

Praktijkreeks Cultureel Erfgoed

Tufsteen

**Evaluatie van gele Napolitaanse tuf
(*Tufo Giallo Napolitano*) als compatibele
vervangende steen voor Römer tuf in
Nederlandse monumenten**

Timo G. Nijland, Rob P.J. van Hees & Laura Bolondi

Aflevering 2
maart 2008,
nr. 5

Sdu Uitgevers bv
Den Haag, 2008

Meer informatie over deze en andere uitgaven kunt u verkrijgen bij:
Sdu Klantenservice
Postbus 20014
2500 EA Den Haag
tel.: (070) 37 89 880
fax: (070) 37 89 783

Redactie:
Drs. Meindert Stokroos (hoofredacteur)
Ing. Bert van Bommel (Rijksgebouwendienst, TU Delft)
Jan van Zelst (Hylkema Consultants)

© Sdu Uitgevers bv Den Haag, 2008

Vormgeving omslag: Dupuis Communicatie, Rotterdam
Typografische verzorging binnenwerk: www.az-gsb.nl, Den Haag

ISBN: 9789012126595
NUR:680

Alle rechten voorbehouden. Alle auteursrechten en databankrechten ten aanzien van deze uitgave worden uitdrukkelijk voorbehouden. Deze rechten berusten bij Sdu Uitgevers bv.

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet 1912 gestelde uitzonderingen, mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16 h Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich te wenden tot de Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.cedar.nl/pro). Voor het overnemen van een gedeelte van deze uitgave ten behoeve van commerciële doeleinden dient men zich te wenden tot de uitgever.

Hoewel aan de totstandkoming van deze uitgave de uiterste zorg is besteed, kan voor de afwezigheid van eventuele (druk)fouten en onvolledigheden niet worden ingestaan en aanvaarden de auteur(s), redacteur(en) en uitgever deswege geen aansprakelijkheid voor de gevolgen van eventueel voorkomende fouten en onvolledigheden.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the publisher's prior consent.

While every effort has been made to ensure the reliability of the information presented in this publication, Sdu Uitgevers neither guarantees the accuracy of the data contained herein nor accepts responsibility for errors or omissions or their consequences.

Inhoud

1	Gebruik van Rijnlandse tuf in Nederlandse monumenten	6
2	Historisch gebruik van gele Napolitaanse tuf	8
3	Eigenschappen van Römer tuf	10
4	Tuf uit de omgeving van Napels	11
4.1	Geologie van de gele Napolitaanse tuf	11
5	Fysische eigenschappen en duurzaamheid	12
5.1	Analysemethoden	12
5.2	Mineralogie en microstructuur	12
5.3	Schijnbare porositeit en wateropname	13
5.4	Vorst-dooibestandheid	14
6	Conclusie	15
	Informatie over de auteurs	18
	Literatuurlijst en noten	19

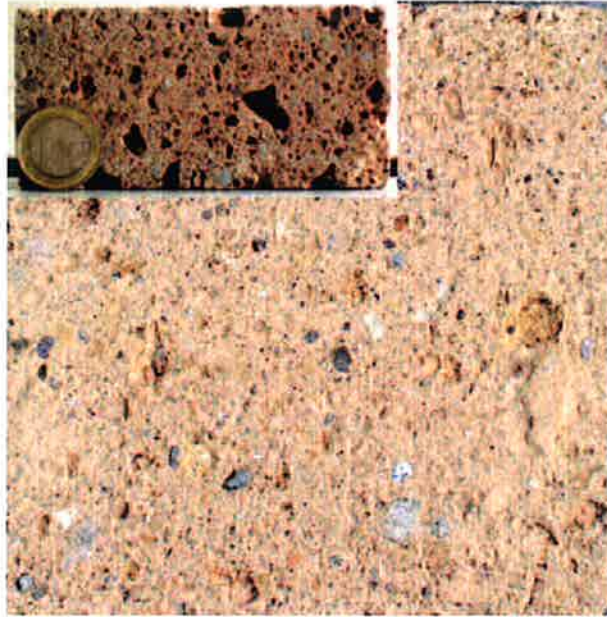


Tufsteen

Evaluatie van gele Napolitaanse tuf (*Tufo Giallo Napolitano*) als compatibele vervangende steen voor Römer tuf in Nederlandse monumenten

Vulkanische tufsteen uit de Eifel, Duitsland, vinden we aan een belangrijk deel van het Nederlands gebouwd cultureel erfgoed. Deze groep gesteenten omvat verschillende typen, te weten de Römer tuf, afgezet tijdens de eruptie van de Laacher Seevulkaan 11.900 jaar geleden; en de Ettringer (inclusief de variëteit Hasenstoppler), Weiberner (inclusief de variëteit Hohenleie) en Riedener tuffen, allen van oudere erupties in de Riedener caldera. De eerste drie tuffen zijn op grote schaal gebruikt in Nederlandse monumenten. De hoeveelheid Römer die tegenwoordig beschikbaar is voor restauraties, is helaas bijzonder gering (als ze al te verkrijgen is). De onderlinge verschillen in fysische eigenschappen en uiterlijk tussen de tufstenen uit de Eifel zijn aanzienlijk. Weiberner noch Ettringer tuf vormen daarom op voorhand een aangewezen vervangende steen voor de Römer tuf bij restauraties. In verschillende andere landen, zoals Italië, Hongarije en Turkije, vormt tufsteen een belangrijke monumentale bouwsteen. Mogelijk kent men daar tufstenen die geschikt zijn als vervangende steen voor de Römer tuf. In Italië kenmerken de regio's rond Rome en Napels zich van oudsher door bouw in tufsteen. Sommige van deze tuffen lijken qua uiterlijk meer op de Weiberner tuf, of in het geheel niet op in Nederland in het verleden gebruikte tufsteen.¹ Andere, zoals varianten van de gele Napolitaanse tuf, komen visueel veeleer in aanmerking (figuur 1). De vraag is of dat ook het geval is wat fysische eigenschappen – lees duurzaamheid – betreft. In dit artikel wordt ingegaan op deze vraag met betrekking tot één variant van de gele Napolitaanse tuf.²

1 Macroscopisch opname van gele Napolitaanse tuf, met als inzet een voorbeeld van sterk op de klassieke Römer gelijkende variant van de laatste.
©Timo G. Nijland.



