

In Memoriam

Arnold Verruijt (1940 - 2022)

MARK BAKKER, HENK M. HAITJEMA EN OTTO D.L. STRACK

Arnold Verruijt was civiel ingenieur en hoogleraar grondmechanica aan de TU Delft van 1975 tot 2002. Arnold's grootste wetenschappelijke bijdragen waren op het gebied van elasticiteitstheorie en poro-elasticiteit (voorheen consolidatietheorie). Daarnaast heeft hij een belangrijke bijdrage geleverd aan het vakgebied van de grondwaterstroming. Arnold was in staat om op een begrijpelijke manier uit te leggen hoe oplossingen verkregen kunnen worden voor grondwaterproblemen, zowel met analytische als met numerieke methoden. Al in de jaren zeventig liet Arnold zien wat de waarde van numerieke modellen is door het implementeren van de eindige-elementenmethode in computerprogramma's die draaiden op de voorlopers van de PC die toen beschikbaar kwamen. De programma's waren heel simpel doch heel bruikbaar en zorgden ervoor dat studenten en collega's de principes van numerieke methoden konden leren en toepassen.



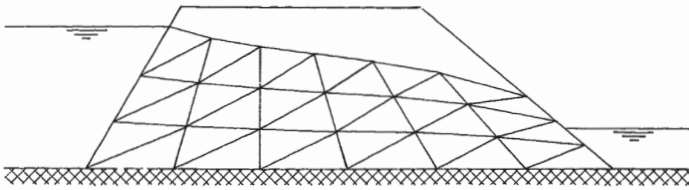
Afbeelding 1: Arnold Verruijt ontvangt de Maurice A. Biot medaille in 2014

Arnold Verruijt heeft twee grondwaterboeken geschreven, waarvan één met Jacob Bear, en nog negen andere boeken. Daarnaast heeft hij 124 wetenschappelijke artikelen gepubliceerd over vele onderwerpen, variërend van heel praktisch tot zeer theoretisch, maar altijd goed leesbaar en gebaseerd op fundamentele principes.

Belangrijkste grondwaterpublicaties

In 1969 schreef Arnold Verruijt een hoofdstuk over de elastische berging van watervoerende pakketten (Verruijt, 1969). Het unieke aan dit hoofdstuk is dat hij de inmiddels vaak geciteerde bergingsvergelijking afleidt vanuit de principes van de grondmechanica. Daarnaast behandelt hij het toen enigszins mysterieuze Noordbergum-effect. Dit effect werd voor het eerst waargenomen tijdens een pompproef bij het dorpje Noordbergum (Noardburgum) in Friesland. De pompproef werd uitgevoerd in het eerste watervoerende pakket. Na het aanzetten van de pomp bleek de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket eerst omhoog te gaan! Verruijt wist dit gedrag te verklaren vanuit de principes van de grondmechanica en kon het ook simuleren (Figuur 7 in Verruijt, 1969).

In 1970 publiceerde Verruijt één van de eerste boeken die volledig gewijd is aan grondwatermechanica: *Theory of Groundwater Flow* (Verruijt, 1970). Het boek is een compacte uiteenzetting van de basisprincipes van de grondwaterstroming. Het grootste deel van het boek is gewijd aan analytische oplossingen voor stationaire stroming, variërend van eenvoudige ééndimensionale oplossingen voor semi-spanningswater tot ingewikkelde twee-dimensionale oplossingen voor stromingsproblemen met vrije randen (de grondwaterspiegel of een interface tussen zoet en zout grondwater), waarbij Verruijt gebruik maakte van complexe getallen en de hodograafmethode. Verruijt was in staat om moeilijke onderwerpen op een eenvoudige en duidelijke manier uit te leggen, wat het boek heel leesbaar maakt. Hoofdstuk 10 betreft een korte beschrijving van de eindige-elementenmethode, waar tot dan toe nog weinig over geschreven was in de grondwaterliteratuur. Verruijt werd een groot uitdrager van de eindige-elementenmethode. In de tweede editie van *Theory of Groundwater Flow* (Verruijt, 1982) breidde hij het hoofdstuk over de eindige-elementenmethode uit met een aantal BASIC computerprogramma's die gedraaid konden worden op de Commodore 64 (één van de eerste 'home computers' met 64 KB geheugen), die in datzelfde jaar uitgekomen was. Zo geeft Verruijt een script voor het modelleren van grondwaterstroming door een dijk, inclusief de grondwaterspiegel in de dijk. Dat is een lastig probleem, want de positie van de grondwaterspiegel (en dus de rand van het model) is onbekend voordat het probleem opgelost is. Het model bestaat uit 36 driehoekige elementen (afbeelding 2). Het script bestaat uit slechts 40 regels (compacte) BASIC code, inclusief drie regels data-invoer, een implementatie van de Gauss-Seidel-methode om de matrix iteratief op te lossen, en een iteratie om de positie van de grondwaterspiegel te bepalen. Zo'n kort programmaatje en de bijbehorende uitleg stelt de lezer in staat om precies te begrijpen hoe de methode werkt. En de resultaten zijn natuurlijk volledig reproduceerbaar (toen al, in 1982!). Het converteren van de BASIC-programma's naar een moderne computertaal (bijvoorbeeld Python) zou nog steeds een zeer goede manier zijn om de basisprincipes van de eindige-elementenmethode te begrijpen.



