDRUR of een dergelijk verzadigd model zonder iets te veranderen aan verdamping en poriënvolume. De berekende grondwaterstandsverlagingen houden dan geen rekening met verandering in de dikte van de onverzadigde zone. Daarmee krijgt men een verwachting van de eindsituatie.

Waar geen maaiveldsdaling van betekenis is te verwachten gebruikte men TDSATU of een ander onverzadigd model. Deze houden wel rekening met verandering in de dikte van de onverzadigde zone. Men kan ook gebruik maken van HYDRUR; dan moeten evenwel de bodemkundige factoren, die de bovengenoemde tegenkoppelingen beheersen correct worden ingevoerd. De mogelijkheden daarvoor zijn beperkt.

Dit houdt tevens in dat het gebruik van HYDRUR vooral geïndiceerd is ten behoeve van berekening van de vrije maaiveldsdaling en gebouwzakking en dat TDSATU vooral in aanmerking komt voor houtrotstudies.

MAATREGELEN OM GRONDWATERSTANDSDALINGEN ONDER GEBOUWEN TE BEPERKEN

Indien polderpeilverlagingen oorzaak zijn van grondwaterstands-dalingen onder gebouwen, is het soms mogelijk om tegenmaatregelen te nemen, die deze dalingen beperken. De effecten daarvan hangen sterk af van de plaatselijke topografie, de hydrologische eigenschappen van het gebied en van de weersgesteldheid. De modellen HYDRUR en TDSATU maken

het mogelijk de effecten van tegenmaatregelen onder allerlei omstandigheden te voorspellen. Daarvoor is het uiteraard nodig dat men kan beschikken over de benodigde gegevens, zoals die zijn vermeld in tabel 3.

De tegenmaatregelen kunnen zich richten op het gebouw zelf, de directe omgeving daarvan of op een wat groter gebied. Bij het eerste denke men aan regenafvoer naar het grondwater in plaats van naar de riolering of aan wateraanvoer; bij het tweede aan verwijdering van bomen of het aanbrengen van verharde oppervlakken rond het gebouw en bij het laatste aan de aanleg van sloten met een hoog peil nabij de bebouwing, zogenaamde hoogwatersloten. Daar het aantal varianten oneindig groot is, is hier volstaan met een aantal voorbeelden. Deze zijn alle doorgerekend met hetzelfde regen- en verdampingspatroon, zie tabel 4.

Tabel 4. Standaard weer-patroon gebruikt voor de berekening van het effect van een aantal maatregelen

No.	Duur dagen	Regen mm/dag	Verdamping mm/dag
1	100	1	0
2	20	0	3
3	10	3	3
4	10	0	3
5	10	3	3
6	10	0	3

Aan het eind van periode 1, als het 100 dagen lang 1 mm/dag heeft geregend treft men de gemiddelde grondwaterstand. In Nederland bedraagt het neerslagoverschot immers ongeveer 1 mm/dag. Aan het eind van periode 6 vindt men een situatie als in een vrij droge zomer. In twee maanden is dan 180 mm water verdampt, terwijl in diezelfde tijd 60 mm regen is gevallen.

5.5.2. Dakgoten en wateraanvoer

De regen die op een gebouw valt wordt meestal afgevoerd naar de riolering of naar een sloot. Men kan de dakafvoer laten infiltreren in de grond onder of nabij het gebouw. Bij grote regenintensiteiten zal dat mogelijk problemen opleveren, maar daarvoor kan een technische oplossing worden gevonden. Hier wordt slechts behandeld wat het effect is op de grondwaterstanden onder een gebouw tussen alle regen afvoeren en alle regen infiltreren. Voor een gebouw met een grondoppervlak van 200 m^2 bedroeg het verschil 4 cm aan het eind van periode 1, waarin 100 dagen lang 1 mm regen per dag viel. In de zomerperiode varieerde het van 2 cm na de regenloze perioden 4 en 6 tot 8 cm na de regenperioden 3 en 5.

Deze getallen werden gevonden bij een kD -waarde van $3 \text{ m}^2/\text{dag}$. Op meer doorlatende gronden zijn de verschillen tussen al of geen dakgoten kleiner, in het algemeen omgekeerd evenredig met kD .

Een zelfde verhoging als door het weglaten van regenafvoer naar de riolering kan men ook bereiken door kunstmatige wateraanvoer: 2 mm/dag over een oppervlak van 200 m^2 , of wel 400 liter per dag.