1 Gebruik van Rijnlandse tuf in Nederlandse monumenten

Zoals gezegd zijn tufstenen uit de Eifel op grote schaal in Nederland gebruikt. Nijland en Van Hees³ hebben recent een overzicht gegeven van dit gebruik. Hier wordt een korte samenvatting gegeven.

Het gebruik van tufsteen uit de Eifel als bouwsteen in Nederland gaat terug tot de Romeinse periode. De Romeinen introduceerden de steen in Nederland. Dezelfde tuf werd opnieuw gebruikt in de romaanse periode, van de tiende tot begin dertiende eeuw, waarin het de meest gebruikte natuursteen was.⁴ De steden Utrecht en Dordrecht fungeerden als stapelmarkten voor tuf die over de Rijn aangevoerd werd, en vervolgens gedistribueerd over grote delen van het land, alsook het meest westelijk deel van België (rond Brugge),⁵ het noorden van Duitsland en westen van Denemarken.⁶ Enkele voorbeelden van het gebruik van Römer tuf zijn de romaanse en gotische Dom in Utrecht; andere elfde-eeuwse kerken van bisschop Bernold aldaar;⁷ vele romaanse dorpskerken in Groningen⁸ en Holland;⁹ enkele van de oudste nog bewaard gebleven middeleeuwse huizen, waaronder het oudste profane gebouw in Nederland, de Proosdij in Deventer (oudste deel circa 1130, gevel tweede helft twaalfde eeuw, figuur 2);¹⁰ en verschillende verdedigingswerken, waaronder de twaalfde-eeuwse Burcht te Leiden. Vanaf het begin van de dertiende



2 Een van de oudste overlevende metselwerkgevels in Römer tuf: de Proosdij in Deventer.
©Timo G. Nijland.

eeuw verdwijnt de Römer tuf meer en meer uit beeld. Dit gebeurde onder meer door de concurrentie van lokaal geproduceerde baksteen en natuursteen. In tegenstelling tot de Römer tuf konden die materialen aangevoerd worden zonder tol op de Rijn te betalen. Lokaal werd de Römer tuf nog wel veel langer gebruikt.

In de vijftiende en het begin zestiende eeuw kwam een andere tufsteen uit de Eifel in zwang: de Weiberner. Het ging hierbij in het bijzonder om de fijnkorrelige variëteit daarvan, de Hohenleie (of *Hohen Ley*) tuf. Deze was bijzonder geschikt voor fijne bewerking. Typerende voorbeelden van de toepassing zijn de vijftiende-eeuwse blindtraceringen in de pandhof van de Utrechtse Dom¹¹ en de hogels op de luchtbogen van de Sint-Janskathedraal te 's-Hertogenbosch. De steen werd echter ook voor paramentwerk gebruikt, zoals aan de Grote Kerk in Zwolle. Later, in de tweede helft van de negentiende eeuw en in de eerste helft van de twintigste eeuw, werd de steen opnieuw geïntroduceerd. Toen vond hij zowel toepassing in de nieuwbouw als in de restauratie. In het laatste geval ging het niet alleen om de vervanging van oorspronkelijke, vergane tufsteen, maar ook van witte Belgische steen.¹²

In dezelfde periode werd een nieuwe tufsteen, de Ettringer (inclusief Hasenstoppler) in Nederland geïntroduceerd. Ook deze werd zowel voor nieuwbouw- als

restauratiedoeleinden gebruikt. Voorbeelden van nieuwbouw in Ettringer tuf zijn onder meer de toren van het stadhuis in Rotterdam (1916) en de KAS Bank in Amsterdam (1932). Typerend is het gebruik van Ettringer tuf in de jaren dertig voor kerken in een eclectische stijl met orthodoxe invloed. Ook zien we hem als kleine bouwelementen in gevels van rode baksteen, een combinatie die in de jaren vijftig opnieuw opduikt.¹³

2 Historisch gebruik van gele Napolitaanse tuf¹⁴

Het gebruik van vulkanische tufsteen als bouwmateriaal gaat in Italië terug tot prehistorische tijd. De steen is door alle perioden heen karakteristiek voor de architectuur van Zuid-Italiaanse regio Campanië, waar in verschillende gebieden lokale tufsteen werd gebruikt. In het gebied rond Napels dateren de oudste voorbeelden van het gebruik van tufsteen als bouwmateriaal van ongeveer 2,5 millennia geleden: necropoli waarin tufstenen dekzerken werden gebruikt om graven af te dekken. In de vroeg-christelijke periode werd eveneens op grote schaal tufsteen gebruikt, maar de enige nog overgebleven voorbeelden zijn enkele monnikscellen in het Castel dell'Ovo in Napels (figuur 3). Dit kasteel werd in de tiende eeuw verwoest en enkele decennia later herbouwd in tufsteen. In de Middeleeuwen werd tufsteen zowel als paramentsteen als voor ornamenten en beeldhouwwerk gebruikt.

De Angevineperiode (1266 – 1443) leverde de stad Napels de belangrijkste monumenten in gele Napolitaanse tuf uit haar architectuurgeschiedenis op. Zowel religieuze als profane bouwwerken werden opgetrokken in ongepleisterde tufsteen (*tufu nudo*). De twee belangrijkste kastelen van de stad, het Castelnuovo en Belforte, zijn opgetrokken in tufsteenmetselwerk. Ondanks haar Franse oorsprong ontwikkelde de Napolitaanse gotiek door het gebruik van de gele Napolitaanse tuf haar eigen typische stijl en uitgesproken karakter. Tuf werd echter niet gebruikt op de zwaar belaste plaatsen in bouwwerken. Men gebruikte daar andere soorten natuursteen, waardoor de Napolitaanse gotiek één van haar belangrijkste eigenschappen kreeg, haar polychrome uiterlijk.