Afbeelding 2: Strooming door een dam met een grondwaterspiegel gesimuleerd met 36 driehoekige elementen (Verruijt, 1982)

In 1987 schreef Arnold Verruijt zijn tweede boek over grondwaterstroming, dit keer samen met Jacob Bear, getiteld *Modeling Groundwater Flow and Pollution* (Bear and Verruijt, 1987). De eerste zeven hoofdstukken (geschreven door Bear) gaan over de wiskundige theorie die de transportprocessen in de ondergrond beschrijven. Hoofdstuk 8 t/m 13 (geschreven door Verruijt) gaan over oplossingen voor de differentiaalvergelijkingen die in het eerste deel van het boek afgeleid zijn. Arnold beschrijft vier numerieke methoden: de eindige-differentiemethode, de eindige-elementenmethode, de randelementenmethode en de analytische-elementenmethode, maar de focus ligt vooral op de eerste twee methoden. Hij geeft 39 numerieke voorbeelden voor grondwaterstroming en stoftransport inclusief voorbeelden met dispersie en dichtheidsstroming. De voorbeelden worden wederom vergezeld van BASIC computerprogramma's, input data en (grafische) output. De resultaten van de eindige-elementenmethode worden vergeleken, waar mogelijk, met analytische oplossingen om zowel de kracht als de beperkingen van de numerieke methode te evalueren. Met dit boek bouwde Verruijt voort op zijn eerdere succes om een wiskundige uitwerking te combineren met korte computerprogramma's, zeker nu steeds meer mensen een computer op hun bureau hadden staan. De computerprogrammaatjes van Bear en Verruijt (1987), en ook van een aantal andere boeken van Verruijt, zijn beschikbaar op <https://geo.verruijt.net>

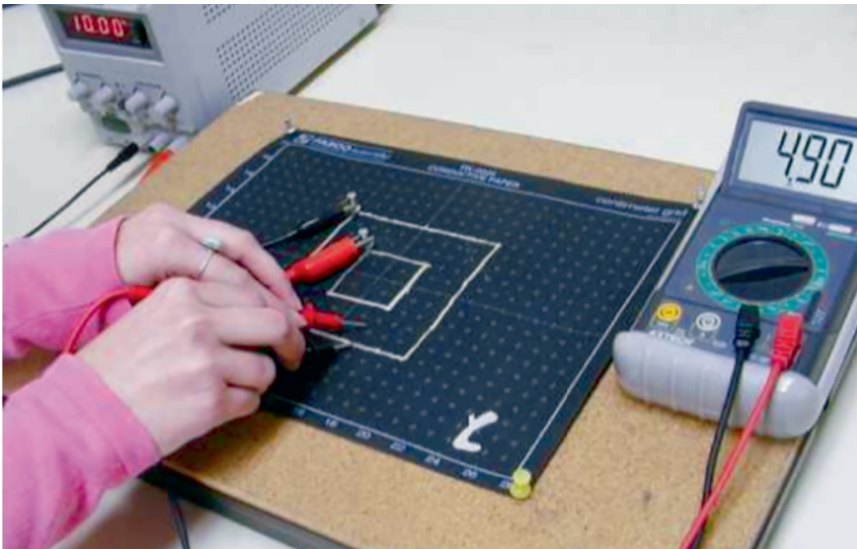
Arnold Verruijt's laatste boek, *Theory and Problems of Poroelasticity*, heeft hij elektronisch gepubliceerd op zijn eigen website (Verruijt, 2016). Ook dit boek bevat, niet verrassend, een set computerprogramma's, dit keer in C, waarvan executables beschikbaar zijn op Verruijts website. Het boek bevat een uitgebreide discussie over poro-elasticiteit, wat vroeger consolidatietheorie heette. Voor grondwateringenieurs is hoofdstuk 5 wellicht het interessantst. Dit hoofdstuk gaat over pompputten en de vergelijkingen worden afgeleid vanuit het oogpunt van de grondmechanica. Verruijt laat onder andere zien dat horizontale vervormingen van de ondergrond niet altijd verwaarloosd kunnen worden tijdens het pompen, hoewel dat meestal wel gebeurt (bij de oplossingen van Theis en Hantush, bijvoorbeeld). In de laatste hoofdstukken van dit boek simuleert Verruijt het Noordbergum effect met de eindige-elementenmethode, waar hij in 1969 ook al over schreef (Verruijt, 1969).