5.5.3. Omgeving van gebouwen

De omgeving van gebouwen heeft een grote invloed op de grondwaterstanden. Verharde oppervlakten, zoals asfalt, verdampen geen of nauwelijks water. Gazons, parken en tuinen onttrekken wel water door verdamping. Bomen, vooral hoge vrijstaande bomen, verdampen zeer veel water. Ook via de regen heeft de omgeving invloed. De regen, die op asfalt terecht komt gaat meestal naar de riolering. De ideale grondbedekking om hoge waterstanden te krijgen is grint: alle regen infiltreert in de grond en er is geen verdamping.

In tabel 5 worden de berekende grondwaterstanden gegeven aan het einde van periode 6 onder een gebouw van 200 m^2 dat midden tussen twee sloten ligt, die 80 m van elkaar verwijderd zijn. De berekening heeft plaatsgevonden bij 2 kD -waarden. Onder relatieve regen en verdamping staan de factoren waarmee deze gegevens bij de berekening zijn vermenigvuldigd. De berekening is uitgegaan van een 10 m brede strook met de genoemde eigenschappen rondom het gebouw, terwijl in de rest van het gebied regen en verdamping normaal waren.

Tabel 5 . Grondwaterstanden in cm onder slootpeil onder gebouwen met verschillende omgeving

Omgeving	Relatieve		kD = 3	kD=7 m ² /dag
	regen	verdamping		
Bomen	1	2	71	52
Gras	1	1	53	42
Asfalt	0	0	36	33
Grind	1	0	22	26

Hoewel dit slechts een momentopname betreft kan toch wel de conclusie worden getrokken dat de invloed van de omgeving enorm groot is. De verschillen liggen in de orde van decimeters. Ze komen vooral voor in de zomer omdat 's winters de verdamping nagenoeg nihil is.

De invloed van de omgeving kan evenals de invloed van dakgoten ook worden vertaald in termen van wateraanvoer. Zo komt het kappen van bomen over 1000 m² en vervangen door gras overeen met een verdampingsreductie van 180 mm = 180 m³ in 60 dagen; dus met een wateraanvoer van 3 m³/dag in de zomer.

Hoogwatersloten

Hoogwatersloten zijn sloten met een hoog peil die zijn aangelegd om het grondwater nabij gebouwen zodanig hoog te houden dat schade aan de gebouwen zoveel mogelijk wordt beperkt of voorkomen. Het effect van hoogwatersloten is tweeledig: in de zomer kan door infiltratie vanuit de hoogwatersloot wateraanvoer naar het grondwater plaatsvinden, en in de winter wordt de afvoer van grondwater naar de sloten beperkt.

De werking van hoogwatersloten wordt bepaald door een veelheid van factoren: onderlinge afstand, afstand tot bebouwing, peilverschil met omgeving, stijghoogte diepe grondwater, c-waarde, kD-waarde en vooral de slootweerstand. Een voorbeeld van de invloeden van een aantal factoren, een gevoeligheidsanalyse, wordt gegeven in tabel 6 . Bij de variatie van een factor hebben de andere factoren de waarden van de middelste regel.

Tabel 6. Gevoeligheidsanalyse van het effect van hoogwatersloten voor een aantal factoren; de grondwaterstanden midden tussen twee sloten (grw) werden berekend in cm onder slootpeil bij een permanente verdamping van 1 mm/dag.

Stijghoogte diepe grw. (m)	Weerstand afd.pakket		Doorlaat vermogen		Sloot- afstand		Sloot- breedte		Sloot- weerstand		
	grw.	(d)	grw.	(m ² /d) grw.	(m)	grw.	(m)	grw.	(d)	grw.	
0	61	1000	99	1	123	50	58	2	134	10	65
-1	92	2000	92	2	92	75	92	5	92	30	92
-2	122	4000	87	4	74	100	126	8	77	90	145

De tabel laat zien dat de invloed van de genoemde factoren aanzienlijk is. Het is dan ook geen wonder dat de meningen over het effect van hoogwatersloten verdeeld zijn. Het kan van geval tot geval sterk verschillen. Bij de ongunstigste combinatie van factoren is er in het geheel geen effect, bij een gunstige combinatie kunnen hoogwatersloten goed aan hun doel beantwoorden.