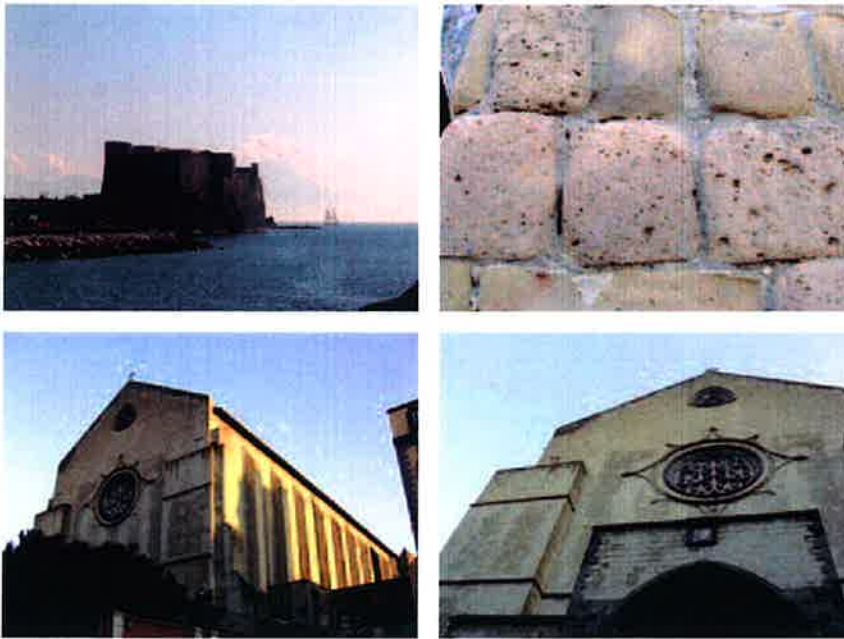
Hoewel de Aragonese overheersing (1443 – 1503) slechts zestig jaar duurde, betekende zij een keerpunt in de Napolitaanse architectuur en het gebruik van tufsteen. Tuf raakte niet geheel in onbruik, maar werd meer en meer een bouwwerksteen die bekleed werd met andere materialen (zoals piperno en lava van de Vesuvius). De nieuwe stadsmuren van Napels waren het eerste bouwwerk waarin tuf alleen gebruikt werd voor de vulling. De muren werden bekleed met piperno blokken tot 50 cm dik.

De zeventiende eeuw betekende voor de stad Napels een periode van enorme expansie en bevolkingsgroei, met behoefte aan nieuwe en renovatie van oude huizen. Een grote hoeveelheid goedkope en gemakkelijk te bewerken bouwmateriaal

was hiervoor een vereiste. Tuf werd op grote schaal gewonnen en gebruikt. Tegelijk paste de architectuur zich aan de nieuwe barok aan. Tufsteenmetselwerk werd nu vaak gepleisterd, ook bij goedkopere huizen, om aan de artistieke en esthetische eisen van de barok te voldoen. Vanaf het neoclassicisme werd ongepleisterde tuf iets dat tot het verleden behoorde. Het was niet langer een kenmerk van de Napolitaanse architectuur.

In de neorenaissance halverwege de negentiende eeuw werd tuf niet gewaardeerd. Het werd als een minderwaardig materiaal beschouwd, geschikt voor gepleisterde ornamenten en polychrome oppervlakken. Het enige gebouw dat in deze periode in Napels in *naakte* tufsteen werd opgetrokken was de Accademia di Belle Arti (in het oude klooster van San Giovanni). Aangezien de verbouwing van het klooster tot academie nooit voltooid werd, werden de tufsteengevel en ornamenten nooit gepleisterd.

Rond 1900 werd tufsteen opnieuw gebruikt, maar uitsluitend als restauratiesteen. Eén van de belangrijkste bouwwerken in gele Napolitaanse tuf in de twintigste eeuw is het complex in Marianella (Napels). Dit werd in 1983 gebouwd door F. Purini en L. Thermes. Zij kozen juist voor deze steen, omdat ze meenden dat de identiteit van de gebouwen zo specifiek tot uitdrukking werd gebracht.



3 Enkele voorbeelden van het gebruik van gele Napolitaanse tuf in Napels: boven overzicht en detail van het Castel dell'Ovo, onder de Santa Chiara. © Laura Bolondi.

3 Eigenschappen van Römer tuf

De eigenschappen van Römer tuf zijn in het verleden al in het Praktijkboek Instandhouding Monumenten behandeld.¹⁵ De tuf is afkomstig van de versteende vulkanische asafzettingen van de Laacher See-vulkaan in de Eifel.¹⁶ In het verleden werd de tuf met verschillende namen aangeduid, zoals *duifsteen*, *trastuf*, *lapillituf* of *Andernach tuf*. De Römer tuf heeft een trachytische samenstelling. Net als alle Rijnlandse tuffen is het een macroporeus gesteente met variabele hoeveelheden puimsteen en gesteentefragmenten in een fijnkorrelige matrix van omgezet vulkanisch glas. Typische magmatische mineralen en xenocrysten in de Römer tuf zijn sanidien, andere veldspaten, clinopyroxeen (titaanaugiet, diopsied), olivijn, amfibool, biotiet, opake mineralen en carbonaat.¹⁷ Het oorspronkelijke vulkanische glas in de matrix is grotendeels omgezet in zeolieten. In vers groevemateriaal en materiaal van Nederlandse monumenten komen de assemblages analciem + chabaziet en analciem + chabaziet + phillipsiet voor, de laatste het meest; in verweerde monsters van Nederlandse monumenten komen ook de assemblages analciem, analciem + phillipsiet en phillipsiet voor.¹⁸