Docent en mentor

Arnold gaf colleges aan de TU Delft over grondmechanica, grondwaterstroming, toegepaste mechanica en elasticiteitstheorie. Zijn manier van onderwijsgeven was uniek. Hij was in staat om op een hele rustige manier ingewikkelde onderwerpen zo uit te leggen dat het relatief makkelijk te volgen was. Menig student

denkt met plezier terug aan zijn colleges. En studenten die zelf het onderwijs in gingen probeerden zijn manier van onderwijs geven te kopiëren. Arnold werd meerdere malen gekozen tot beste docent bij zijn faculteit van civiele techniek in Delft en werd ook geëerd met de Leermeesterprijs van de TU Delft in 1994. Daarnaast heeft hij vele bijdragen geleverd aan de ontwikkeling van het onderwijs (zowel binnen de TU als via de KNAW) en als voorzitter of commissielid van een groot aantal wetenschappelijke en maatschappelijke commissies.

Tijdens zijn vroege jaren als docent was er een interessant experiment bij het vak grondwatermechanica waarbij studenten gebruik maakten van papier dat elektriciteit geleidt (Teledeltospapier). Omdat de stroming van elektriciteit beschreven kan worden met dezelfde differentiaalvergelijking als de stroming van grondwater, kun je er grondwaterstroming mee nabootsen. Het Teledeltospapier kan gewoon met een schaar in de vorm van het modelgebied geknipt worden. Nadat spanning aangebracht is op de randen met gegeven stijghoogte, kan de potentiaal (stijghoogte) op elk willekeurig punt gemeten worden met een multimeter (afbeelding 3).



Afbeelding 3: Simulatie van grondwaterstroming met Teledeltospapier (UCSD, 2010)

Al vroeg introduceerde Verruijt ook de persoonlijke computer in zijn colleges. De examens voor het vak grondwatermechanica werden zelfs in de jaren tachtig al volledig op de computer afgenomen, waarvoor Verruijt zelf programmatuur geschreven had. Binnen de faculteit civiele techniek keken alle studenten op tegen Professor Verruijt, maar hij was heel benaderbaar. Hij maakte altijd tijd voor zijn studenten en probeerde ze te helpen tijdens hun studie, maar ook tijdens hun carrière nadat ze afgestudeerd (of gepromoveerd) waren. Arnold heeft 36 PhD-studenten begeleid, waarvan zes op het gebied van grondwaterstroming, op een breed scala van onderwerpen van dispersie en niet-lineariteit tot periodieke stroming en de hodograafmethode.

Arnold Verruijt is gestorven op 4 Augustus 2022. Hij is 82 jaar geworden. Collega's die zijn werk kennen, en bovenal collega's die zijn colleges bijgewoond hebben, zullen zich goed herinneren hoe buitengewoon duidelijk hij zaken uit kon leggen. De grondwaterwereld heeft een icoon verloren.

Literatuur

Bear, J., en A. Verruijt (1987) Modeling groundwater flow and pollution. Springer.

USCD. (2010). Electric potential and fields. Class notes University of California San Diego.

Verruijt, A. (1969) Elastic storage of aquifers. In: Flow through porous media (R.J.M. de Wiest, editor), Academic Press, New York, 331-376.

Verruijt, A. (1970) Theory of Groundwater Flow. Macmillan, London.

Verruijt, A. (1982) Theory of Groundwater Flow. Second Edition. Macmillan, London.

Verruijt, A. (2016) Theory and Problems of Poroelasticity,
<https://geo.verruijt.net/>

Auteurs

MARK BAKKER
Technische Universiteit Delft
mark.bakker@tudelft.nl

HENK M. HAITJEMA
Indiana University

OTTO D.L. STRACK
University of Minnesota