De hydrologische gegevens: stijghoogte, weerstand afdekkend pakket en het doorlaatvermogen dient men te kennen en als gegeven te aanvaarden. De topografische gegevens: slootafstand en -breedte kan men beheersen. De slootweerstand is een gegeven waarvan onvoldoende bekend is in hoeverre het is te beheersen. Sloten die uitsluitend infiltreren en waarin geen grondwater uitstroomt blijken vaak 'potdicht' te zitten, dit wil zeggen dat ze een zeer grote weerstand hebben.

De in de tabel getoonde werkingen zijn in zekere mate overdreven omdat voor iedere situatie een infiltratiestroming van 1 mm/dag is aangenomen. In werkelijkheid vindt een zekere terugkoppeling plaats doordat het langer duurt voordat een diepe grondwaterstand is bereikt dan een ondiepe. Dit feed-back-effect zit impliciet verwerkt in de modellen HYDRUR en TDSATU. Deze modellen brengen ook het voorjaars-effect in rekening. Zou een hoogwatersloot helemaal niet infiltreren, door een grote slootweerstand, dan veroorzaakt hij toch wel dat de winter- en voorjaarsgrondwaterstanden hoger zijn dan zonder die sloot het geval zou zijn. Daardoor worden dus hogere gemiddelde grondwaterstanden verkregen en duurt het langer voordat een diepe zomerstand is bereikt.

Voorbeeldberekening hoogwatersloten

Met HYDRUR is voor een fictief voorbeeld-gebied doorgerekend wat het effect is van hoogwatersloten bij een polderpeilverlaging.

In het gebied staan 8 huizen aan twee kanten van een weg, zie fig. 5. De huizen staan tussen sloten met een onderlinge afstand

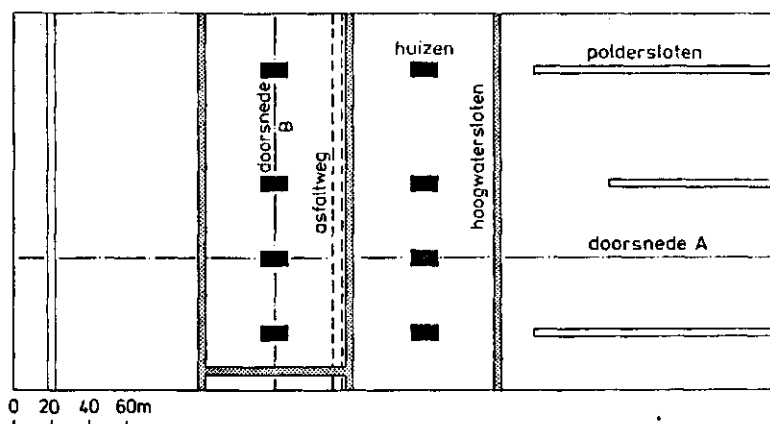


Fig. 5. Fictief voorbeeldgebied met hoogwatersloten

van 80 m. Op een plaats zijn twee sloten door een dwarssloot verbonden. De begroeiing bestaat uit gras en tuinen; er zijn geen hoge bomen, dus $EVAPAR = 1$, evenals $RAINAR$. Onder de huizen, die elk een oppervlakte van 200 m^2 beslaan zijn beide factoren nul. Achter de rechtse huizen is een poldergebied waar de sloten loodrecht staan op sloten bij de huizen.

Het gebied heeft een polderpeil van $+ 1,00 \text{ m NAP}$; alle sloten hebben dat peil. Het peil zal worden verlaagd naar $+ 0,5 \text{ m NAP}$. De drie sloten voor en achter de huizen, inclusief de verbindingssloot kunnen het oorspronkelijke peil behouden.

De waterstanden zijn berekend met de regen- en verdampingscijfers van tabel 4. Fig. 6 toont de grondwaterstanden aan het eind van periode 6 voor doorsnede A voor de drie varianten:

1. oorspronkelijk polderpeil $+ 1,0 \text{ m NAP}$.
2. integraal verlaagd polderpeil $+ 0,5 \text{ m NAP}$
3. verlaagd polderpeil ($0,5 \text{ m}$) met hoogwatersloten ($1,0 \text{ m}$).