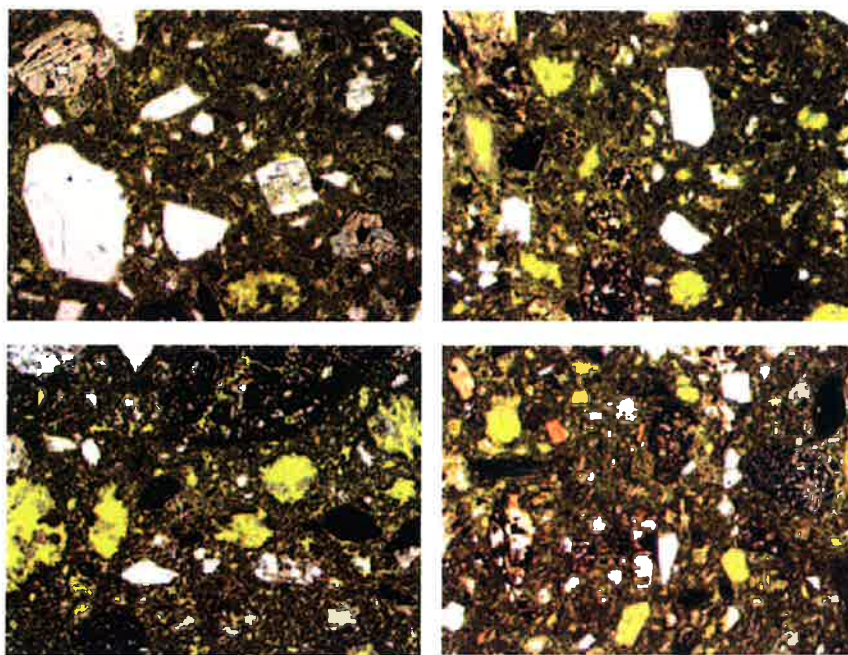
Hoewel de Römer tuf als verweringsgevoelig te boek staat,¹⁹ is aan verschillende monumenten, bijvoorbeeld de elfde-eeuwse Sint-Janskerk in Utrecht, nog materiaal uit de bouwtijd aanwezig. Verschillende Rijnlandse tuffen laten verschillende verweringsvormen zien. Typisch voor de Römer tuf zijn afspringen van het oppervlak (*spalling*),²⁰ alveoli, verpoedering en oplossing van de matrix, en zoutuitbloei. Daarnaast is de steen gevoelig voor biokolonisatie.²¹ De porositeit is variabel, van 37,7 vol.% in bouwtijd materiaal van de Sint-Janskathedraal te 's-Hertogenbosch tot 41,5 vol.% in Römer tuf met veel basaltfragmenten uit het onderste van de aslagen (zoals veel gebruikt in restauraties in de laatste decennia), en zelfs tot 53,9 vol.% in Römer tuf gebruikt bij de recente restauratie van de Sint-Janskathedraal. De waterabsorptiecoëfficiënten voor de laatste twee typen zijn respectievelijk 0,17 en 0,32 kg/m²s^{0,5}.²² Römer tuf laat onderling ook aanzienlijke variatie zien in poriegrootteverdeling, wateropname en droging en bestandheid tegen zoutkristallisatie, waarbij de variëteit met 53,9 vol.% porositeit geen schade laat zien onder invloed van Na₂SO₄, maar die met 41,5 vol.% porositeit juist afspringen van het oppervlak toont. De variëteit met 53,9 vol.% porositeit bleek daarnaast tegen vorst bestand, zelfs onder de zwaarste condities.

4 Tuf uit de omgeving van Napels

De omgeving van Napels kent verschillende tufsteensoorten, waarvan de grijze Campaanse tuf²³ en de gele Napolitaanse tuf van in en direct rond de stad Napels²⁴ de voornaamste zijn. De laatste varieert van geel tot licht bruin in kleur. Sommige varianten passen esthetisch gezien vrij goed bij de Römer tuf, terwijl ook de samenstelling enige overeenkomsten vertoont.²⁵ De licht bruine variant is recent in kleine hoeveelheden als vervangende steen in Nederland toegepast, onder meer aan de Lambertitoren in Zelhem.

4.1 Geologie van de gele Napolitaanse tuf

De gele Napolitaanse tuf is afgezet bij de jongste van de twee grote calderavormende uitbarstingen op de Phlegreïsche Velden (Campi Flegrei) bij Napels. Daarbij stortten de eerder gevormde caldera, waarbij de Campaanse Ignimbriet gevormd werd (39.000 jaar geleden), in. De uitbarsting vond plaats circa 14.900 jaar geleden,²⁶



4 Microfoto's met overzicht van de microstructuur van gele Napolitaanse tuf (linksboven), Römer tuf voor de huidige restauratie van de Sint-Janskathedraal te 's-Hertogenbosch (rechtsboven), Römer tuf (linksonder) zoals de laatste decennia in veel restauraties gebruikt (variant met veel basaltfragmenten) en Römer tuf gebruikt aan de Sint-Jan in de bouwtijd (rechtsonder) (alle foto's parallel gepolariseerd licht, beeldveld 5,4 x 3,5 mm). ©Timo G. Nijland.

en was geenszins de laatste vulkanische activiteit in het gebied. Daarna volgden nog tenminste twintig erupties, de laatste in 1538.²⁷ Afzettingen van de gele Napolitaanse tuf komen voor in de Phlegreïsche Velden zelf, naar het noorden in de Campaanse vlakke, en in de stad Napels, waar de afzetting 50 tot 150 m dik is. In totaal omvatten de verspreide ontsluitingen een gebied van meer dan 1000 km², met een totaal geschat volume uitgestoten magma van 40 á 46 km³.²⁸ De afzetting van de gele Napolitaanse tuf is opgebouwd uit twee leden. De bovenste bestaat uit zes pyroclastische eenheden, met talrijke ingeschakelde aslagen, en komt voor tot 31 km van het centrum van de uitbarsting. De onderste bestaat eveneens uit meerdere pyroclastische eenheden, die veelal dikker en massiever zijn, en is in het algemeen grofkorreliger. Zij komt tot veertien kilometer van het eruptiecentrum voor.²⁹ De gele Napolitaanse tuf ligt op oudere vulkanische afzettingen van de Chiaia-, Posillipo- of Montesantoformaties, dan wel op een *welded* tuf die lokaal *piperno* genoemd wordt, en ook als veelvuldig als bouwsteen gebruikt is.³⁰ Verstening van de vulkanisch as is, net als in de Eifel, variabel. Bij de gele Napolitaanse tuf neemt de mate van consolidatie zowel naar de bovenzijde als de basis van de afzetting af, alsook met afstand van het centrum van de uitbarsting. Ook het aandeel van de zeolieten in de versteende matrix is variabel. De verstening vond plaats in een gesloten systeem waarbij warme, zure waterige oplossingen reageerden met het alkalirachitische glas in de matrix. Dat resulteerde in de kristallisatie van phillipsiet, gevolgd door chabaziet.³¹

5 Fysische eigenschappen en duurzaamheid

5.1 Analysemethoden

Mineralogie en microstructuur zijn onderzocht door middel van polarisatie en fluorescentiemicroscopie (PFM) en Röntgen diffractieanalyse (XRD). De schijnbare porositeit is bepaald conform RILEM CPC 11.3.³² Bestandheid tegen vorst-dooicycli is bepaald met de zogenaamde *zandkistvriesproef*,³³ in overeenstemming met de beoogde toepassing als bouwsteen voor paramentwerk.

5.2 Mineralogie en microstructuur

Het onderzochte monster gele Napolitaanse tuf heeft een open, poreuze matrix. Daarin zijn de oorspronkelijke scherfjes vulkanisch glas nog makkelijk te herkennen, in tegenstelling tot in de Römer tuf. Feno- en xenokristen zijn sanidien, plagioklaas, kwarts, clinopyroxeen, biotiet en opake mineralen. Voorkomende gesteentefragmenten zijn basalt en puimsteen. De puimsteen heeft een draderige interne structuur, met afgeplatte holtes en af en toe grote, euhedrische plagioklaas-kristallen. De puimsteen is gezeolitiseerd, maar individuele kristallen zijn door-

gaans moeilijk te identificeren. Zowel kubische chabaziet als rozetten van prismatische phillipsiet komen voor. Röntgen diffractieanalyse bevestigt de aanwezigheid van chabaziet en phillipsiet, naast analciem. De matrix direct rondom de puimsteenfragmenten is duidelijk dichter dan elders.

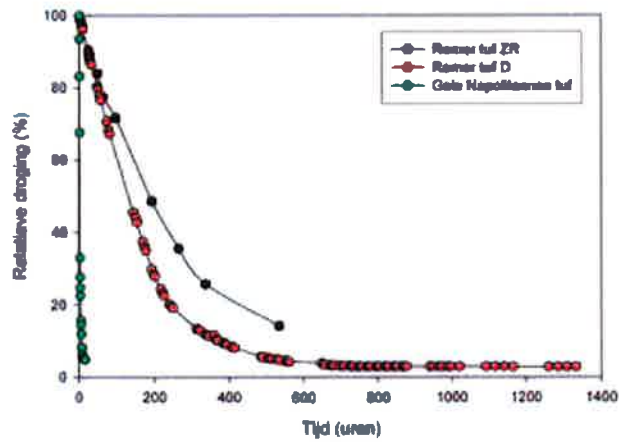
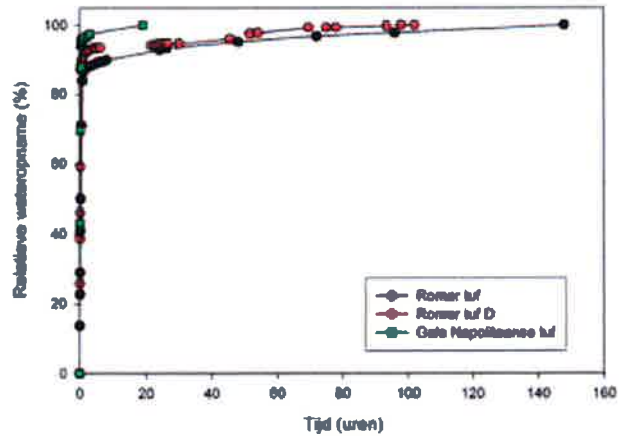
5.3 Schijnbare porositeit en wateropname

De resultaten voor porositeit en berekende waterabsorptiecoëfficiënten worden gegeven in tabel 1. Waterabsorptie- en droogcurves worden geven in figuur 5. Römer tuf laat zelf aanzienlijke variatie zien in zowel porositeit als waterabsorptiecoëfficiënt; ook gele Napolitaanse tuf laat aanzienlijke variatie in porositeit zien.³⁴ Het onderzochte monster gele Napolitaanse tuf komt qua porositeit in de buurt van de Römer tuf die momenteel als vervangende steen bij de restauratie van de Sint-Janskathedraal te 's-Hertogenbosch gebruikt wordt, maar de waterabsorptiecoëfficiënt is aanzienlijk hoger dan de hoogste waarde gevonden voor Römer tuf. Kortom: de gele Napolitaanse tuf neemt sneller water op. Daarnaast is de totale wateropname hoger (figuur 5). De tuf droogt echter ook aanzienlijk sneller (figuur 5).

Tabel 1. Waterabsorptiecoëfficiënt en schijnbare porositeit. Resultaten voor de licht bruine, in Nederland toegepaste gele Napolitaanse tuf, met als vergelijking literatuurdata voor deze tuf,³⁵ enkele andere Italiaanse tuffen,³⁶ en verschillende tufstenen uit de Eifel.³⁷

Tufsteensoort	Waterabsorptie coëfficiënt kg m ⁻² s ^{-0,5}	Schijnbare porositeit vol. %
Gele Napolitaanse tuf	0,46	51,8
Italiaanse tufsteen		
Gele Napolitaanse tuf, diverse typen		38,6 – 52,4
Tufo Romano	0,26	50,1
Tufo Etrusco	0,27	47,8
Rijnlandse tufsteen		
Römer tuf, bouwtijd Sint-Janskathedraal	0,32	37,7
Römer tuf, restauratie Sint-Janskathedraal		53,9
Römer tuf, recente restauraties	0,17	41,5
Weiberter tuf, groevemateriaal	0,24 – 0,38	47,4 – 45,7
Weiberter tuf, bouwtijd Sint-Janskathedraal		45,9

5 Waterabsorptie- en droogcurves voor gele Napolitaanse tuf in vergelijking met twee soorten Römer tuf, D met 53,9 vol.% schijnbare porositeit (restauratie Sint-Janskathedraal), en ZR met 41,5 vol.% schijnbare porositeit (met veel basaltfragmenten).



5.4 Vorst-dooibestandheid

De resultaten voor de bestandheid van gele Napolitaanse tuf tegen vorst-dooicycli worden, samen met die van enkele andere Italiaanse en Rijnlandse tufstenen, gegeven in tabel 2. Zoals uit deze tabel blijkt, is de prestatie van de onderzochte variant van de gele Napolitaanse tuf net als enkele andere Italiaanse tufstenen minder dan die van eerder onderzochte Römer en Weiberner tufstenen, getest volgens dezelfde procedures. Dat geldt met name voor de condities die relevant zijn voor een toepassing buiten, dat wil zeggen voorconditionering bij 75 % en 100 % vacuüm.