Door de integrale polderpeilverlaging met $0,5$ dalen de grond-

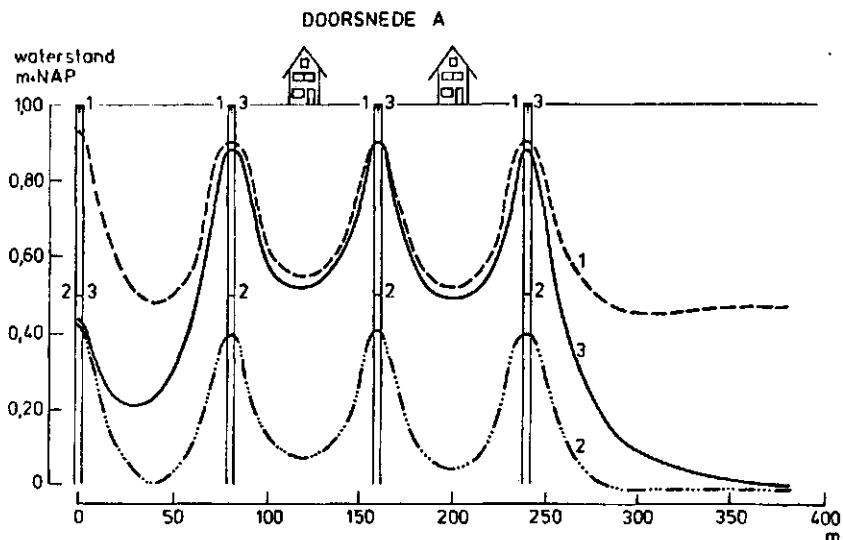


Fig. 6. Grondwaterstanden aan het eind van periode 6 (tabel 4) in raai A (fig. 5) bij het oorspronkelijke peil (1), bij het verlaagde peil zonder (2) en met (3) hoofdwatersloten

waterstanden ongeveer 0,47 m. Legt men hoogwatersloten aan, dan blijft de grondwaterdaling beperkt tot 0,02 m. Dat geldt zowel voor de zomerwaterstand van fig. 6, als voor het jaargemiddelde.

In fig. 7, dwarsdoorsnede B, ziet men de grondwaterstand aan het eind van periode 6 (tabel 4) dalen vanaf de verbindingssloot. De grondwaterstand onder het rechtse huis is 0,20 m hoger dan onder het linkse. Door aanleg van een nieuwe verbindingssloot, bij het

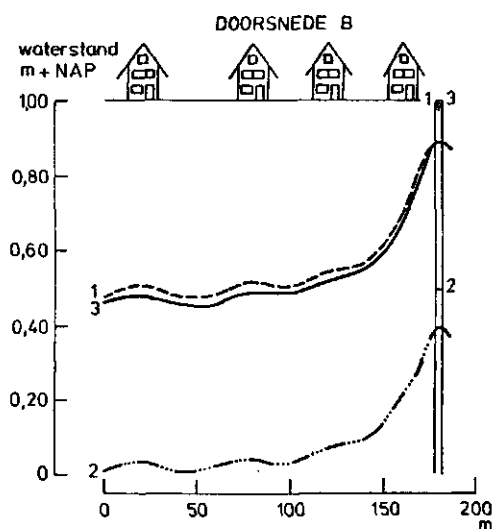


Fig. 7. Grondwaterstanden aan het eind van periode 6 (tabel 4) in raai B (fig. 5) bij het oorspronkelijke peil (1), bij het verlaagde peil zonder (2) en met (3) hoofdwatersloten 25

linkse huis, in het algemeen dus door verdichting van het net van hoogwatersloten, kan men een belangrijke grondwaterstijging verkrijgen.

In fig. 7 ziet men tevens de onregelmatigheden in de grondwaterstand die zijn ontstaan doordat op de ene plaats wel een huis staat en op de andere niet.

De bij de berekening gebruikte factoren zijn $KADE = 5 \text{ m}^2/\text{dag}$, $ARTRES = 2000$ dagen, $ARHEAD = -0,2$ m voor de peilverlaging en $-0,4$ m daarna, $POR = 0,05$ en $RADRES$, de slootweerstand is 10 dagen.

De slootweerstand is in een aantal berekeningen gevarieerd. Bedroeg de grondwaterstandsverlaging ten opzichte van de uitgangstoestand bij een slootweerstand van 10 dagen 2,5 cm; bij $RADRES = 30$ was die verlaging 17 cm en hij liep op tot 32 cm bij een slootweerstand van 70 dagen.

Bij grote slootweerstand is het effect van hoogwatersloten dus illusoir. Doch ook bij die hoge slootweerstand van 70 dagen was er nog steeds een grondwaterstandsverschil van 0,20 m tussen het linkse en rechtse huis van fig. 16. Verdichting van het net van hoogwatersloten, eventueel door infiltratiedrains vlak bij de huizen, is dus het overwegen waard.