Tabel 2. Vorst-dooibestandheid van gele Napolitaanse tuf, in vergelijking tot enkele andere Italiaanse tufstenen³⁸ en tufstenen uit de Eifel.³⁹

Tufsteen	Voorconditionering (% vacuüm)			
		100 %	75 %	50 %
Gele Napolitaanse tuf	1	Sterke exfoliatie, compleet uiteenvallen bij aanraken	Sterke exfoliatie, compleet uiteenvallen bij aanraken	Enige afschilfering, niet met de hand te breken
	2			
Tufo Romano	1			Geen visuele schade
	2			
Tufo Etrusco	1			Geen visuele maar makkelijk met de hand te breken
	2			
Römer tuf, restauratie Sint-Janskathedraal	1	Geen visuele schade	Geen visuele schade	Geen visuele schade
	2	Sterke exfoliatie		
Weibemer tuf, groevemateriaal	1			
	2			
Weibemer tuf, groevemateriaal	1			
	2			
Weibemer tuf, groevemateriaal	1			
	2			

6 Conclusie

Römer tuf vertoont zelf, net als andere tufstenen uit de Eifel, aanzienlijke variatie in fysische eigenschappen die de duurzaamheid van de steen bepalen, zoals de open porositeit, hygrisch gedrag en poriegrootteverdeling.⁴¹ Dit maakt het moeilijk om de compatibiliteit van welke andere tufsteen dan ook als vervangende steen te beoordelen. Het onderzochte monster gele Napolitaanse tuf past esthetisch gezien goed bij de Römer tuf die een belangrijk deel van de bouwmassa in het gebouwde Nederlandse cultureel erfgoed uitmaakt, en waarvoor een geschikte vervangende steen dringend gewenst is.

In gele Napolitaanse tuf is het oorspronkelijke vulkanische glas omgezet naar dezelfde zeolieten als die welke voorkomen in de Römer tuf, te weten chabaziet, phillipsiet en analciem. De laatste steen laat echter verschillende assemblages zien.⁴² Hoewel een duidelijke relatie tussen de in de tufsteen aanwezige zeolietassemblage en de duurzaamheid als bouwsteen vooralsnog niet vastgesteld is, is het waarschijnlijk dat deze mineralen, naast fysische eigenschappen zoals (schijnbare)

Conclusie



6 Verschillende Italiaanse tufstenen na vorst-dooiproef en voorconditionering bij 10% vacuüm. Links de gele Napolitaanse tuf, in het midden Tufo Romano, en rechts Tufo Etrusco.⁴⁰

porositeit, poriestructuur en hygrisch gedrag, een rol spelen in de bepalen van de duurzaamheid, bijvoorbeeld in de bestandheid tegen zure regen.⁴³ Gekoppelde chemische, mechanische en hydraulische processen,⁴⁴ deels gecontroleerd door de relatieve stabiliteit van verschillende zeolieten, beïnvloeden de duurzaamheid van de steen door tijdsafhankelijke verandering in de eigenschappen van de tuf, zoals toename van de waterabsorptie met de tijd (ouderdom)⁴⁵ en veranderingen in lineaire vervorming en krimpgedrag met de tijd.⁴⁶ Daarnaast zal de duurzaamheid van de gele Napolitaanse tuf ongetwijfeld beïnvloed worden door het feit dat de microstructuur duidelijk minder continue is dan in enige Römer tuf.⁴⁷

Net als in de Römer tuf laat de gele Napolitaanse tuf aanzienlijke variatie zien in fysische eigenschappen, zoals de schijnbare porositeit (tabel 1).⁴⁸ In vergelijking tot de Römer tuf laat de gele Napolitaanse tuf die is onderzocht een schijnbare porositeit zien die vergelijkbaar is met de Römer tuf die momenteel bij de restauratie van de Sint-Janskathedraal te 's-Hertogenbosch wordt toegepast. De laatste toont ook een zeer goede vorstbestandheid in het laboratorium. Dit is helaas niet het geval met het onderzochte type gele Napolitaanse tuf.

Samenvattend kan worden vastgesteld dat, hoewel de gele Napolitaanse tuf die thans onderzocht is een esthetisch acceptabele vervangende steen zou kunnen zijn voor de Römer tuf, dit type aanzienlijk minder vorstbestand is. Ook enkele andere eigenschappen, zoals het hygrisch gedrag, doen de vraag opwerpen of de steen compatibel is in één en hetzelfde tufsteenmetselwerk.

Informatie over de auteurs

Dr. **Timo G. Nijland** is verbonden aan het Cultural Heritage team van TNO Bouw en Ondergrond te Delft.

Prof.ir. **Rob P.J. van Hees** is eveneens verbonden aan het Cultural Heritage team van TNO Bouw en Ondergrond te Delft. Daarnaast is hij hoogleraar conserveringstechnieken bij de Afdeling ^{©MIT} van de Faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft.

Laura Bolondi behaalde haar MSc aan de Politecnico in Milaan op een afstudeeronderzoek naar gele Napolitaanse Tuf, uitgevoerd bij TNO Bouw en Ondergrond. Tegenwoordig werkt ze aan haar promotie aan het IMT Alti Studi Lucca te Lucca, Italië.

Literatuurlijst en noten

Literatuur

- Blacic 1993:** J.D. BLACIC: Hydration swelling effects on time-dependent deformation of zeolitized tuff. In: *Journal of Geophysical Research*, **98B**, 1993, pp.15909-17.
- Bolondi... [et al.] 2007:** L. BOLONDI, T.G. NIJLAND & R.P.J. VAN HEES: Performance of stone outside its original environment: Neapolitan Yellow Tuff as replacement stone for Rhenish tuff in the Netherlands. In: *CITTAM Conference 'Stone' building between innovation and tradition, Naples*. Naples, Luciano, 2007, pp. 121-6.
- Brendle 2003:** S. BRENDLE: Weathering of tuff stone. *TNO report 2003-CI-R0044*. Delft, TNO, 2003.
- Calcaterra... [et al.] 2000:** D. CALCATERRA, P. CAPPELLETTI, A. LANGELLA, V. MORRA, A. COLLELA & R. DE GENNARO: The building stones of the ancient centre of Naples (Italy): Piperno from Campi Flegrei. A contribution to the knowledge of a long-time-used stone. In: *Journal of Cultural Heritage*, **1**, 2000, pp. 415-27.
- Cardone 1990:** V. CARDONE: *Il tufo nudo nell'architettura napoletana*. Naples, CUEN, 1990.
- Gioffi... [et al.] 1991:** R. GIOFFI, O. MARINO & G. MASCOLO: The physical action of water on the decay of building grey-tuff stone. In: *Materials Engineering*, **2**, 1991, pp. 263-75.
- Cole... [et al.] 1993:** P.D. COLE & C. SCARPATI: A facies interpretation of the eruption and emplacement mechanisms of the upper part of the Neapolitan Yellow Tuff, Campi Flegrei. In: *Bulletin of Volcanology*, **55**, 1993, pp. 311-26.
- Cole... [et al.] 1994:** P.D. COLE, A. PERROTTA & C. SCARPATI: The volcanic history of the southwestern part of the city of Naples. In: *Geological Magazine*, **131**, 1994, pp. 785-99.
- Deino... [et al.] 2004:** A.L. DEINO, G. ORSI, S. DE VITA & M. PIOCH: The age of the Neapolitan Yellow Tuff caldera-forming eruption (Campi Flegrei caldera – Italy) assessed by ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating method. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **133**, 2004, pp. 157-70.
- Ebisch 2005:** M. EBISCH: TNO atlas of tuff stone (version 1.0). *TNO report 2005-CI-R0138*. Delft, TNO, 2005.
- Fitzner 1990:** B. FITZNER & L. LEHNERS: Rhenish tuff – A widespread, weathering-susceptible natural stone. In: D.G. PRICE (redactie): *Proceedings of the 6th International Congress of the International Association of Engineering Geology*. Rotterdam, Balkema, 1990, pp. 3181-8.
- Fitzner 1994:** B. FITZNER: Volcanic tuffs: The description and quantitative recording of their weathered state. In: A.E. CHAROLA, R.J. KOESTTLER & G. LOMBARDI (redactie): *Lavas and volcanic Tuffs. Proceedings of the International Meeting*, Easter Island, Chile, 1990. Rome, ICCROM, 1994, pp. 33-51.
- De' Gennaro... [et al.] 1993:** M. DE' GENNARO, M.D. FUSCALDO & C. COLLELA: Weathering mechanisms of monumental tuff-stone masonries in downtown Naples. In: *Science and Technology for Cultural Heritage*, **2**, 1993, pp. 53-62.
- De' Gennaro... [et al.] 1994:** M. DE' GENNARO, C. COLLELA, R. AIELLO & E. FRANCO: Italian zeolites 2. Mineralogical and technical features of Campanian tuff. In: *Industrial Minerals*, **204**, 1984, pp. 97-109.
- De' Gennaro... [et al.] 2000a:** M. DE' GENNARO, D. CALCATERRA, P. CAPPELLETTI, A. LANGELLA & V. MORRA: Building stone and related weathering in the architecture of the ancient city of Naples. In: *Journal of Cultural Heritage*, **1**, 2000, pp. 399-414.
- De' Gennaro... [et al.] 2000b:** M. DE' GENNARO, P. CAPPELLETTI, A. LANGELLA, A. PERROTTA & C. SCARPATI: Genesis of zeolites in the Neapolitan Yellow Tuff: Geological, volcanological and mineralogical evidence. In: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **139**, 2000, pp. 17-35.

Literatuurlijst en noten

- Di Girolamo 1968:** P. DI GIROLAMO: Petrografia dei tufi campani: Il processo di pipernizzazione (Tufo → tufo pipernoide → piperno). In: *Rendiconti Accademia Scienze Fisica Matematica di Napoli*, 35, 1968, pp. 329-94.
- Haiduck 1992:** H. HAIDUCK: *Beginn und Entwicklung des Kirchenbaues im Küstengebiet zwischen Ems- und Wesermündung bis zum Anfang des 13. Jahrhunderts*. Aurich, Ostfriesische Landschaft, 1992.
- Den Hartog 2002:** E. DEN HARTOG: *De oudste kerken van Holland. Van kerstening tot 1300*. Utrecht, Matrijs, 2002.
- Van Hees... [et al.] 2003:** R.P.J. VAN HEES, S. BRENDLE, T.G. NIJLAND, G.J.L.M. DE HAAS & H.J. TOLBOOM: Decay of Rhenish tuff in Dutch monuments. Part 2: Laboratory experiments as basis for the choice of restoration stone. In: *Heron*, 48, 2003, pp. 167-77.
- Van Hees... [et al.] 2004:** R.P.J. VAN HEES, S. BRENDLE, T.G. NIJLAND, G.J.L.M. DE HAAS & H.J. TOLBOOM: Decay of Rhenish tuff in Dutch monuments. In: D. KWIATKOWSKI & R. LÖFVENDAHL (redactie): *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Stockholm, ICOMOS Sweden, 1, 2004, pp. 91-8.
- Van Hees... [et al.] 2005:** R.P.J. VAN HEES, C.W. DUBELAAR & T.G. NIJLAND: Toepassing, verwerking en vervanging van witte Belgische steen in Nederland. In: *Praktijkboek Instandhouding Monumenten*, 24 (16), 2005.
- Heiken... [et al.] 2005:** G. HEIKEN, R. FUNICIELLO & D. DE RITA: *The seven hills of Rome. A geological tour of the eternal city*. Princeton & Oxford, Princeton University Press, 2005.
- Langella... [et al.] 2000:** A. LANGELLA, D. CALCATERRA, P. CAPPELLETTI, A. COLELLA, M. DE' GENNARO & R. DE GENNARO: Preliminary contribution on durability of some macroporous monumental stones used in historical towns of Campania region, southern Italy. In: V. FESSINA (redactie): *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Venice, 1, 2000, pp.59-67.
- Naldini... [et al.] 2006:** S. NALDINI, R.P.J. VAN HEES & T.G. NIJLAND: Definitie van schade aan metselwerk. In: *Praktijkboek Instandhouding Monumenten* 28 (19), 2006.
- NEN 2872:** NEN 2872. *Beproeving van steenachtige materialen; bepaling van de vorstbestandheid; eenzijdige bevroering in zoetwatermilieu*. Delft, NEN, 1989.
- Nijland... [et al.] 2003a:** T.G. NIJLAND, S. BRENDLE, R.P.J. VAN HEES & G.J.L.M. DE HAAS: Decay of Rhenish tuff in Dutch monuments. Part 1: Use, composition and weathering. In: *Heron*, 48, 2003, pp. 149-66.
- Nijland... [et al.] 2003b:** T.G. NIJLAND & R.P.J. VAN HEES: Beoordeling van Weiberner en Römer tufsteen ten behoeve van de restauratie van de St. Janskathedraal te 's-Hertogenbosch. *TNO report 2003-CI-R0042*, Delft, TNO, 2003.
- Nijland... [et al.] 2005:** T.G. NIJLAND, R.P.J. VAN HEES, S. BRENDLE & H.K. GOEDEKE: Tufsteen. Deel 2: Invloed van vocht op de duurzaamheid van 'Rheinische' tuf. In: *Praktijkboek Instandhouding Monumenten*, 21 (15), 2005.
- Nijland... [et al.] 2006:** T.G. NIJLAND & R.P.J. VAN HEES: Use of Rhenish tuff in the Netherlands. In: ARKUS-Tagung Denkmalgestein Tuff, Koblenz. *Institut für Steinkonservierung Bericht*, 22, 2006, pp. 7-18.
- Nijland... [et al.] 2007:** T.G. NIJLAND, W. DUBELAAR & H.J. TOLBOOM: De historische bouwstenen van Utrecht. In: W. DUBELAAR, T.G. NIJLAND & H.J. TOLBOOM (redactie): *Utrecht in steen. Historische bouwstenen in de binnenstad*, Utrecht, Matrijs, 2007, pp. 31-109.
- Nijland... [et al.] 2008:** T.G. NIJLAND, R.P.J. VAN HEES & L. BOLONDI: Evaluation of three Italian tuffs (Neapolitan Yellow Tuff, Tufo Romano, Tufo Etrusco) as comptabile replacement stone for Römer tuff in Dutch built cultural heritage. In: *Geological Society Special Publication*, submitted.
- De Olde 2002:** H. DE OLDE: Tufstenen kerken in Groningen. In: *Groninger Kerken*, 19(1), 2002, pp. 4-30.
- RILEM 1984:** RILEM CPC 11.3: Absorption of water by concrete by immersion under vacuum. In: *Materials & Structures*, 17, 1984.
- Schmincke 1988:** H.U. SCHMINCKE: *Vulkane im Laacher See-Gebiet. Ihre Entstehung und heutige Bedeutung*. Haltern, Doris Bode Verlag, 1988.

- Sersale... [et al.] 1964: R. SERSALE & R. AIELLO: Costituzione e reattività del 'trass' renano. *L'Industria Italiana del Cemento*, 34, 1964, pp. 747-60.
- Slinger... [et al.] 1980: A. SLINGER, H. JANSE & G. BERENDS: *Natuursteen in monumenten*. Zeist, Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Baarn, Bosch & Keuning, 1980.
- De Vries... [et al.] 1992: D.J. DE VRIES, J.W. BLOEMINK & R.H.P.: De Proosdij in Deventer. *Bulletin Koninklijke Nederlandse Oudheidkundige Bond*, 91, 1992, pp. 156-65.

Noten

- 1 Bijvoorbeeld Tufo Etrusco en Tufo Romano (Nijland... [et al.] 2008).
- 2 Dit onderzoek werd voor een deel gefinancierd door de RACM. Discussies met H.J. Tolboom van de RACM droegen bij aan het onderzoek.
- 3 Nijland... [et al.] 2003b.
- 4 Slinger... [et al.] 1980, Nijland... [et al.] 2006.
- 5 Slinger... [et al.] 1980.
- 6 Haiduck 1992.
- 7 Nijland... [et al.] 2007.
- 8 De Olde 2002.
- 9 Den Hartog 2002.
- 10 De Vries... [et al.] 1992.
- 11 Nijland... [et al.] 2007.
- 12 Van Hees... [et al.] 2005.
- 13 Nijland... [et al.] 2006, Nijland... [et al.] 2007.
- 14 Het overzicht in deze paragraaf is in belangrijke mate gebaseerd op Cardone 1990.
- 15 Nijland... [et al.] 2003, Van Hees... [et al.] 2003.
- 16 Schmincke 1998.
- 17 Fitzner 1993, Nijland... [et al.] 2003a.
- 18 Nijland... [et al.] 2003a.
- 19 Bijvoorbeeld Fitzner... [et al.] 1993.
- 20 Voor een definitie van deze en andere verweringsvormen, zie Naldini... [et al.] 2006.
- 21 Nijland... [et al.] 2003.
- 22 Van Hees... [et al.] 2003, Van Hees... [et al.] 2004.
- 23 Bijvoorbeeld Langella... [et al.] 2000.
- 24 Bijvoorbeeld Cardone 1990, De' Gennaro... [et al.] 1993, De' Gennaro... [et al.] 2000a.
- 25 Sersale... [et al.] 1964.
- 26 Deino... [et al.] 2004.
- 27 Cole... [et al.] 1993.
- 28 Cole... [et al.] 1993, Cole... [et al.] 1994.
- 29 Cole... [et al.] 1993, Cole... [et al.] 1994.
- 30 Zie bijvoorbeeld Di Giralomo 1968 voor geologische informatie over deze steen en Calcaterra... [et al.] 2000 voor het gebruik als bouwsteen.
- 31 De' Gennaro... [et al.] 2000b.
- 32 RILEM 1984.
- 33 NEN 2872.
- 34 Bolondi... [et al.] 2007.
- 35 Bolondi... [et al.] 2007.
- 36 Nijland... [et al.] 2008.
- 37 Van Hees... [et al.] 2003, Van Hees... [et al.] 2004, Nijland... [et al.] 2005.
- 38 Nijland... [et al.] 2008.

Literatuurlijst en noten

- 39 Nijland... [et al.] 2003b.
- 40 Nijland... [et al.] 2008.
- 41 Van Hees... [et al.] 2003, Van Hees... [et al.] 2004.
- 42 Nijland... [et al.] 2003a.
- 43 Zie bijvoorbeeld De' Gennaro... [et al.] 1984.
- 44 Conform Blacic 1993.
- 45 Zoals die bijvoorbeeld optreedt bij tuffen uit de Eifel (Brendle 2003)
- 46 Zoals die bijvoorbeeld optreedt bij de grijze Campaanse tuf (Cioffi... [et al.] 1991).
- 47 Ebisch 2005.
- 48 Zie ook Bolondi... [et al.] 2007.